

XII. česko-slovenská konference

„Doprava, zdraví a životní prostředí“

Sborník příspěvků



Lednice | 22.–23. září 2026

Vědecký výbor:

Mgr. Roman Ličbinský, Ph.D. (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.) předseda vědecké rady

Ing. Vítězslav Křivánek, Ph.D. (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.)

Mgr. Robert Spáčil, Ph.D. (Ministerstvo dopravy ČR)

Mgr. Vendula Breburdová (Ministerstvo životního prostředí ČR)

Ing. Dana Potužníková, Ph.D. (Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě)

Doc. Ing. Dušan Jandačka, Ph.D. (Žilinská univerzita)

Doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D. (České vysoké učení technické)

RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc. (Český hydrometeorologický ústav)

Autoři příspěvků jsou odpovědní za vědecký obsah a lingvistickou úpravu textů. Všechny příspěvky prošly recenzním řízením.

Organizační výbor CDV:

Ing. Vilma Jandová, Ing. Denisa Frybertová

Autoři mohou používat jakékoli části svých příspěvků pro budoucí použití bez omezení.

Editoři: Ing. Vilma Jandová, Mgr. Roman Ličbinský

Citace:

JANDOVÁ, V., LIČBINSKÝ, R., XII. česko-slovenská konference „Doprava, zdraví a životní prostředí“. Lednice, 22. – 23. 9. 2026. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2026, 178 s. ISBN 978-80-88655-77-0 (Online; pdf)

© Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2026

ISBN 978-80-88655-77-0 (Online; pdf)

XII. česko-slovenská konference

„Doprava, zdraví a životní prostředí“

Sborník příspěvků



Lednice | 22.–23. září 2026

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství

České vysoké učení technické – Stavební fakulta

Žilinská univerzita v Žiline – Stavebná fakulta

Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Český hydrometeorologický ústav

Pod záštitou

Ministerstva dopravy

Ministerstva zdravotnictví ČR

Ministerstva životního prostředí ČR



Ministerstvo
zdravotnictví



Ministerstvo
životního prostředí



Ministerstvo
dopravy

Obsah

Monitoring kvality ovzduší pomocí nízkonákladových senzorů – aktuální možnosti a provozní požadavky	5
Pavel Chaloupecký, Ondřej Svačina	
Celoměstská senzorová síť v Brně pro modelování kvality ovzduší a zpřesnění odhadu expozice a zdravotních rizik	12
Ondřej Mikeš, Simona Šatková	
Časopriestorová variabilita $PM_{2,5}$ a PM_{10} v Žiline: koncentrácie, prvkové zloženie a hodnotenie senzorovej siete.....	16
Dušan Jandačka, Michal Cingel, Kristína Jastrabanová	
Charakterizace emisí částic z opotřebení pneumatik na válcovém dynamometru.....	29
Klaudia Matušková, Jiří Pospíšil, Lukáš Preisler	
Skryté externality při odvozu dětí do školy: Otázky spravedlnosti v souvislosti s vystavením dětí znečištění ovzduší při cestách do školy.....	36
Vilém Pařil, Dominika Tóthová	
Problematika hluku odstavovaných drážních vozidel a vlakových souprav	38
David Kresl, Dana Potužníková	
Strategické hlukové mapování popáté... ..	44
Eliška Kobzová, Pavel Junek	
Úloha akustického modelování při vyhodnocování rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření	51
Vítězslav Křivánek, Blanka Hablovičová, Aleš Peiger, Dana Potužníková, Vojtěch Máca, Ondřej Volf, Jiří Michalík	
Když hluk řídí dopravu: Smart technologie pro tišší silnice.....	57
Libor Ládyš, Martin Ládyš	
Jak čistý je opravdu zelený vodík?	64
Karel Borovec, Milan Dej, Petr Maršolek	
Stanovení čistoty vodíkového paliva v laboratoři: praktické zkušenosti se zaváděním metod kontroly čistoty vodíku pro PEM palivové články	72
Michal Neuschl, Radek Vít, Romana Michalíková	
Metodika kontroly kvality vodíkového paliva.....	79
Adéla Svejková, Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Michal Neuschl, Petr Polanský	

Vodíková ostrovní řešení – podpůrné nástroje koncepčního návrhu	87
Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Petr Polanský	
Plnicí standardy vodíkové stanice z pohledu bezpečnosti	97
Roman Smutný, Bronislav Vahalík, Vojtěch Přikryl	
Využití obnovitelných zdrojů energie v dopravě v Česku	108
Jan Mertl	
Aktuální témata z pohledu životního prostředí řešená na ŘSD	116
Radek Kropelnický a kolektiv	
Funkční a pestrá krajina: jiný pohled na stromy	118
Jiří Jedlička, Miloslav Kaláb, Lenka Foltýnová, Martin Vokřál	
Analýza mikročástic na povrchu ovoce v blízkosti dopravních komunikací v Hradci Králové.....	128
Martina Brenčíč, Markéta Holíková, Jaroslav Rožnovský	
Světelné znečištění – norma ČSN 36 0459	138
Vladislava Primas	
Motivy a bariéry využívání VHD v JMK.....	142
Petr David, Břetislav Andrlík, Michal Pšurný, Stanislav Mokřý	
Tramvajová kolejiště v České republice: od biodiverzity k enviromentálním rizikům	151
Eva Navrátilová	
Přínos zelených tramvajových tratí pro snižování tepelného ostrova města a podporu biodiverzity.....	162
Jan Szturc, Jaroslav Rožnovský, Eva Navrátilová	

Monitoring kvality ovzduší pomocí nízkonákladových senzorů – aktuální možnosti a provozní požadavky

Pavel Chaloupecký, Ondřej Svačinka

ENVltech Bohemia s.r.o.

Ovocná 1021/34, 16100 Praha 6

e-mail: chaloupecky@envitech-bohemia.cz

Abstrakt

V posledních letech dochází k výraznému rozvoji nízkonákladových senzorových systémů pro monitoring kvality ovzduší. Jejich hlavní předností je možnost vytvářet prostorově husté měřicí sítě, sledovat lokální rozdíly v úrovni znečištění a získávat data s vysokým časovým rozlišením při podstatně nižších investičních a provozních nákladech ve srovnání s referenčními či ekvivalentními metodami měření.

Současné senzorové systémy umožňují sledovat zejména koncentrace suspendovaných částic PM₁, PM_{2,5} a PM₁₀, ale také vybrané plynné znečišťující látky, například NO₂, O₃, CO nebo těkavé organické látky. Vedle samotných senzorů má na výslednou kvalitu dat zásadní vliv konstrukce měřicího systému, způsob odběru vzorku, kompenzace vlivu meteorologických podmínek, zpracování signálu a použitá „kalibrace“. Příspěvek shrnuje aktuální možnosti nízkonákladových senzorových systémů a zaměřuje se především na praktické zkušenosti s jejich nasazením a dlouhodobým provozem. Diskutovány budou požadavky na výběr vhodné lokality, instalaci, napájení a datovou komunikaci, stejně jako problematika údržby, kontroly funkčnosti, kalibrace a návaznosti na referenční měření. Pozornost bude věnována rovněž stárnutí senzorů, kusovým rozdílům, vlivu teploty a relativní vlhkosti a metodám kontroly a validace naměřených dat.

Samostatným tématem bude interpretace výsledků a vymezení role senzorových systémů vůči standardním metodám monitoringu kvality ovzduší. Praktické zkušenosti ukazují, že nízkonákladové senzory nelze chápat jako univerzální náhradu referenčních či ekvivalentních měřicích metod. Při vhodném návrhu systému, správné kalibraci a zajištění odpovídající kontroly kvality však mohou představovat účinný nástroj pro doplnění stávajících monitorovacích sítí, identifikaci prostorových a časových změn znečištění i hodnocení lokálních zdrojů a dopadů realizovaných opatření.

Cílem příspěvku je ukázat nejen současný potenciál senzorového monitoringu, ale také technické a provozní podmínky, které je nutné splnit, aby výsledkem nebylo pouze velké množství dat, ale dlouhodobě použitelná a správně interpretovatelná informace o kvalitě ovzduší.

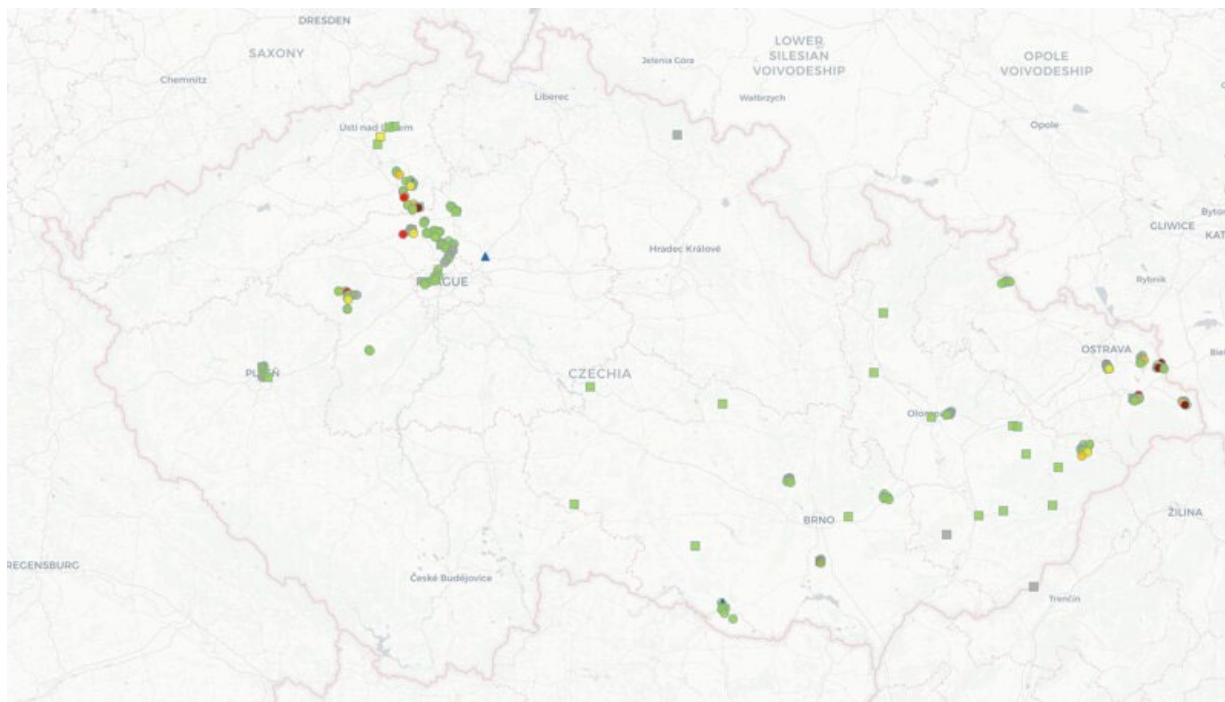
1. Role nízkonákladových senzorů v monitoringu kvality ovzduší

Monitoring kvality venkovního ovzduší je tradičně založen především na stacionárních měřicích stanicích vybavených referenčními nebo ekvivalentními analyzátory. Tyto systémy poskytují data s vysokou úrovní přesnosti, dlouhodobé stability a metrologické návaznosti a tvoří základ národních monitorovacích sítí i hodnocení plnění legislativních požadavků. Jejich nevýhodou jsou však relativně vysoké investiční a provozní náklady a s tím související omezený počet měřicích lokalit.

Kvalita ovzduší přitom může vykazovat značnou prostorovou variabilitu. To se týká zejména městského prostředí, kde se na relativně malém území mohou výrazně měnit

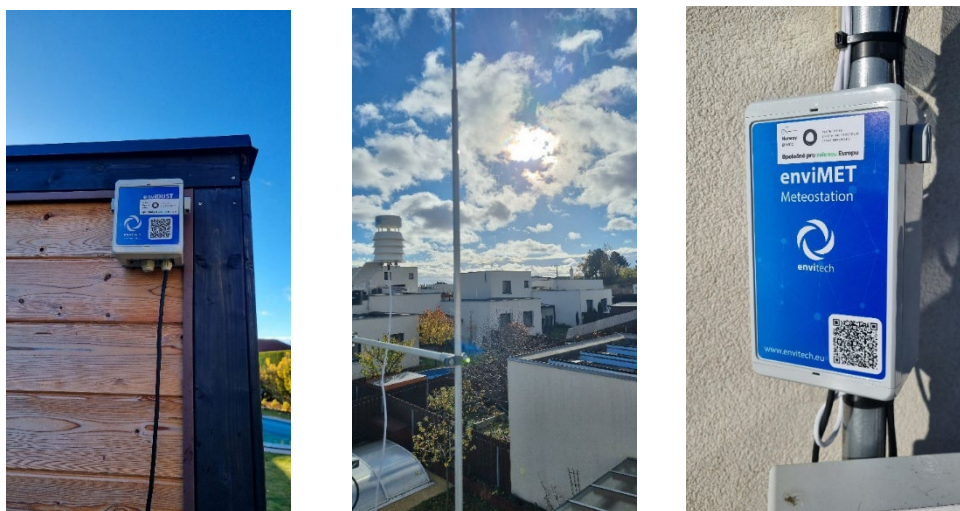
podmínky ovlivněné intenzitou dopravy, lokálními topeništi, průmyslovými zdroji, charakterem zástavby nebo místními meteorologickými podmínkami. Jedna referenční stanice proto poskytuje velmi kvalitní informaci o konkrétní lokalitě, nemusí však být schopna dostatečně popsat prostorové rozložení znečištění na větším nebo členitém území.

Obr. 1: Ukázka webového portálu smartENVI



Právě zde vzniká prostor pro využití nízkonákladových senzorových systémů. Pokles cen senzorických prvků, rozvoj elektroniky, datové komunikace a cloudového zpracování dat umožnil v posledních letech vznik kompaktních měřicích zařízení, která lze instalovat ve výrazně větším počtu než klasické automatizované monitorovací stanice. Je tak možné vytvořit hustou síť měřicích bodů a získat podrobnější informaci o prostorovém i časovém vývoji kvality ovzduší.

Obr. 2: Prachoměrná jednotka enviDUST (vlevo), meteostanice enviMET



Pojem „nízkonákladový senzor“ je přitom nutné používat s určitou opatrností. Na trhu existuje velmi široké spektrum zařízení – od jednoduchých senzorických modulů a spotřebitelských zařízení až po profesionální měřicí systémy určené pro dlouhodobý venkovní provoz. Jednotlivá řešení se významně liší nejen cenou, ale především konstrukcí, stabilitou měření, způsobem kalibrace, možnostmi diagnostiky a kvalitou výsledných dat. Samotná přítomnost stejného nebo podobného senzorického prvku proto neznamena, že různá zařízení budou za reálných podmínek poskytovat srovnatelné výsledky.

V současnosti jsou senzorové systémy nejčastěji využívány pro měření koncentrací suspendovaných částic PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_{10} . Rozšiřuje se rovněž jejich použití pro sledování plyných látek, zejména NO_2 , O_3 a CO , případně dalších parametrů souvisejících s kvalitou ovzduší. Součástí systémů bývá také měření teploty a relativní vlhkosti, případně dalších meteorologických veličin, které mohou sloužit nejen k popisu místních podmínek, ale také ke korekci odezvy samotných senzorů.

Zásadní je však správně vymezit účel takového měření. Senzorový monitoring nelze obecně považovat za přímou náhradu referenčních metod používaných pro legislativní hodnocení kvality ovzduší. Jeho význam spočívá především v doplnění standardního monitoringu o informace, které by vzhledem k ekonomickým a technickým omezením nebylo možné získat prostřednictvím husté sítě referenčních stanic.

Typickým příkladem je mapování prostorového rozložení koncentrací v rámci města nebo regionu, identifikace míst se zvýšenou úrovní znečištění, sledování dopravně zatížených komunikací, průmyslových areálů nebo oblastí s významným podílem lokálního vytápění. Senzorové sítě lze využít také pro sledování změn před a po realizaci konkrétního opatření, pro orientační identifikaci krátkodobých epizod nebo jako podklad pro rozhodnutí, kde má smysl provést následné přesnější měření.

Výhodou nízkonákladového monitoringu tedy není primárně dosažení stejné kvality jednotlivého měření jako u referenčního analyzátoru. Jeho přínos spočívá v jiném poměru mezi kvalitou jednotlivého měřicího bodu, jejich počtem, prostorovým pokrytím a celkovými náklady systému. Vhodně navržená senzorová síť může například místo několika velmi přesných bodů nabídnout desítky až stovky měřicích míst a umožnit sledovat jevy, které by v řidší síti zůstaly nezachyceny.

Moderní senzorové technologie již umožňují získávat velmi zajímavá data o kvalitě ovzduší, jejich skutečná vypovídací hodnota je však podmíněna správnou instalací, vhodnou kalibrací, průběžnou kontrolou funkčnosti a správnou interpretací výsledků. Nízkonákladový monitoring proto není pouze otázkou výběru vhodného senzoru, ale návrhu a provozu celého měřicího systému.

1.2. Souměření s referenční či ekvivalentní technikou

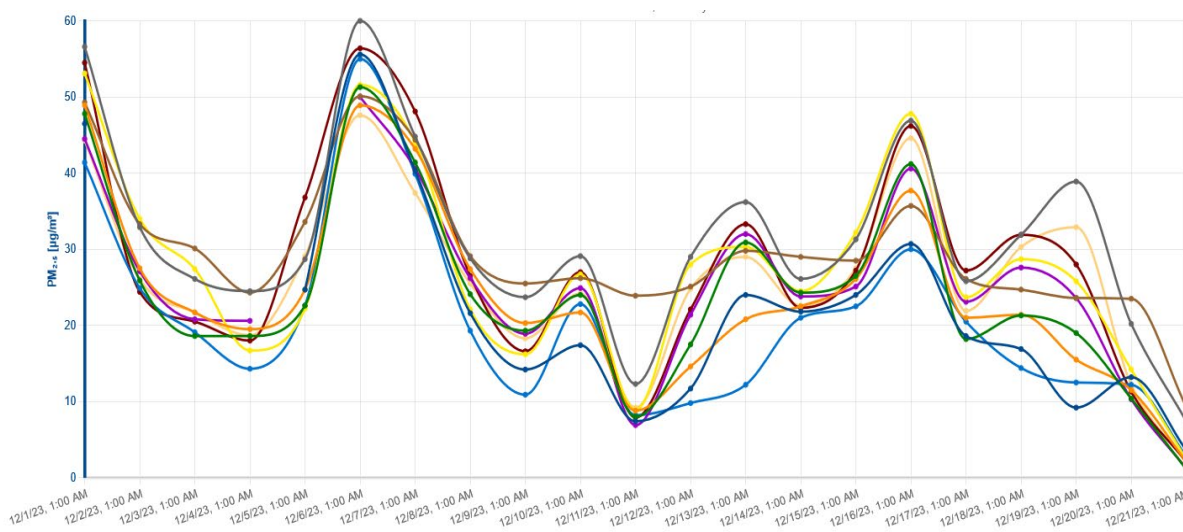
Jedním ze základních předpokladů kvalitního využití nízkonákladových senzorů je ověření jejich odezvy vůči referenční či ekvivalentní měřicí technice. V praxi se proto senzorové jednotky před nasazením umisťují do blízkosti standardního analyzátoru a po určitou dobu jsou oba systémy provozovány paralelně.

Obr. 3: Souměření senzorických jednotek na stanici AIM Těšnovice



Souměření umožňuje posoudit systematickou odchylku, linearitu a rozptyl výsledků a současně určit vliv okolních podmínek. Významné jsou zejména teplota a relativní vlhkost, ale také charakter měřeného znečištění. U optických senzorů PM může výsledek ovlivňovat velikostní rozdělení, složení a hygroscopické vlastnosti aerosolu, zatímco u elektrochemických senzorů plyných látek hrají významnou roli křížové citlivosti a změny nulové odezvy.

Obr. 4: Příklad srovnání trendů naměřených senzorovými jednotkami a zařízením Palas Fidas 200 v rámci sítě v Rožnově pod Radhoštěm



Délka souměření by měla být dostatečná k zachycení reprezentativního rozsahu koncentrací a meteorologických podmínek. Krátkodobé porovnání v délce několika dnů může ověřit základní funkčnost, pro vytvoření spolehlivé korekce je však vhodné souměření v délce několika týdnů. Důležité je především to, aby podmínky během souměření odpovídaly podmínkám následného provozu.

Na základě získaných dat lze vytvořit korekční vztah mezi odezvou senzoru a referenčním měřením. V nejjednodušším případě postačuje lineární korekce, v dalších případech mohou do modelu vstupovat například teplota a relativní vlhkost. Příliš komplexní model však může být dobře přizpůsoben konkrétnímu souměření, ale méně spolehlivý při použití v jiné lokalitě nebo ročním období.

U větších sítí je souměření současně vhodným nástrojem pro kontrolu kusových rozdílů mezi jednotlivými jednotkami a identifikaci zařízení s nestandardní odezvou ještě před jejich instalací.

Souměření by přitom nemělo být chápáno pouze jako jednorázová kalibrace před uvedením systému do provozu. Sensory v průběhu času stárnou a jejich odezva se může měnit. Vhodnou součástí systému zajištění kvality je proto periodické opakování souměření vybraných jednotek nebo trvalý provoz kontrolní jednotky na referenční lokalitě.

Cílem souměření není prokázat, že nízkonákladový senzor nahrazuje referenční analyzátor, ale stanovit jeho skutečné vlastnosti, případné korekce a především omezení, se kterými je nutné při interpretaci získaných dat počítat.

1.3. Možnosti zapojení do systému iSMOK

Projekt iSMOK – Integrovaný Sensorový Monitoring Ovzduší a jeho Kvality vzniká ve spolupráci VŠB – Technické univerzity Ostrava, Českého hydrometeorologického ústavu a společnosti ENVltech Bohemia s.r.o. Jeho cílem je vytvořit metodický a technický rámec pro využívání senzorů při sledování kvality ovzduší. Aplikačním garantem projektu je Ministerstvo životního prostředí.

Systém iSMOK nemá nahrazovat státní síť imisního monitoringu ani referenční měření. Jeho úlohou je vytvořit prostředí pro využití sensorových systémů jako doplňkového zdroje informací a současně nastavit pravidla zajišťující potřebnou kvalitu a důvěryhodnost získávaných dat.

Provozovatelé sensorových sítí budou mít možnost připojit kompatibilní zařízení do společného systému. Podmínkou bude splnění definovaných technických a kvalitativních požadavků a zajištění přenosu dat v požadovaném formátu. Součástí systému bude evidence senzorů, jejich provozní historie a informace o provedených validacích a korekcích.

Obr. 5: Projekt iSMOK



iSMOK bude zajišťovat také automatizovanou kontrolu kvality dat a umožní identifikovat nestandardní chování jednotlivých zařízení. Uživatelům následně nabídne společné prostředí pro zobrazení výsledků v mapách, grafech a tabulkách a jejich základní interpretaci.

Zapojení do iSMOK tak umožní spojit výhody prostorově hustého a ekonomicky dostupného sensorového monitoringu s jednotnými pravidly pro kontrolu kvality, správu a interpretaci dat.

Literatura

- [1] ČHMÚ; SZÚ. Doporučení pro nakládání s nízkonákladovými senzory pro monitoring znečištění venkovního ovzduší. Projekt ARAMIS, 2024/2025.
- [2] BAUEROVÁ, P.; KEDER, J. Testování malých senzorů pro měření kvality ovzduší. Český hydrometeorologický ústav, Observatoř Tušimice.

Poděkování

Projekt Integrovaný senzorový monitoring ovzduší a jeho kvality (SQ01010061) je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Prostředí pro život 2.

Air Quality Monitoring Using Low-Cost Sensors – Current Capabilities and Operational Requirements

Pavel Chaloupecký, Ondřej Svačina

ENVltech Bohemia s.r.o.

Ovocná 1021/34, 16100 Praha 6

e-mail: chaloupecky@envitech-bohemia.cz

Abstrakt

In recent years, low-cost sensor systems for air quality monitoring have undergone significant development. Their main advantage lies in the possibility of creating spatially dense monitoring networks, identifying local variations in pollution levels, and obtaining data with high temporal resolution at substantially lower investment and operating costs compared to reference or equivalent measurement methods.

Current sensor systems are capable of monitoring primarily particulate matter concentrations (PM_1 , $PM_{2.5}$ and PM_{10}), as well as selected gaseous pollutants such as NO_2 , O_3 , CO and volatile organic compounds. In addition to the sensors themselves, the resulting data quality is strongly influenced by the design of the monitoring system, sampling method, compensation for meteorological effects, signal processing and the applied “calibration”.

This paper provides an overview of the current capabilities of low-cost sensor systems, with particular emphasis on practical experience with their deployment and long-term operation. Requirements related to site selection, installation, power supply and data communication are discussed, together with issues concerning maintenance, performance checks, calibration and comparison with reference measurements. Attention is also given to sensor ageing, unit-to-unit variability, the effects of temperature and relative humidity, and methods for quality control and validation of measured data.

A separate focus is placed on the interpretation of results and on defining the role of sensor systems in relation to standard air quality monitoring methods. Practical experience shows that low-cost sensors cannot be regarded as a universal replacement for reference or equivalent measurement methods. However, when properly designed and calibrated and supported by appropriate quality control procedures, they can provide an effective tool for complementing existing monitoring networks, identifying spatial and temporal variations in air pollution, and assessing local pollution sources and the impacts of implemented measures.

The aim of this paper is to demonstrate not only the current potential of sensor-based monitoring, but also the technical and operational requirements that must be met to ensure that the outcome is not merely a large volume of data, but reliable, long-term and correctly interpretable information on air quality.

Celoměstská senzorová síť v Brně pro modelování kvality ovzduší a zpřesnění odhadu expozice a zdravotních rizik

Ondřej Mikeš, Simona Šatková

RECETOX, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita

Kamenice 753/5, 625 00 Brno

e-mail: ondrej.mikes@recetox.muni.cz

Rozšířený abstrakt

Znečištění ovzduší představuje jeden z nejvýznamnějších environmentálních rizikových faktorů ovlivňujících zdraví obyvatel měst. Přestože jsou běžně dostupná data z referenčních monitorovacích stanic, jejich prostorová hustota často neumožňuje zachytit vysokou variabilitu koncentrací znečišťujících látek v městském prostředí. Současný rozvoj nízkonákladových senzorových technologií otevírá nové možnosti pro detailnější monitoring kvality ovzduší a následné využití dat v pokročilých modelech městského prostředí.

Navrhovaná aktivita navazuje na zkušenosti získané v předchozích výzkumných projektech ICARUS, AIRSens a CLAiMOn, které se zaměřovaly na monitoring kvality ovzduší, osobní expozice a využití moderních datových přístupů pro podporu rozhodování v oblasti veřejného zdraví. Na základě těchto zkušeností vznikla iniciativa vybudovat rozsáhlou síť autonomních nízkonákladových senzorů na území města Brna s cílem vytvořit unikátní datovou základnu pro modelování kvality ovzduší ve vysokém prostorovém a časovém rozlišení.

V rámci mezinárodního projektu DTRIP4H (No. 101188432) byla ve spolupráci s technologickou společností Baghirra navržena a vyrobena nová autonomní měřicí zařízení určená pro dlouhodobý provoz v městském prostředí. Zařízení jsou koncipována pro instalaci na prvky městského mobiliáře, zejména veřejné osvětlení, což umožňuje efektivní rozmístění v různých částech města bez nutnosti budování nové infrastruktury. Primárně jsou senzory zaměřeny na měření koncentrací suspendovaných částic (PM), přičemž do budoucna se počítá také s rozšířením monitoringu o oxid dusičitý (NO₂) a další relevantní polutanty.

Výběr lokalit probíhal ve spolupráci s Magistrátem města Brna, Technologickými sítěmi Brno (TSB) a studenty zapojenými do projektu. Při návrhu rozmístění byly zohledněny požadavky na reprezentativní pokrytí celého města, dostatečně otevřený charakter lokalit, vzájemné rozestupy jednotlivých senzorů a zároveň specifické zaměření na prostředí mateřských a základních škol. V současné době je v provozu 30 senzorových jednotek, konečný počet bude dosahovat 35 lokalit rozmístěných napříč městem. Data jsou automaticky přenášena na centrální server v desetiminutovém intervalu a vytvářejí tak kontinuální datový tok umožňující sledování krátkodobé i dlouhodobé variability koncentrací.

Zásadní součástí projektu je zajištění kvality naměřených dat. Každý senzor byl před nasazením do terénu podroben minimálně čtyřicetidenní kolokaci s profesionálním zařízením, což umožnilo vyhodnotit vlastnosti jednotlivých jednotek, provést kalibrace a posoudit jejich vhodnost pro dlouhodobý monitoring. Tento postup má klíčový význam pro následné využití dat v pokročilých modelovacích přístupech.

Budovaná síť představuje jeden ze základních stavebních kamenů připravovaného digitálního dvojčete města Brna se zaměřením na kvalitu ovzduší a environmentální zdraví. Data ze senzorů budou propojována s řadou dalších zdrojů informací, včetně meteorologických dat, údajů o dopravě, charakteristik zástavby, urbanistických ukazatelů, satelitních dat a dalších prostorových vrstev. Na těchto datech jsou již nyní trénovány modely strojového učení, které budou dále rozvíjeny a validovány s využitím nově získaných měření. Hlavním cílem je dosažení co nejvyšší přesnosti predikce koncentrací znečišťujících látek a vytvoření map kvality ovzduší v prostorovém rozlišení řádově jednotek metrů.

Výstupy budou zpřístupněny prostřednictvím připravovaného webového dashboardu umožňujícího interaktivní vizualizaci aktuálního stavu i modelovaných scénářů. Současně vzniká inovativní forma prezentace výsledků pomocí rozšířené reality, která uživatelům umožní intuitivně zobrazovat modelované koncentrace přímo v prostoru města a lépe porozumět prostorovému šíření znečištění ovzduší.

Očekáváme, že vznikající monitorovací síť a navazující modelové nástroje významně přispějí k lepšímu pochopení prostorové variability znečištění ovzduší v urbánním prostředí, identifikaci lokálních hotspotů a zranitelných lokalit, zejména v okolí škol a dalších citlivých míst. Projekt současně demonstruje potenciál nízkonákladových senzorových technologií pro podporu datově založeného rozhodování městské samosprávy a představuje důležitý krok směrem k vytvoření komplexního digitálního dvojčete města, které bude v budoucnu sloužit také pro simulace dopadů urbanistických a dopravních opatření na kvalitu ovzduší a zdraví obyvatel.

A city-wide sensor network in Brno for modelling air quality and refining estimates of exposure and health risks

Ondřej Mikeš, Simona Šatková

RECETOX, Faculty of Science, Masaryk University

Kamenice 753/5, 602 00 Brno

e-mail: ondrej.mikes@recetox.muni.cz

Extended abstract

Air pollution is one of the most significant environmental risk factors affecting the health of urban populations. Although data from reference monitoring stations are readily available, their spatial density often fails to capture the high variability in pollutant concentrations within the urban environment. Current developments in low-cost sensor technologies are opening up new possibilities for more detailed air quality monitoring and the subsequent use of data in advanced urban environment models.

The proposed activity builds on the experience gained in the previous research projects ICARUS, AIRSens and CLAiMOn, which focused on air quality monitoring, personal exposure and the use of modern data approaches to support decision-making in the field of public health. Building on this experience, an initiative was launched to establish an extensive network of autonomous, low-cost sensors across the city of Brno, with the aim of creating a unique dataset for modelling air quality at high spatial and temporal resolution.

As part of the international DTRIP4H project (No. 101188432), new autonomous measuring devices designed for long-term operation in an urban environment were designed and manufactured in collaboration with the technology company Baghirra. The devices are designed for installation on street furniture, particularly street lighting, which allows for efficient deployment in various parts of the city without the need to build new infrastructure. The sensors are primarily focused on measuring concentrations of particulate matter (PM), whilst there are also plans to extend monitoring to include nitrogen dioxide (NO₂) and other relevant pollutants in the future.

The selection of locations took place in collaboration with Brno City Council, Technologické síť Brno (TSB) and students involved in the project. When designing the deployment, consideration was given to the requirements for representative coverage of the entire city, sufficiently open locations, the spacing between individual sensors, and a specific focus on the surroundings of nursery and primary schools. There are currently 30 sensor units in operation; the final number will reach 35 sites spread across the city. Data is automatically transmitted to a central server at ten-minute intervals, thus creating a continuous data stream that enables the monitoring of both short-term and long-term variations in concentrations.

A crucial part of the project is ensuring the quality of the measured data. Before being deployed in the field, each sensor underwent at least forty days of co-location with professional equipment, which made it possible to evaluate the characteristics of individual units, carry out calibrations and assess their suitability for long-term monitoring. This procedure is of key importance for the subsequent use of the data in advanced modelling approaches.

The network currently under development represents one of the cornerstones of the planned digital twin of the city of Brno, with a focus on air quality and environmental health. Data from the sensors will be linked to a range of other information sources, including meteorological data, transport data, building characteristics, urban planning indicators, satellite data and other spatial layers. Machine learning models are already being trained on this data and will be further developed and validated using newly acquired measurements. The main objective is to achieve the highest possible accuracy in predicting pollutant concentrations and to create air quality maps with a spatial resolution of the order of metres.

The outputs will be made available via a web dashboard currently under development, enabling interactive visualisation of both the current situation and modelled scenarios. At the same time,

an innovative form of presenting results using augmented reality is being developed, which will allow users to intuitively visualise modelled concentrations directly within the city and better understand the spatial distribution of air pollution.

We expect that the emerging monitoring network and associated modelling tools will contribute significantly to a better understanding of the spatial variability of air pollution in urban environments, and to the identification of local hotspots and vulnerable areas, particularly in the vicinity of schools and other sensitive locations. At the same time, the project demonstrates the potential of low-cost sensor technologies to support data-driven decision-making by local authorities and represents an important step towards creating a comprehensive digital twin of the city, which will also be used in future to simulate the impacts of urban planning and transport measures on air quality and public health.

Časopriestorová variabilita PM_{2,5} a PM₁₀ v Žiline: koncentrácie, prvkové zloženie a hodnotenie senzorovej siete

Dušan Jandačka, Michal Cingel, Kristína Jastrabanová

Katedra cestného a environmentálneho inžinierstva, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovensko

e-mail: dusan.jandacka@uniza.sk

Abstrakt

Cieľom práce bolo zhodnotiť časopriestorovú variabilitu hmotnostných koncentrácií a prvkového zloženia PM_{2,5} a PM₁₀ v Žiline kombináciou gravimetrického odberu, EDXRF analýzy a údajov zo siete ôsmich optických senzorov. Porovnávacie 24-hodinové merania sa uskutočnili na štyroch lokalitách počas letného a zimného obdobia. Gravimetrické výsledky preukázali významné lokálne a sezónne rozdiely, pričom zimné zvýšenie koncentrácií sa prejavilo na troch zo štyroch sledovaných lokalít. Prvkové zloženie PM_{2,5} bolo charakterizované vysokým zastúpením síry, zatiaľ čo v letných vzorkách PM₁₀ boli výraznejšie zastúpené minerálne prvky Ca, Si a Fe. V zimnom období sa zvýšil obsah K, Cl a ďalších prvkov spájaných so spaľovacími procesmi a zimnou údržbou ciest. Dlhodobé senzorové údaje za roky 2023–2025 potvrdili výrazný sezónny cyklus a umožnili identifikovať spoločné epizódy zvýšených koncentrácií na území mesta. Porovnanie s gravimetrickou metódou však ukázalo systematické letné podhodnotenie a mierne zimné nadhodnotenie senzorových koncentrácií. V lete senzory zachytili priemerne iba približne 21 % gravimetricky stanovenej hrubej frakcie PM_{2,5-10}. Výsledky tiež potvrdzujú, že senzorové siete môžu vhodne dopĺňať konvenčný monitoring pri hodnotení časových zmien a priestorových rozdielov, ich údaje však vyžadujú lokálnu a sezónne diferencovanú validáciu.

Kľúčové slová: PM_{2,5}; PM₁₀; časopriestorová variabilita; prvkové zloženie; senzorová sieť; gravimetrická metóda; EDXRF.

1. Úvod

Suspendované častice PM patria medzi najvýznamnejšie znečisťujúce látky vo vonkajšom ovzduší. Expozícia PM_{2,5} a PM₁₀ je spojená s nepriaznivými respiračnými a kardiovaskulárnymi účinkami a so zvýšenou predčasnou úmrtnosťou [1]. Význam tejto problematiky potvrdzujú sprísnené odporúčania Svetovej zdravotníckej organizácie z roku 2021 aj smernica Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2024/2881, ktorá približuje európske normy kvality ovzdušia odporúčaniam WHO [1, 2].

Koncentrácie PM v mestskom prostredí vykazujú výraznú časovú a priestorovú variabilitu. Ovplyvňuje ich rozmiestnenie emisných zdrojov, intenzita dopravy, vykurovanie, priemyselné činnosti, resuspenzia pôdneho a cestného prachu, sekundárna tvorba aerosólu a aktuálne meteorologické podmienky. Samotná hmotnostná koncentrácia preto neposkytuje úplnú informáciu o pôvode a vlastnostiach častíc. Dôležitým doplňujúcim ukazovateľom je ich veľkostné a chemické zloženie, ktoré umožňuje rozlíšiť častice minerálneho pôvodu, produkty spaľovacích procesov, sekundárny aerosól a častice súvisiace s dopravou alebo lokálnym vykurovaním.

Predchádzajúce merania v Žiline preukázali rozdiely v koncentráciách a prvkovom zložení PM medzi lokalitami, veľkostnými frakciami a ročnými obdobiami [3, 4]. Hrubá frakcia PM_{2,5-10} bola charakterizovaná najmä minerálnymi prvkami, ako sú Al, Si, Ca a Fe, zatiaľ čo v jemnejších časticiach sa výraznejšie prejavovali prvky spojené so spaľovacími procesmi a sekundárnou tvorbou aerosólu [3, 4]. Tieto výsledky poukazujú na potrebu súčasného hodnotenia koncentrácií, veľkostných frakcií a chemického zloženia PM v dostatočnom časovom a priestorovom rozlíšení.

Referenčné a ekvivalentné metódy poskytujú údaje s požadovanou presnosťou, ich investičná a prevádzková náročnosť však obmedzuje počet monitorovacích miest. Sieť nízkonákladových optických senzorov môžu zvýšiť priestorové pokrytie a umožniť dlhodobé sledovanie časového vývoja a spoločných epizód znečistenia [5, 6]. Ich údaje však nemožno bez overenia považovať za rovnocenné s referenčnými meraniami. Odozva optických senzorov závisí od veľkostného rozdelenia, tvaru, hustoty a optických vlastností častíc, ako aj od relatívnej vlhkosti a použitej kalibrácie [5–7]. Zvýšená neistota sa môže prejaviť najmä pri PM₁₀ a hrubej frakcii PM_{2,5-10} [7].

Cieľom práce bolo zhodnotiť časopriestorovú variabilitu hmotnostných koncentrácií a prvkového zloženia PM_{2,5} a PM₁₀ v Žiline kombináciou gravimetrického odberu, EDXRF analýzy a údajov zo siete ôsmich senzorových staníc. Súčasťou práce bolo porovnanie letného a zimného obdobia a identifikovanie rozdielov medzi vybranými mestskými a prímestskými lokalitami. Doplňujúcim cieľom bolo overiť kvalitu senzorových údajov porovnaním s gravimetrickou metódou a exploratívne posúdiť, či ich odchýlky súvisia so zastúpením hrubej frakcie a prvkovým zložením aerosólu.

2. Materiál a metódy

2.1. Meracie lokality a organizácia meraní

Monitoring tuhých častíc sa uskutočnil v meste Žilina, kde je prevádzkovaná sieť ôsmich nízkonákladových senzorových staníc AG Smart. Stanice sú umiestnené v lokalitách s rozdielnym charakterom zástavby a predpokladaným vplyvom zdrojov znečistenia, od centrálnej mestskej oblasti a dopravne zaťažených ciest až po sídliskové a prímestské obytné zóny.

Porovnávacie merania senzorov s referenčnou gravimetrickou metódou boli realizované na štyroch stanovištiach: AG1 Staré mesto – Kuzmányho, AG6 Hájik, AG7 Brodno a AG8 Žilinská Lehota. Staré mesto reprezentovalo centrálnu mestskú lokalitu, Hájik sídliskovú zástavbu bez priameho vplyvu významného dopravného koridoru a Brodno a Žilinská Lehota prímestské obytné zóny s individuálnym vykurovaním.

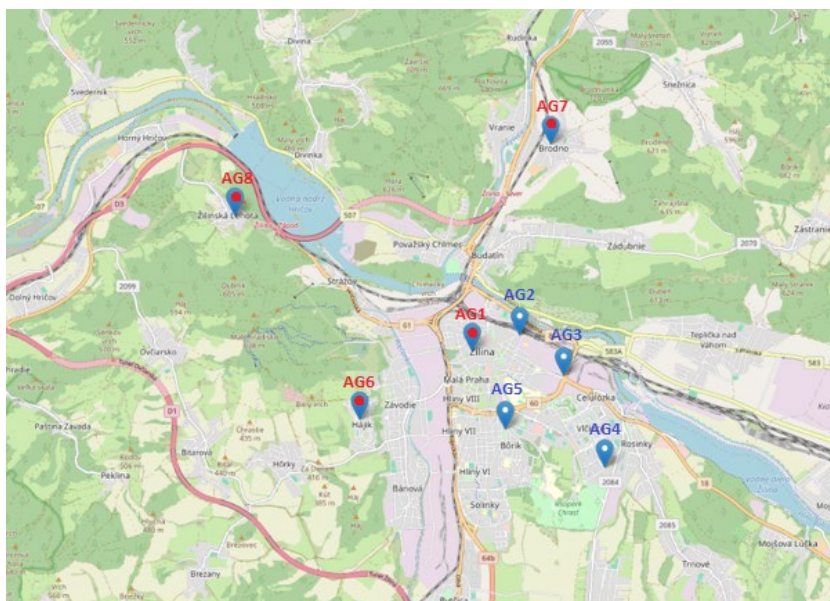
Merania sa uskutočnili počas letného obdobia 2023 a vykurovacieho obdobia 2024/2025. Na každom stanovišti prebiehal súbežný odber frakcií PM_{2,5} a PM₁₀ počas 14 dní v každom období. Termíny jednotlivých kampaní sú uvedené v tab. 1.

Celkovo bolo získaných 112 párových 24-hodinových odberov frakcií PM_{2,5} a PM₁₀, teda 224 exponovaných filtrov určených na gravimetrické a prvkové stanovenie. Rozmiestnenie všetkých ôsmich senzorových staníc a štyroch lokalít porovnávacích meraní je uvedené na obr. 1.

Tab. 1. Termíny porovnávacích meraní

Stanovište	Charakter lokality	Letné obdobie	Zimné obdobie
AG7 Brodno	prímestská obytná zóna, individuálne vykurovanie	25. 5. – 7. 6. 2023	25. 10. – 7. 11. 2024
AG6 Hájik	sídľisková zástavba, centrálné zásobovanie teplom	9. 6. – 22. 6. 2023	2. 12. – 17. 12. 2024
AG8 Žilinská Lehota	prímestská obytná zóna, individuálne vykurovanie	24. 6. – 8. 7. 2023	15. 1. – 28. 1. 2025
AG1 Staré mesto	centrálna mestská zóna	11. 7. – 24. 7. 2023	3. 2. – 16. 2. 2025

Obr. 1. Rozmiestnenie senzorových staníc v meste Žilina.



Pozn.: Červenou farbou sú označené stanice, na ktorých sa uskutočnili porovnávacie gravimetrické merania. Mapový podklad: © OpenStreetMap contributors; spracovanie autorov.

2.2. Meranie koncentrácií PM

Senzorové stanice AG Smart využívajú na meranie PM optický princíp založený na rozptyle svetla časticami prechádzajúcimi meracou komorou. Stanice zaznamenávali koncentrácie $PM_{2,5}$ a PM_{10} a vybrané meteorologické veličiny. Základným časovým rozlíšením spracovaných údajov boli hodinové priemery.

Referenčné merania koncentrácií $PM_{2,5}$ a PM_{10} sa uskutočnili gravimetrickou metódou podľa STN EN 12341 pomocou nízkoobjemových vzorkovačov Leckel LVS3. Častice boli počas 24-hodinových odberov zachytávané na nitrocelulóзовé filtre. Filtre boli pred odberom a po odbere kondicionované a vážené na mikrováhach. Výsledné koncentrácie boli vyjadrené v $\mu g \cdot m^{-3}$.

Na porovnanie so 24-hodinovými gravimetrickými odbermi boli hodinové senzorové údaje agregované v intervaloch od 10:00 daného dňa do 10:00 nasledujúceho dňa. Do dlhodobej analýzy boli zaradené iba intervaly s najmenej 18 platnými hodinovými hodnotami.

2.3. Analýza prvkového zloženia

Prvkové zloženie častíc zachytených na filtroch bolo analyzované energeticky disperznou röntgenovou fluorescenčnou spektrometriou (EDXRF). Ide o nedeštruktívnu metódu umožňujúcu následnú analýzu rovnakého filtra bez jeho chemickej úpravy. Merania prebiehali vo vákuu, čím sa obmedzila absorpcia nízkoenergetického fluorescenčného žiarenia a zlepšila detekcia ľahších prvkov.

V jednotlivých vzorkách boli vyhodnotené najmä signály S, Ca, K, Fe, Cl, Zn, P, Na, Mg, Si, Al, Ti, Mn, Cu a Ba. Obsah prvkov v zachytených časticiach bol vyjadrený v $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

Na doplnujúce hodnotenie zloženia aerosólu boli vytvorené dva indikatívne súčtové ukazovatele. Minerálny index bol definovaný ako súčet obsahov Ca, Si, Fe, Al a Ti. Index prvkov spájaných prevažne s jemnejšou spaľovacou a sekundárnou zložkou aerosólu bol vypočítaný ako súčet S, K, Cl, P a Zn. Tieto indexy boli použité iba na exploratívne porovnanie a nepredstavujú kvantitatívne určenie príspevkov jednotlivých zdrojov.

2.4. Spracovanie a štatistické vyhodnotenie údajov

Zhoda senzorových a gravimetrických meraní bola hodnotená samostatne pre $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} , jednotlivé lokality a ročné obdobia. Použitá bola lineárna regresná analýza a koeficient determinácie R^2 . Systematická odchýlka senzorov bola vyjadrená normalizovanou priemernou odchýlkou:

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{sen,i} - C_{ref,i})}{\sum_{i=1}^n C_{ref,i}} \times 100 \quad (1)$$

kde $C_{sen,i}$ a $C_{ref,i}$ predstavujú senzorovú a gravimetrickú koncentráciu v príslušnom 24-hodinovom intervale.

Koncentrácia hrubej frakcie $\text{PM}_{2,5-10}$ bola pre obe metódy stanovená ako rozdiel medzi frakciou PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$. Jej relatívne zastúpenie v PM_{10} bolo vypočítané ako:

$$f_{coarse} = \frac{PM_{10} - PM_{2,5}}{PM_{10}} \times 100 \quad (2)$$

Vzťah medzi zastúpením hrubej frakcie a chybou senzorového merania PM_{10} bol hodnotený Spearmanovým poradovým korelačným koeficientom. Relatívna odozva senzora bola definovaná pomerom:

$$R_{PM10} = \frac{PM_{10,sen}}{PM_{10,ref}} \quad (3)$$

Jej vzťah k prvkovému zloženiu PM_{10} bol analyzovaný exploratívne. Na obmedzenie vplyvu systematických rozdielov medzi senzormi, lokalitami a obdobiami boli pred korelačnou analýzou hodnoty centrované voči priemeru príslušnej kombinácie lokalita $\times$ obdobie. Výsledky tejto analýzy boli interpretované ako asociácie, nie ako dôkaz kauzálneho vplyvu chemického zloženia na odozvu senzora.

Dlhodobá variabilita bola hodnotená z hodinových údajov všetkých ôsmich senzorových staníc za roky 2023–2025. Celkovo bolo spracovaných 206 861 hodinových záznamov. Vykurovacie obdobie bolo definované mesiacmi október až apríl a nevykurovacie obdobie mesiacmi máj až september. Vzhľadom na

krátkodobé extrémy a rozdielnu systematickú odozvu jednotlivých senzorov boli pri dlhodobom hodnotení uprednostnené mediány 24-hodinových a mesačných koncentrácií. Senzorové údaje boli použité najmä na hodnotenie časových trendov, sezónnych rozdielov a spoločných epizód zvýšených koncentrácií, nie na posudzovanie dodržiavania limitných hodnôt.

3. Výsledky a diskusia

3.1. Gravimetrické koncentrácie a sezónne rozdiely

Gravimetrické merania ukázali pomerne malé priestorové rozdiely koncentrácií počas letného obdobia. Priemerné koncentrácie $PM_{2,5}$ sa na jednotlivých stanovištiach pohybovali od 16,98 do 19,50 $\mu g \cdot m^{-3}$ a koncentrácie PM_{10} od 23,53 do 27,36 $\mu g \cdot m^{-3}$. Najvyššia priemerná koncentrácia $PM_{2,5}$ bola zaznamenaná na Hájiku, zatiaľ čo najvyššia koncentrácia PM_{10} bola zistená v Brodne.

Tab. 2. Priemerné gravimetricky stanovené koncentrácie počas porovnávacích meraní

Lokalita	$PM_{2,5}$ leto	PM_{10} leto	$PM_{2,5}$ zima	PM_{10} zima
AG1 Staré mesto	19,34	25,72	32,26	41,14
AG6 Hájik	19,50	26,46	14,43	15,52
AG7 Brodno	18,71	27,36	29,23	37,88
AG8 Žilinská Lehota	16,98	23,53	26,52	33,21

Pozn.: koncentrácie sú uvedené v $\mu g \cdot m^{-3}$.

V zimnom období boli priestorové rozdiely výraznejšie. Najvyššie priemerné koncentrácie oboch frakcií boli zaznamenané v Starom meste, nasledovali Brodno a Žilinská Lehota. V porovnaní s letným obdobím sa koncentrácia $PM_{2,5}$ zvýšila približne 1,7-násobne v Starom meste a 1,6-násobne v Brodne a Žilinskej Lehote. Podobný, hoci miernejší nárast bol zaznamenaný aj pri PM_{10} .

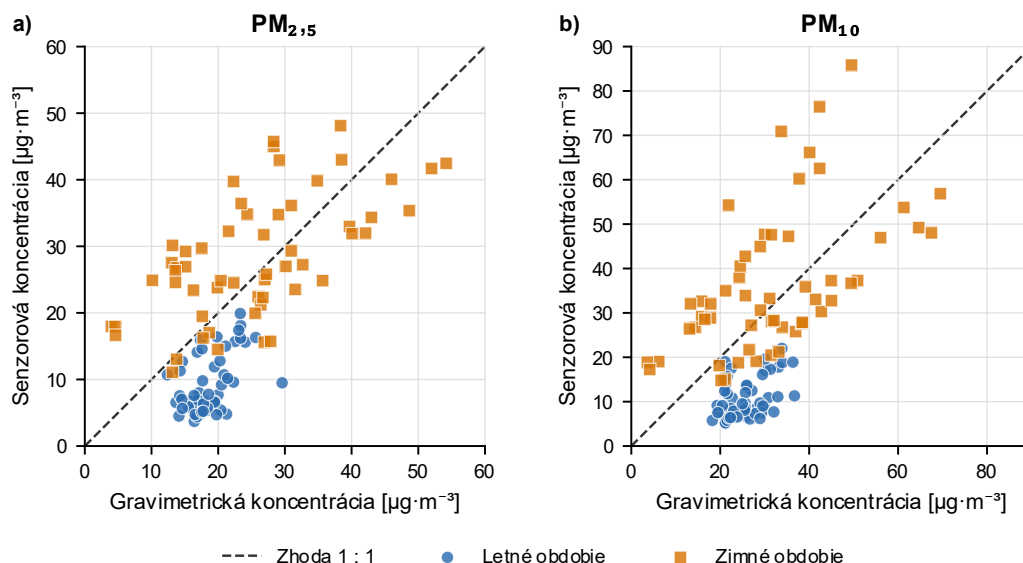
Odlišný priebeh sa prejavil na Hájiku, kde boli zimné gravimetrické koncentrácie nižšie než počas letného merania. Tento výsledok poukazuje na význam konkrétnych meteorologických podmienok počas krátkodobých meracích kampaní. Sezónne porovnanie preto nemožno interpretovať ako reprezentatívny rozdiel medzi dlhodobými letnými a zimnými priemermi.

Priemerná koncentrácia hrubej frakcie $PM_{2,5-10}$ sa počas leta pohybovala od 6,39 do 8,64 $\mu g \cdot m^{-3}$. Jej podiel na PM_{10} dosahoval približne 25–31 %. V zimnom období sa relatívny podiel hrubej frakcie znížil na všetkých lokalitách. Najvýraznejší pokles bol zaznamenaný na Hájiku, z 25,9 na 6,1 %. Výsledky tak naznačujú vyššie relatívne zastúpenie jemných častíc v zimnom aerosóle.

3.2. Porovnanie senzorových a gravimetrických meraní

Vzťah medzi 24-hodinovými koncentraciami stanovenými senzormi a gravimetrickou metódou je znázornený na obr. 2. Počas letného obdobia sa väčšina bodov nachádzala výrazne pod líniou zhody 1:1. Normalizovaná priemerná odchýlka dosiahla –50,9 % pre $PM_{2,5}$ a –58,6 % pre PM_{10} . Letné podhodnotenie bolo teda výraznejšie pri PM_{10} , čo naznačuje nedostatočné zachytenie hrubšej časti aerosólu optickými senzormi. Napriek podhodnoteniu bola na Hájiku zaznamenaná veľmi dobrá zhoda časovej variability $PM_{2,5}$ ($R^2 = 0,927$). Naopak, nízke hodnoty R^2 pre PM_{10} v Brodne a Žilinskej Lehote poukazujú na obmedzenú schopnosť senzorov zachytiť krátkodobé zmeny koncentrácie hrubšej časti aerosólu.

Obr. 2. Porovnanie 24-hodinových koncentrácií $PM_{2,5}$ (a) a PM_{10} (b) stanovených senzorovou a gravimetrickou metódou. Prerušovaná čiara predstavuje ideálnu zhodu 1:1.



Tab. 3. Porovnanie 24-hodinových koncentrácií zo senzorových a gravimetrických meraní

Lokalita	Obdobie	$PM_{2,5}$ S/G [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	NMB [%]	R^2	PM_{10} S/G [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	NMB [%]	R^2
AG7 Brodno	leto	8,81 / 18,71	-52,9	0,697	10,30 / 27,34	-62,3	0,263
AG6 Hájik	leto	15,27 / 19,51	-21,7	0,927	16,80 / 26,46	-36,5	0,737
AG8 Žilinská Lehota	leto	6,45 / 16,98	-62,0	0,678	7,99 / 23,53	-66,0	0,286
AG1 Staré mesto	leto	6,11 / 19,35	-68,4	0,759	7,75 / 25,73	-69,9	0,709
AG7 Brodno	zima	25,44 / 29,24	-13,0	0,926	29,01 / 37,88	-23,4	0,947
AG6 Hájik	zima	27,34 / 14,43	+89,5	0,971	29,85 / 15,52	+92,3	0,935
AG8 Žilinská Lehota	zima	35,66 / 26,52	+34,5	0,560	54,17 / 33,22	+63,1	0,673
AG1 Staré mesto	zima	24,98 / 32,26	-22,6	0,898	33,28 / 41,14	-19,1	0,888

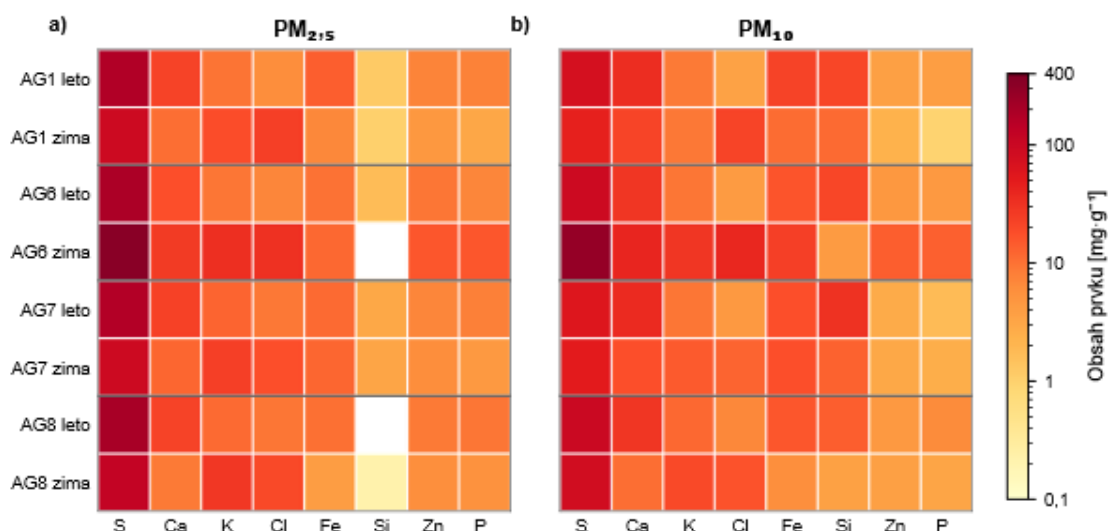
V zimnom období bola priemerná odozva senzorov vyššia. Pri spoločnom vyhodnotení všetkých lokalít dosiahla normalizovaná priemerná odchýlka +10,7 % pre $PM_{2,5}$ a +14,5 % pre PM_{10} . Za týmto celkovým výsledkom sa však skrývali výrazné rozdiely medzi jednotlivými stanicami. V Starom meste a Brodne senzory koncentrácie prevažne podhodnocovali, zatiaľ čo na Hájiku a najmä v Žilinskej Lehote dochádzalo k ich nadhodnoteniu (tab. 3).

Počas vykurovacieho obdobia bola zhoda časového priebehu vo väčšine prípadov výrazne lepšia. V Brodne, na Hájiku a v Starom meste dosahovalo R^2 hodnoty 0,888–0,971. Smer systematickej odchýlky však nebol jednotný. Kým v Brodne a Starom meste senzory koncentrácie podhodnocovali, na Hájiku ich nadhodnocovali približne o 90 %. V Žilinskej Lehote bolo nadhodnotenie výrazné najmä pri PM_{10} , kde dosiahlo 63,1 %.

3.3 Prvkové zloženie PM

Analýza EDXRF ukázala výrazné rozdiely v prvkovom zložení medzi frakciami $PM_{2,5}$ a PM_{10} , ako aj medzi letným a zimným obdobím. Výsledky na obr. 3 sú vyjadrené ako priemerný obsah prvku v zachytenej hmotnosti PM v $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$.

Obr. 3. Priemerný obsah vybraných prvkov vo frakciách $PM_{2,5}$ (a) a PM_{10} (b) na jednotlivých stanovištiach počas letného a zimného obdobia.



Pozn.: Farebná škála je logaritmická; biele polia označujú prvky, ktoré neboli v zdrojových výsledkoch kvantifikované.

Vo frakcii $PM_{2,5}$ dominovala počas oboch období síra. V letnom období sa jej priemerný obsah pohyboval od $166,02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ v Brodne po $198,51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ v Žilinskej Lehote. Ďalšími významnejšie zastúpenými prvkami boli Ca, K, Fe, Na, Cl, P a Zn. Vysoké zastúpenie síry v jemnej frakcii podporuje jej spojenie so sekundárnym anorganickým aerosólom a spaľovacími procesmi.

Zimné obdobie nebolo charakteristické rovnomerným zvýšením obsahu S na všetkých lokalitách. V Starom meste, Brodne a Žilinskej Lehote bol jej obsah nižší než počas letných meraní. Výrazné obohatenie bolo zaznamenané predovšetkým na Hájiku, kde sa obsah S zvýšil zo $185,76$ na $331,98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Súčasne sa zvýšil obsah K z $9,30$ na $32,32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ a Cl zo $7,16$ na $31,22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Hájik vykazoval aj najvyššie zimné hodnoty Zn, P a Na.

Na rozdiel od S sa zimné zvýšenie K a Cl prejavilo vo frakcii $PM_{2,5}$ na všetkých štyroch lokalitách. Obsah K bol oproti letu približne 1,9-násobný v Brodne a Starom meste, 2,4-násobný v Žilinskej Lehote a 3,5-násobný na Hájiku. Obsah Cl sa zvýšil približne dvojnásobne v Brodne a Žilinskej Lehote, takmer štvornásobne v Starom meste a viac než štvornásobne na Hájiku. Táto priestorovo rozsiahla zmena poukazuje na sezónny vplyv spaľovacích procesov. Pri Cl a Na mohla k zimnému zvýšeniu čiastočne prispievať aj údržba komunikácií.

Vo frakcii PM_{10} bolo počas leta výraznejšie zastúpenie prvkov spojených s minerálnym prachom a mechanicky generovanými časticami. Obsah Ca sa pohyboval od $28,63$ do $35,32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, Si od $13,68$ do $30,93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ a Fe od $15,20$ do $21,75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Najvyššie hodnoty Ca a Si boli zaznamenané v Brodne, zatiaľ čo najvyšší obsah Fe bol zistený v Starom meste. Spoločný výskyt Ca, Si, Fe, Al a Ti možno spájať najmä s pôdnym a cestným prachom, stavebnými materiálmi a resuspenziou počas suchého počasia. Časť Fe a ďalších kovov môže pochádzať aj z necestných emisií dopravy.

Výrazné zimné obohatenie aerosólu na Hájiku nemožno automaticky interpretovať ako pôsobenie lokálneho zdroja priamo na meracom stanovišti. Lokalita je napojená prevažne na centrálnu zásobovanie teplom. Do úvahy preto prichádza transport emisií z okolitých oblastí s individuálnym vykurovaním a ich akumulácia

počas nepriaznivých rozptylových podmienok. Vysoký obsah prvků v $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ navyše znamená obohatenie zachytených častíc, nie nevyhnutne najvyššiu koncentráciu daného prvku vo vonkajšom ovzduší.

Porovnanie frakcií potvrdilo vyššie zastúpenie S v $\text{PM}_{2,5}$, zatiaľ čo minerálne prvky Ca, Si a Fe boli výraznejšie zastúpené v PM_{10} . Výsledky tak naznačujú kombinované pôsobenie viacerých zdrojových skupín. Letné zloženie PM_{10} bolo viac ovplyvnené resuspenziou pôdneho a cestného prachu, zatiaľ čo zimné vzorky vykazovali vyššie zastúpenie prvků spájaných so spaľovacími procesmi a zimnou údržbou komunikácií.

Pozorované rozdelenie prvků medzi jemnou a hrubšou frakciou je v súlade s predchádzajúcimi meraniami v Žiline [3, 4]. V týchto štúdiách boli Al, Si, Ca, Fe a ďalšie prvky minerálneho a cestného prachu spojené predovšetkým s hrubou frakciou $\text{PM}_{2,5-10}$, zatiaľ čo K, S, Zn a ďalšie prvky súvisiace so spaľovacími procesmi a sekundárnym aerosólom boli výraznejšie zastúpené v jemnejších frakciách. Aktuálne výsledky tieto zistenia podporujú a zároveň poukazujú na priestorovo rozsiahle zimné zvýšenie K a Cl.

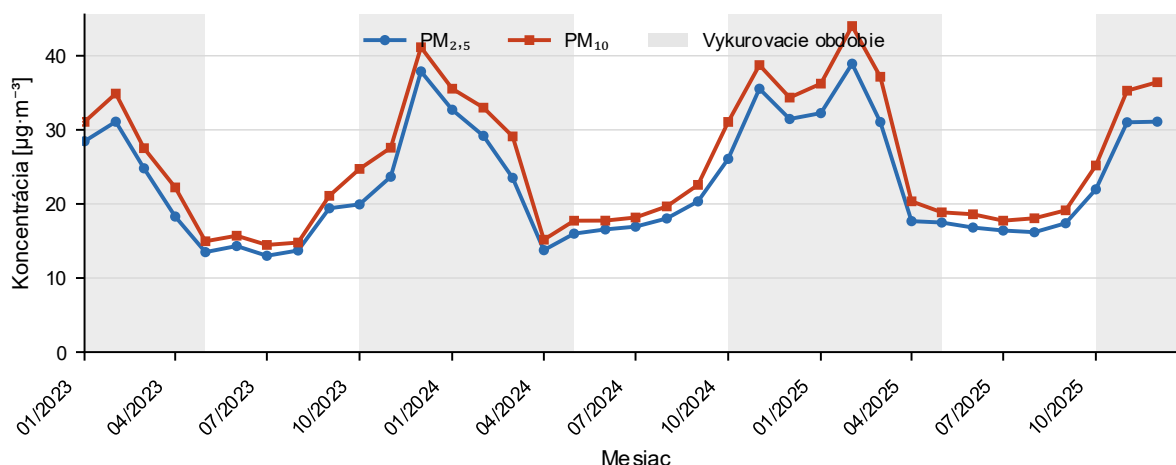
Uvedené priradenie predstavuje indikatívnu zdrojovú interpretáciu založenú na typických prvkových markeroch.

3.4 Dlhodobá časopriestorová variabilita v senzorovej sieti

Dlhodobá variabilita koncentrácií $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} bola hodnotená pomocou hodinových údajov z ôsmich senzorových staníc za roky 2023–2025. Celkovo bolo spracovaných 206 861 hodinových záznamov. Dostupnosť údajov na jednotlivých staniciach presiahla 99,6 % predpokladaného rozsahu merania.

Spoločný časový priebeh siete vykazoval opakujúci sa sezónny cyklus s vyššími koncentraciami počas vykurovacieho obdobia a nižšími hodnotami od neskorej jari do konca leta. Na obr. 4 sú uvedené mediány mesačných mediánov koncentrácií z ôsmich staníc, vypočítaných z platných 24-hodinových priemerov.

Obr. 4. Mesačné mediány 24-hodinových koncentrácií $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} v senzorovej sieti za roky 2023–2025.



Pozn.: Sivou farbou je vyznačené vykurovacie obdobie od októbra do apríla. Uvedené sú nekorigované senzorové údaje.

Najnižšie mesačné mediány $\text{PM}_{2,5}$ sa vyskytovali spravidla od mája do augusta a pohybovali sa približne od 13 do 18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Najvyššie hodnoty boli zaznamenané v decembri 2023, novembri 2024 a februári 2025, keď sieťový mesačný medián

PM_{2,5} dosiahol 35,5–38,9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. PM₁₀ vykazovalo podobný priebeh, pričom jeho mesačné mediány boli spravidla o niekoľko $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vyššie. V hodnotenom období sa neprejavil jednoznačný monotónny medzročný trend, ale pravidelne sa opakovala výrazná sezónnosť.

Na všetkých staniciach boli mediány koncentrácií vo vykurovacom období vyššie než v nevykurovacom období. Relatívne najvýraznejší rozdiel bol zaznamenaný v Žilinskej Lehotě, kde bol zimný medián PM_{2,5} približne 4,6-násobný a medián PM₁₀ približne 5,1-násobný. Výrazný sezónny nárast sa prejavil aj v Starom meste a Brodne. Na mestských lokalitách AG2 až AG5 bola relatívna sezónna zmena menšia, približne 1,3- až 1,5-násobná (tab. 4).

Tab. 4. Mediány 24-hodinových koncentrácií v nevykurovacom a vykurovacom období za roky 2023–2025

Lokalita	PM _{2,5} nevykurovacie	PM _{2,5} vykurovacie	PM ₁₀ nevykurovacie	PM ₁₀ vykurovacie
AG1 Staré mesto	5,18	15,14	6,71	19,57
AG2 Autobusová stanica	27,90	39,67	31,02	43,48
AG3 Košická – Hypertesco	19,18	28,64	20,94	31,65
AG4 Vlčince	23,62	31,11	24,97	32,89
AG5 Bôrik	24,12	30,40	25,55	33,79
AG6 Hájk	14,92	25,02	16,35	27,58
AG7 Brodno	8,04	19,96	9,15	22,76
AG8 Žilinská Lehota	5,87	26,71	7,58	38,41

Pozn.: koncentrácie sú uvedené v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ide o nekorigované senzorové údaje.

Menší sezónny pomer na mestských lokalitách nemožno automaticky interpretovať ako nižšie zimné zaťaženie. Tieto stanice vykazovali vyššiu základnú úroveň senzorových koncentrácií už počas nevykurovacieho obdobia. Môže to súvisieť s celoročným vplyvom dopravy a mestskej zástavby, ale aj s rozdielnou systematickou odozvou jednotlivých senzorov.

Napriek rozdielom v absolútnej úrovni boli denné časové rady jednotlivých staníc prevažne silne korelované. Pre väčšinu dvojíc lokalít dosahoval Pearsonov korelačný koeficient denných koncentrácií PM_{2,5} hodnoty približne 0,80–0,99. Vysoký časový súbeh poukazuje na významný vplyv spoločných meteorologických podmienok a regionálneho pozadia. Nižšia zhoda bola pozorovaná pri stanici AG5, kde sa korelácia s ostatnými bodmi pohybovala približne od 0,61 do 0,74.

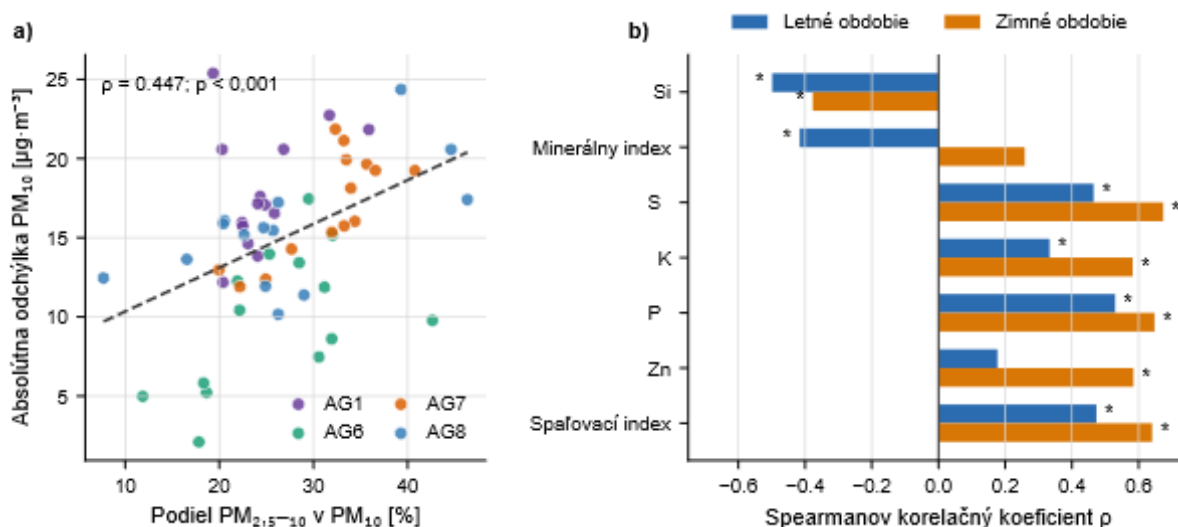
Dlhodobé senzorové údaje tak spoľahlivo zachytili sezónny priebeh a spoločné epizódy zvýšených koncentrácií, hoci ich absolútna úroveň bola ovplyvnená individuálnou odozvou senzorov. Gravimetrické merania poskytli presnejšiu informáciu o hmotnostnej koncentrácii na vybraných lokalitách a EDXRF analýza preukázala sezónnu zmenu chemického zloženia. Kombinácia metód podporuje záver, že zimné zvýšenie PM súviselo nielen so zhoršenými rozptylovými podmienkami, ale aj so zmenou zdrojového profilu aerosólu.

3.5 Vzťah hrubej frakcie a prvkového zloženia k odozve senzorov

Výsledky poukázali na súvislosť medzi veľkostným rozdelením aerosólu a kvalitou senzorového merania PM₁₀. V letnom období dosahovala priemerná gravimetricky stanovená koncentrácia hrubej frakcie PM_{2,5-10} hodnotu 7,14 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zatiaľ čo rozdiel senzorových koncentrácií PM₁₀ a PM_{2,5} predstavoval iba 1,53 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Sensory tak v priemere zachytili približne 21 % gravimetricky stanovenej hrubej frakcie.

So zvyšujúcim sa podielom $PM_{2,5-10}$ v PM_{10} sa zväčšovala absolútna odchýlka senzorového merania PM_{10} ($\rho = 0,447$; $p < 0,001$; obr. 5a). Súčasne bol zistený negatívny vzťah medzi koncentráciou hrubej frakcie a rozdielom senzorovej a gravimetrickej koncentrácie PM_{10} ($\rho = -0,555$; $p < 0,001$). Gravimetricky a senzorovo stanovené koncentrácie hrubej frakcie spolu významne nekorelovali ($\rho = 0,142$; $p = 0,297$). Výsledky podporujú predpoklad, že optické senzory nedostatočne zachytávajú väčšie častice a pri ich vyššom zastúpení čoraz výraznejšie podhodnocujú PM_{10} .

Obr. 5. Doplnujúce ukazovatele kvality senzorového merania: (a) vzťah medzi podielom gravimetricky stanovenej hrubej frakcie a absolútnou odchýlkou PM_{10} počas letného obdobia; (b) Spearmanove korelačné koeficienty medzi relatívnou odozvou senzora a vybranými ukazovateľmi prvkového zloženia PM_{10} po zohľadnení rozdielov medzi lokalitami a obdobiami. Hviezdička označuje vzťahy s $p < 0,05$.



Zistené nedostatočné zachytenie hrubej frakcie je v súlade s výsledkami Molina Rueda et al. [7], ktorí pri veľkostne rozlíšenom terénnom hodnotení nízkonákladových senzorov zaznamenali podstatne vyššiu odchýlku a neistotu pre frakciu $PM_{2,5-10}$ než pre častice v akumuláčnom móde. Zhoda výsledkov podporuje interpretáciu, že rastúce zastúpenie hrubých častíc patrí medzi významné príčiny podhodnotenia PM_{10} optickými senzormi.

Exploratívna analýza naznačila, že odozva senzorov súvisela aj s prvkovým zložením aerosólu. Po odstránení priemerných rozdielov medzi lokalitami a obdobiami bola relatívna odozva senzora v lete negatívne spojená s obsahom Si ($\rho = -0,498$) a minerálnym indexom ($\rho = -0,416$). Najsilnejšie pozitívne vzťahy boli zistené pre S ($\rho = 0,465$), P ($\rho = 0,530$) a index spaľovacej zložky ($\rho = 0,473$).

V zimnom období boli najsilnejšie pozitívne vzťahy zaznamenané pre S ($\rho = 0,673$), P ($\rho = 0,648$), K ($\rho = 0,582$), Zn ($\rho = 0,584$) a index spaľovacej zložky ($\rho = 0,641$). Výsledky naznačujú dva rozdielne režimy odozvy: hrubšie minerálne častice boli senzormi zachytávané nedostatočne, zatiaľ čo pri aerosóle bohatšom na jemnejšie spaľovacie a sekundárne zložky bola relatívna odozva vyššia.

Uvedené vzťahy je potrebné považovať za exploratívne. EDXRF neurčuje chemické formy prvkov a neposkytuje údaje o dusičnanech, amónnych iónoch, uhlíkovej zložke ani viazanej vode. Zistené korelácie preto nepreukazujú kauzálny mechanizmus, ale podporujú potrebu zohľadniť veľkostné a chemické zloženie aerosólu pri kalibrácii a interpretácii údajov z nízkonákladových optických senzorov.

4 Záver

Kombinácia gravimetrických odberov, prvkovej analýzy a dlhodobej senzorovej siete umožnila charakterizovať časopriestorovú variabilitu $PM_{2,5}$ a PM_{10} v Žiline a jej okolí. Krátkodobé referenčné merania ukázali výraznejšie priestorové rozdiely najmä počas zimného obdobia. Dlhodobé údaje z ôsmich senzorových staníc potvrdili opakujúci sa sezónny cyklus s vyššími koncentráciami vo vykurovacom období a umožnili identifikovať epizódy zvýšených koncentrácií zasahujúce celé sledované územie. Absolútne poradie lokalít však vzhľadom na rozdielnú odozvu jednotlivých senzorov nemožno považovať za jednoznačné poradie kvality ovzdušia.

Prvková analýza preukázala rozdielne zastúpenie zdrojových markerov medzi frakciami a obdobiami. V $PM_{2,5}$ dominovala síra, zatiaľ čo letné vzorky PM_{10} obsahovali vyššie podiely Ca, Si a Fe charakteristické pre minerálny a resuspendovaný prach. V zime sa na všetkých lokalitách zvýšilo zastúpenie K a Cl a na niektorých miestach aj S, P a Zn, čo poukazuje na sezónnu zmenu zdrojového profilu aerosólu a vyšší príspevok spaľovacích procesov. Priradenie zdrojov podľa prvkových markerov je však indikatívne a ich presné kvantifikovanie by si vyžadovalo receptorovú analýzu.

Porovnanie senzorov s gravimetrickou metódou preukázalo výraznú sezónnu a lokálnu závislosť ich odozvy. V lete dosahovalo priemerné podhodnotenie $PM_{2,5}$ a PM_{10} hodnoty 50,9 a 58,6 %, zatiaľ čo v zime senzory koncentrácie priemerne nadhodnocovali o 10,7 a 14,5 %. Senzorový rozdiel $PM_{10} - PM_{2,5}$ zachytil v lete iba približne 21 % gravimetricky stanovenej hrubej frakcie. Rastúci podiel hrubých častíc súvisel so zväčšovaním chyby PM_{10} , pričom exploratívna analýza naznačila aj asociáciu relatívnej odozvy s prvkovým zložením aerosólu. Nízkonákladové senzory sú preto vhodné najmä na sledovanie časových trendov, sezónnosti a spoločných epizód, ich použitie na hodnotenie absolútnych koncentrácií však vyžaduje lokálne a sezónne špecifické overenie.

Literatúra

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter ($PM_{2,5}$ and PM_{10}), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 290 s. ISBN 978-92-4-003422-8.
- [2] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2024/2881 of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union. 2024, L 2024/2881, 20. 11. 2024.
- [3] JANDAČKA, D., ĎURČANSKÁ, D. Differentiation of particulate matter sources based on the chemical composition of PM_{10} in functional urban areas. Atmosphere. 2019, 10(10), 583. DOI: 10.3390/atmos10100583.
- [4] JANDAČKA, D., ĎURČANSKÁ, D. Seasonal variation, chemical composition, and PMF-derived sources identification of traffic-related PM_{10} , $PM_{2,5}$, and $PM_{2,5-10}$ in the air quality management region of Žilina, Slovakia. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021, 18(19), 10191. DOI: 10.3390/ijerph181910191.
- [5] CRILLEY, L. R., et al. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. Atmospheric Measurement Techniques. 2018, 11, s. 709–720. DOI: 10.5194/amt-11-709-2018.
- [6] BULOT, F. M. J., et al. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. Scientific Reports. 2019, 9, 7497. DOI: 10.1038/s41598-019-43716-3.

- [7] MOLINA RUEDA, E., et al. Size-resolved field performance of low-cost sensors for particulate matter air pollution. *Environmental Science & Technology Letters*. 2023, 10(3), s. 247–253. DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00030.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s podporou Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci riešenia projektu VEGA č. 1/0354/26 „Výskum vzniku a zloženia nevýfukových emisií PM z cestnej dopravy“.

Spatiotemporal Variability of PM_{2.5} and PM₁₀ in Žilina: Concentrations, Elemental Composition, and Sensor Network Evaluation

Dušan Jandačka, Michal Cingel, Kristína Jastrabanová

*Department of Highway and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering,
University of Žilina*

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovakia

e-mail: dusan.jandacka@uniza.sk

Abstract

The study aimed to assess the spatiotemporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations and elemental composition in Žilina by combining gravimetric sampling, EDXRF analysis, and data from a network of eight optical sensors. Comparative 24 h measurements were conducted at four locations during summer and winter periods. The gravimetric results revealed substantial spatial and seasonal differences, with winter increases in PM concentrations observed at three of the four monitored locations. PM_{2.5} was characterised by a high proportion of sulfur, whereas the summer PM₁₀ samples contained higher proportions of mineral elements, particularly Ca, Si, and Fe. During winter, the contents of K, Cl, and other elements associated with combustion processes and winter road maintenance increased. Long-term sensor data collected between 2023 and 2025 confirmed a pronounced seasonal cycle and enabled the identification of concurrent high-concentration episodes across the city. However, comparison with the gravimetric method revealed systematic underestimation by the sensors in summer and moderate overestimation in winter. During summer, the sensors detected, on average, only approximately 21% of the gravimetrically determined PM_{2.5–10} coarse fraction. The results demonstrate that sensor networks can effectively complement conventional monitoring when assessing temporal changes and spatial differences; however, their data require local and season-specific validation.

Keywords: PM_{2.5}; PM₁₀; spatiotemporal variability; elemental composition; sensor network; gravimetric method; EDXRF.

Charakterizace emisí částic z opotřebení pneumatik na válcovém dynamometru

Klaudia Matušková, Jiří Pospíšil, Lukáš Preisler

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2, Brno, Česká republika

e-mail: klaudia.matuskova@vutbr.cz

Abstrakt

Tato studie se zabývá vznikem částic z opotřebení pneumatik během krátkodobých testů vozidla na válcovém dynamometru, se zaměřením na vliv tepelného a mechanického namáhání na uvolňování částic. Nevýfukové emise, hlavně z otěru pneumatik, představují environmentální problém a jsou hlavním zdrojem znečištění mikroplasty. Tento problém nabývá na významu s rostoucím rozšířením elektromobilů, které v důsledku své vyšší hmotnosti obecně způsobují vyšší míru opotřebení pneumatik.

Cílem této studie je vytvořit specializovaný měřicí protokol pro hodnocení emisí z opotřebení pneumatik pomocí válcového dynamometru a určit, jak předchozí degradace pneumatiky ovlivňuje tyto emise. Experimentální uspořádání využívalo vozidlo Škoda Enyaq umístěné na dynamometru vybaveném dvojicí ocelových válců o průměru 300 mm. Toto uspořádání vystavuje běhoun pneumatiky zvýšené deformaci, přičemž brzděný válec vyvolává kombinaci smykového, tlakového a tahového napětí, které vede ke vzniku trhlin a následnému uvolňování částic.

Pro zachycení emitovaných částic byl za kolem umístěn odsávací kryt pracující při průtoku 200 l/min, využívající izokinetickou sondu napojenou na přístroj TSI OPS 3330. Měření dále zahrnovala monitorování pozadové koncentrace. Zkušební cykly zahrnovaly rychlosti vozidla v rozmezí 50 až 90 km/h při různých brzdných silách na kolo.

Výsledky ukazují souvislost mezi intenzitou emisí částic a faktory, jako je dynamické namáhání, teplota běhounu a stav povrchu. Tato práce prokazuje, že válcové dynamometry v kombinaci s vhodnými technikami odběru aerosolových vzorků představují spolehlivé a kontrolovatelné laboratorní prostředí pro analýzu emisí z opotřebení pneumatik.

1. Úvod

Nevýfukové emise z automobilové dopravy, zejména z opotřebení pneumatik, se v posledních letech stávají stále významnějším příspěvkem znečištění ovzduší ve městech, a to zejména v důsledku klesajícího podílu výfukových emisí díky přísnějším emisním limitům a rostoucímu podílu elektromobilů [1, 2]. Evropská komise zařadila emise z pneumatik a brzd do připravované normy Euro 7, neboť se očekává, že do roku 2050 budou nevýfukové emise tvořit až 90 % všech částic vypouštěných silniční dopravou, přičemž částice z pneumatik jsou považovány za největší zdroj mikroplastů uvolňovaných do životního prostředí [1, 3].

Částice z opotřebení pneumatik (tire wear particles, TWP) vznikají především mechanickým oděrem a třením mezi běhounem pneumatiky a povrchem vozovky, čímž se do prostředí uvolňuje fyzikální i chemické znečištění [4]. Jejich vznik je ovlivněn celou řadou faktorů, jako jsou vlastnosti samotné pneumatiky, hmotnost vozidla či celkový způsob jízdy [4–6]. S rostoucí hmotností vozidel, zejména

v důsledku postupující elektrifikace, se přitom očekává, že tyto nevýfukové emise z pneumatik dále porostou [6].

Množství uvolněných částic zásadně ovlivňuje právě zmíněný styl jízdy. K největším ztrátám materiálu dochází během akcelerace, brzdění a zatáčení. Dominantní vliv na tvorbu emisí má přitom boční zrychlení [7]. Vznik TWP tak přímo a silně koreluje s třecím výkonem působícím mezi pneumatikou a vozovkou při dynamických manévrech vozidla [8].

Kromě běžného mechanického otěru mohou vysoké kontaktní teploty vyvolávat odpařování a následnou kondenzaci těkavých složek pneumatiky. Tento proces vede ke vzniku nanočástic a ultrajemných částic [1, 9].

Vzhledem k tomu, že reálné podmínky na vozovce, jako je interakce mezi pneumatikou a povrchem či skutečné chování řidiče, nelze plně simulovat pomocí komponentových zkoušek (např. na zkušebnách pneumatik), bývají pro generování a studium emisí částic z pneumatik za kontrolovaných podmínek často využívána testovací vozidla umístěná na válcovém dynamometru [7, 10]. Tento přístup umožňuje eliminovat vliv okolního prostředí a silničního povrchu na vznik a zachyt částic a poskytuje dobrou reprodukovatelnost měření [6]. Dřívější publikované experimenty na válcovém dynamometru potvrzují, že významný podíl emitovaných ultrajemných částic nepochází ze spalovacího motoru, ale byl přisouzen právě opotřebení pneumatik a brzd [11].

Přesto dosud neexistuje jednotná, standardizovaná metodika pro měření emisí částic z opotřebení pneumatik s využitím válcového dynamometru, což komplikuje porovnatelnost výsledků mezi jednotlivými studiemi [1, 10, 11]. Cílem této práce je navrhnout specializovaný měřicí postup pro hodnocení emisí z opotřebení pneumatik s využitím válcového dynamometru a posoudit vliv předchozí degradace pneumatiky na tyto emise.

2. Metodologie

Měření emisí TWP probíhalo v laboratorních podmínkách s využitím válcového dynamometru s válci s hladkým ocelovým povrchem o průměru 300 mm. Dynamometr umožnil přesnou kontrolu jízdních odporů a simulaci reálné jízdní zátěže. Jako testovací vozidlo byl použit vůz Škoda Enyaq, který reprezentuje moderní, hmotnostně nadprůměrná vozidla se zvýšeným potenciálem pro tvorbu nevýfukových emisí. Zásadní výhodou zvoleného testovacího vozidla byla možnost využití čistě rekuperačního brzdění pomocí elektromotoru. Tento přístup zcela zamezil aktivaci třecích brzd, čímž byla v experimentu naprosto eliminována interference částic z opotřebení brzd.

Pro zachycení částic uvolněných z rozhraní mezi pneumatikou a povrchem válce byl navržen a zkonstruován vlastní odběrový kryt odsávaný průtokem 200 l/min. Tento kryt byl umístěn bezprostředně za zadní testovanou pneumatikou s cílem minimalizovat ztráty částic rozptylem (viz Obr. 1). Geometrie krytu byla optimalizována tak, aby směřovala proudění vzduchu přímo k odběrové sondě. Na vstupní trychtýř byl izokineticky napojen odběrový systém pevných částic. Podmínka izokinetického odběru byla před započítím měření ověřena analytickým výpočtem na základě geometrie systému a průtokových charakteristik.

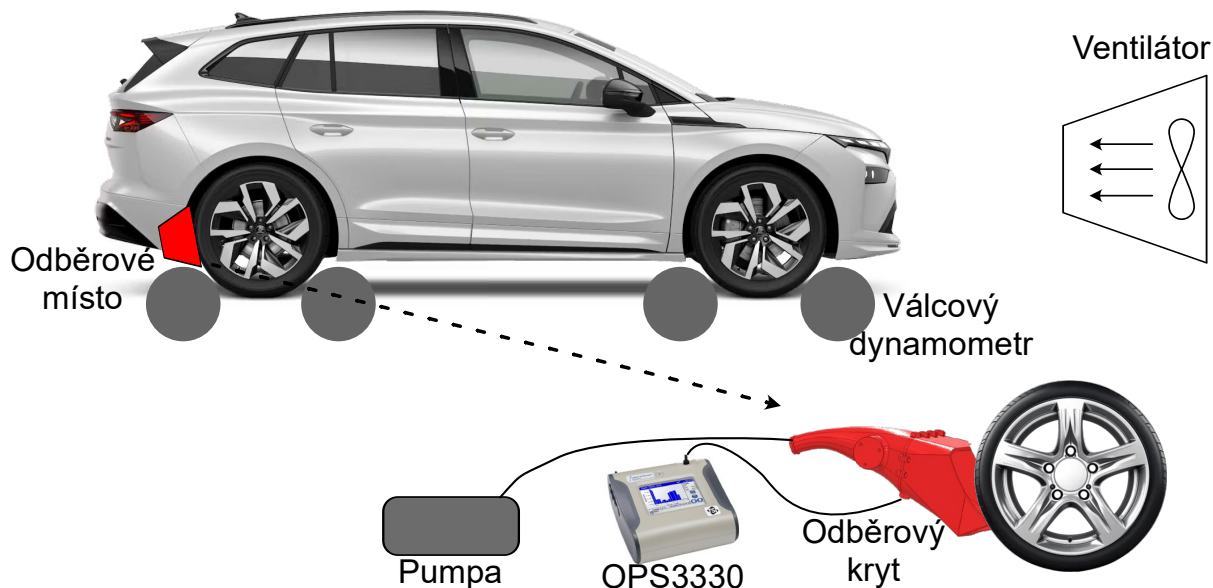
Kvantifikace a stanovení velikostní distribuce částic probíhalo pomocí optického spektrometru velikosti částic (Optical Particle Sizer, model OPS 3330, TSI), který kontinuálně měřil koncentraci částic v reálném čase v rozsahu velikostí 0,3 až 10 μm . Pro zajištění přesnosti výsledků a odfiltrování environmentálního šumu byl do experimentu zapojen druhý, identický přístroj TSI OPS 3330. Tento referenční

spektrometr byl umístěn v testovací místnosti tak, aby kontinuálně měřil pozadovou koncentraci částic. Jeho poloha byla záměrně zvolena tak, aby zachytí jak celkové pozadí laboratoře, tak i sekundární vlivy, zejména resuspenzi usazeného prachu vyvolanou aerodynamickým vířením okolo vozidla a rotujících kol.

Testovací cykly byly navrženy s cílem sledovat vliv brzdného výkonu a rychlosti na dynamiku tvorby částic z pneumatik. Vozidlo bylo nejprve akcelerováno na konstantní rychlost 50 km/h, při které probíhala stabilizační fáze po dobu 30 sekund. Následně byly aplikovány brzdné události o definovaném výkonu 20 kW a 30 kW. Pro ověření vlivu dynamiky byl proveden třetí cyklus při rychlosti 90 km/h se střídavým zatížením na kolo s maximem 130 kW. Zpomalování vozidla bylo realizováno výhradně prostřednictvím válce. Během celého cyklu byla kontinuálně zaznamenávána data z obou přístrojů OPS a telemetrie vozidla.

Při následném vyhodnocení dat byly časové řady z obou spektrometrů synchronizovány. Koncentrace naměřené pozadovým přístrojem byly v každém časovém kroku odečteny od hodnot zaznamenaných hlavním odběrovým systémem umístěným u pneumatiky. Tento korekční krok zajistil, že výsledné hodnoty reprezentují výhradně primární emise z TWP.

Obr. 1: Schéma experimentálního uspořádání pro měření emisí částic z opotřebení pneumatik (TWP). Vpravo dole detailní 3D geometrie odběrového trychtýře a jeho polohy vůči pneumatice.



3. Výsledky a diskuse

Emisní chování pneumatiky bylo hodnoceno na válcovém dynamometru ve třech po sobě jdoucích jízdních cyklech s postupně rostoucí teplotou pneumatiky po zastavení (31,5 °C, 46 °C a 50 °C) při přibližně konstantní teplotě okolí (19–20 °C). Na závěr bylo provedeno referenční měření pozadí bez jízdy vozidla, které slouží k porovnání koncentrací naměřených u vozidla s koncentracemi částic v pozadí. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 2.

V prvním cyklu, probíhajícím při ustálené rychlosti přibližně 50 km/h a nízkém, stabilním odporu na kolo, byl zaznamenán výrazný nárůst koncentrace částic bezprostředně po rozjezdu, následovaný jejich postupným poklesem navzdory

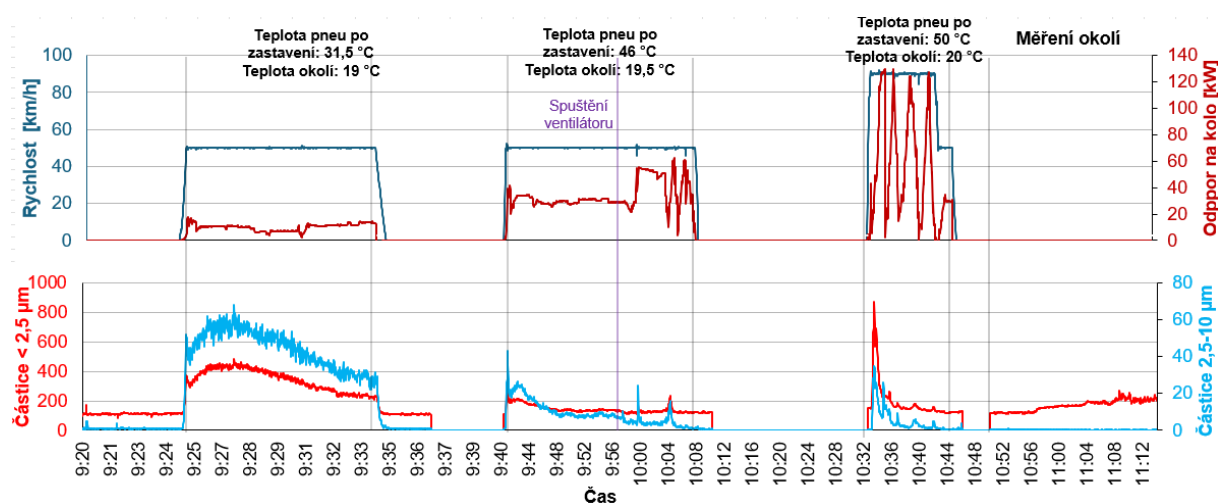
konstantní rychlosti jízdy. Tento průběh je typický pro počáteční uvolnění volně ulpělých částic z povrchu pneumatiky a okolních komponent, které je s postupujícím časem nahrazeno nižší, střední ustálenou úrovní emisí odpovídající vlastnímu mechanismu otěru.

Druhý cyklus vykazoval obdobný ustálený rychlostní profil, avšak s nižšími špičkovými koncentracemi částic než cyklus první, přestože teplota pneumatiky byla vyšší. Přibližně v polovině cyklu bylo spuštěno chlazení ventilátorem, od kterého je patrný výraznější a nepravidelnější kolísavý průběh frakce částic pod $2,5\ \mu\text{m}$. Tento jev může souviset s turbulentním prouděním vzduchu v okolí odběrového místa a jeho vlivem na dynamiku vzorkování, případně s druhotným rozvířením usazených částic. Spuštění ventilátoru bylo nutné pro chlazení testovacího systému.

Třetí cyklus se od předchozích dvou zásadně lišil charakterem zatížení. Namísto ustáleného odporu na kolo byl tento odpor postupně zvýšen a následně snížen, s maximem 130 kW na kolo, zatímco rychlost byla udržována konstantní na 90 km/h. Cílem tohoto cyklu bylo otestovat vliv vyšší zátěže na emise TWP. Tomu odpovídá i ostrá počáteční špička v koncentraci jemné frakce částic na začátku cyklu. Vzhledem k odlišnému charakteru zátěžového profilu není přímé srovnání absolutních koncentrací mezi třetím a předchozími cykly zcela vypovídající. Dynamické změny rychlosti a brzdění jsou obecně považovány za jeden z hlavních mechanismů uvolňování částic z pneumatiky, nezávisle na samotné teplotě pneumatiky. Po výrazném píku na začátku měření nebyly celkové koncentrace TWP při vyšší rychlosti a odporu vyšší než při nižší rychlosti. Vliv zvýšeného odporu je na emisích přesto patrný, při jeho nárůstu se vždy objevil malý pík koncentrace.

Napříč všemi cykly byla soustavně vyšší koncentrace hrubší frakce částic ($2,5\text{--}10\ \mu\text{m}$) oproti frakci jemnější ($<2,5\ \mu\text{m}$), což odpovídá obecně publikovanému rozložení velikosti částic vznikajících otěrem pneumatik. Zajímavým zjištěním je, že nejvyšší naměřená teplota pneumatiky (třetí cyklus) nekorelovala s nejvyšší ustálenou koncentrací částic. Vyšší vliv na okamžitou míru emisí měl patrně dynamický charakter jízdy a počáteční fáze uvolňování nastřádaných částic než samotná teplota pneumatiky.

Obr. 2: Odezva koncentrace částic z opotřebení pneumatik na brzdňý výkon při rychlosti 50 km/h a 90 km/h.



4. Závěr

Tato studie se zabývala charakterizací emisí TWP s využitím válcového dynamometru. Výsledky ukázaly, že intenzita uvolňování částic není určena pouze teplotou běhounu pneumatiky, ale je výrazně ovlivněna i dynamickým charakterem zatížení, zejména změnami brzdného výkonu a přechodovými jevy na začátku jednotlivých cyklů, kdy dochází k uvolnění volně ulpělých částic nastřádaných z předchozí jízdy. Nejvyšší testovaná teplota pneumatiky (50 °C) tak nevedla k nejvyšším ustáleným koncentracím, zatímco nárůsty odporu na kolo se v datech projevovaly zřetelnými lokálními píky emisí. Napříč všemi cykly zároveň dominovala hrubší frakce částic (2,5–10 µm) nad frakcí jemnější (<2,5 µm), v souladu s dosavadními poznatky o velikostní distribuci TWP.

Navržené experimentální uspořádání se ukázalo jako funkční a reprodukovatelné řešení pro laboratorní studium emisí z opotřebení pneumatik za kontrolovaných podmínek. Pro budoucí práci se nabízí rozšíření testovací matice o systematickou variaci rychlosti, brzdného výkonu a stavu opotřebení pneumatiky, což by umožnilo přesněji oddělit vliv jednotlivých faktorů a přispět k rozvoji standardizované metodiky měření požadované v souvislosti s připravovanou normou Euro 7.

Literatura

- [1] COSTAGLIOLA, Maria Antonietta; MARCHITTO, Luca; PIRAS, Marco; MARIANI, Antonio a GIUZIO, Rocco. Measurements of brake and tire wear particulate emissions from light-duty vehicles under WLTC driving conditions. Online. *Science of The Total Environment*. 2026, vol. 1016, s. 181462. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181462>
- [2] ROY, Anamika; MANDAL, Mamun; DAS, Sujit; KUMAR, Manoj; POPEK, Robert et al. Non-exhaust particulate pollution in Asian countries: A comprehensive review of sources, composition, and health effects. Online. *Environmental Engineering Research*. 2023, vol. 29, no. 3, s. 230384-0. ISSN 1226-1025. Dostupné z: <https://doi.org/10.4491/eer.2023.384>
- [3] EVROPSKÁ UNIE. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/1257 ze dne 24. dubna 2024 o schvalování typu motorových vozidel a motorů, jakož i systémů, konstrukčních částí a samostatných technických celků určených pro tato vozidla z hlediska jejich emisí a životnosti baterie (Euro 7), o změně nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/858 a o zrušení nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 a (ES) č. 595/2009, nařízení Komise (EU) č. 582/2011, (EU) 2017/1151 a (EU) 2017/2400 a prováděcího nařízení Komise (EU) 2022/1362 (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*. 2024, L, 2024/1257, 8. 5. 2024. [online]. [cit. 2026-08-27]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj>
- [4] ZHANG, Mengzhu; YIN, Hang; TAN, Jianwei; WANG, Xin; YANG, Zhengjun et al. A comprehensive review of tyre wear particles: Formation, measurements, properties, and influencing factors. Online. *Atmospheric Environment*. 2023, vol. 297, s. 119597. ISSN 1352-2310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119597>.
- [5] PARK, Inyong; KIM, Hong Suk a LEE, Seokhwan. Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions. Online. *Journal of Aerosol Science*. 2018, vol. 124, s. 30-40. ISSN 0021-8502. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.07.005>.
- [6] LI, Jiachen; ZHANG, Mengzhu; GE, Yunshan; WEN, Yi; LUO, Jiaxin et al. Characterization of tire wear particle emissions from different-mileage passenger cars. Online. *Atmospheric Environment*. 2025, vol. 357, s. 121292. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121292>.

- [7] TONEGAWA, Yoshio a SASAKI, Sousuke. Development of Tire-Wear Particle Emission Measurements for Passenger Vehicles. Online. *Emission Control Science and Technology*. 2021, vol. 7, no. 1, s. 56-62. ISSN 2199-3629. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40825-020-00181-z>
- [8] FEISSEL, Toni; KUNZE, Miles; HESSE, David; IVANOV, Valentin; AUGSBURG, Klaus et al. On-Road Vehicle Measurement of Tire Wear Particle Emissions and Approach for Emission Prediction. Online. *Tire Science And Technology*. 2024, roč. 52, č. 1, s. 2-14. ISSN 1945-5852. Dostupné z: <https://doi.org/10.2346/tire.22.21024>.
- [9] ZHANG, Mengzhu; LI, Jiachen; YIN, Hang; WANG, Xin; QIN, Yechen et al. Pilot analysis of tire tread characteristics and associated tire-wear particles in vehicles produced across distinct time periods. Online. *Science of The Total Environment*. 2024, vol. 932, s. 172760. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172760>.
- [10] BONDORF, Linda; LÖBER, Manuel; GREIN, Tobias; KÖHLER, Lennart; EPPLÉ, Fabius et al. Characterization of airborne tire particle emissions under realistic conditions on the chassis dynamometer, on the test track, and on the road. Online. *Aerosol Science and Technology*. 2025, vol. 59, no. 5, s. 623-634. ISSN 0278-6826. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02786826.2025.2464215>.
- [11] ATZLER, Frank; WIEDENSOHLER, Alfred; ROSS, Tilo; WEINHOLD, Kay a DOBBERKAU, Maximilian. Roller dynamometer particle immission* measurement. Online. *Automotive and Engine Technology*. 2021, vol. 7, no. 1-2, s. 15-26. ISSN 2365-5127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s41104-021-00094-1>

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory projektu „Inovativní technologie pro chytrou nízkoemisní mobilitu“, reg. č.: CZ.02.01.01/00/23_020/0008528, financovaného z OP JAK v rámci výzvy Mezisektorová spolupráce.

Characterization of tire wear particle emissions using a roller dynamometer

Klaudia Matušková, Jiří Pospíšil, Lukáš Preisler

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering,

Technická 2896/2, Brno, Czech Republic

e-mail: klaudia.matuskova@vutbr.cz

Abstract

This study investigates the generation of tire wear particles during short-term vehicle tests on a roller dynamometer, focusing on the effects of thermal and mechanical stress on particle release. Non-exhaust emissions, specifically from tire abrasion, represent a major environmental challenge and are a primary source of microplastic pollution. This issue is increasingly critical with the growing adoption of electric vehicles, which generally cause higher tire wear rates due to their heavier mass.

The aim of this study is to establish a specialized measurement protocol for evaluating tire wear emissions using a conventional roller dynamometer, and to determine how previous tire degradation impacts these emissions. The experimental setup used a Škoda Enyaq placed on a dynamometer equipped with twin 300 mm steel rollers. This setup subjects the tire tread to intensified deformation, while the braked roller applies a combination of shear, compressive, and tensile stresses that drive crack formation and subsequent particle release.

To capture the emitted particles, a sampling hood operating at a flow rate of 200 L/min was located behind the wheel, using an isokinetic probe linked to a TSI OPS 3330. Measurements also included background concentration monitoring. Test cycles varied vehicle speeds between 50 and 90 km/h, applying different braking forces per wheel.

Results show a correlation between the intensity of particle emissions and factors such as dynamic stress, tread temperature, and surface state. This work demonstrates that, when combined with proper aerosol sampling techniques, roller dynamometers offer a reliable and controlled laboratory environment for analysing tire wear emissions.

Skryté externality při odvozu dětí do školy: Otázky spravedlnosti v souvislosti s vystavením dětí znečištění ovzduší při cestách do školy

Vilém Pařil, Dominika Tóthová

*Katedra regionální ekonomie, Ekonomicko-správní fakulta, Masarykova univerzita
Lipová 41a, 602 00 Brno*

e-mail: Vilem.Paril@econ.muni.cz

Abstrakt

Studie se zabývá znečištěním ovzduší z pohledu imisní zátěže pro dětskou populaci dojíždějící do základních škol. V tomto specifickém případě jde o sdílené rozhodnutí rodičů a dětí o volbě způsobu i trasy dopravy. Cílem studie je posoudit, zda rodiny, které jako hlavní způsob dopravy na cestu do školy svých dětí volí automobil a jsou ze socioekonomicky lépe postavených a bohatších domácností, zároveň dosahují nižší úrovně zátěže svých potomků právě při cestě do školy. Navazující výzkumnou otázkou studie je, zda právě tyto rodiče z ekonomicky silnějších domácností se podílejí na zvyšování znečištění ovzduší v okolí škol pro ostatní děti, které jako svůj hlavní způsob dopravy volí MHD či aktivní dojíždění na kole nebo pěšky. Tato studie vychází z měření ve 12 školách se zapojením 150 dětí a relevantních domácností v Brně v České republice. Prostřednictvím měření reálného znečištění ovzduší PM díky personálním sběračům nošeným zúčastněnými dětmi je vytvořena mapa znečištění, která je doplněna dotazníkovým šetřením zúčastněných domácností i kontrolní skupiny. Předběžné výsledky ukazují, že právě rodiče dětí ze vzdálenějších rezidenčních lokalit od škol volí automobilovou dopravu častěji a zároveň dosahují nižší míry znečištění (pravděpodobně díky zapnutému vnitřnímu ventilačnímu okruhu v automobilech), přitom projíždějí centrem města, kde se podílejí na zvyšování imisní zátěže pro ostatní děti volící jako hlavní způsob dojíždění do školy chůzi či cyklistiku, nejvíce však MHD.

Klíčová slova

dojíždění dětí do škol, znečištění ovzduší, modální volba dopravního prostředku, frekvence, spravedlnost

The Hidden Externalities of School Drop-Offs: The Equity Issues in Children's Exposure to Air Pollution During School Commuting

Vilém Pařil, Dominika Tóthová

*Department of Regional Economics, Faculty of Economics and Administration,
Masaryk University*

Lipová 41a, 602 00 Brno, Czech Republic

e-mail: Vilem.Paril@econ.muni.cz

Abstract

This study examines air pollution in terms of exposure levels among children commuting to elementary school. In this specific case, the decision regarding the mode and route of transportation is made jointly by parents and children. The aim of the study is to assess whether families who choose the car as their primary mode of transportation for their children's commute to school—and who come from socioeconomically better-off and wealthier households—also expose their children to lower levels of pollution, specifically during the commute to school. A related research question in this study is whether it is precisely these parents from economically better-off households who are contributing to increased air pollution in the vicinity of schools for other children who choose public transportation or active commuting by bike or on foot as their primary mode of transportation. This study is based on measurements taken at 12 schools involving 150 children and their households in Brno, Czech Republic. By measuring actual PM air pollution using personal samplers worn by participating children, a pollution map is created and supplemented by a questionnaire survey of participating households and the control group. Preliminary results show that parents of children living farther from schools are more likely to choose car transportation and, at the same time, produce lower levels of pollution (likely due to the internal ventilation system in their cars being turned on), even as they drive through the city centre, where they contribute to increased pollution levels for other children who choose walking or biking as their primary mode of commuting to school—though most rely on public transportation.

Keywords

children's commuting to school, air pollution, intermodal choice, frequency, equity

Problematika hluku odstavovaných drážních vozidel a vlakových souprav

David Kresl, Dana Potužníková

Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Partyzánské nám.2633/7, Moravská Ostrava,702 00 Ostrava

e-mail: david.kresl@zuova.cz

Abstrakt

V odborných i právních kruzích je poslední dobou diskutována problematika hodnocení hluku z provozu odstavovaných drážních vozidel a vlakových souprav. Přestože Ministerstvo zdravotnictví a Národní referenční laboratoř pro komunální hluk považují stávající právní úpravu za dostačující, opakovaně se ze strany provozovatelů nebo vlastníků železničních tratí objevuje tlak na změnu stávající právní úpravy a metodických usměrnění. Příčinou jsou stížnosti na dlouhodobé stání odstavených vlaků, které ruší a obtěžuje obyvatelstvo hlukem. Tato problematika je vzhledem k opakovaným stížnostem občanů řešena hygienickou službou a následně Správou železnic, s.o. v různých lokalitách ČR. Stížnosti se týkají především hluku v noční době. Problematika posuzování hluku z odstavných vlaků je řešena prakticky kontinuálně od roku 2020. Příspěvek shrnuje právní úpravu a metodický přístup hygienické služby.

1. Právní rámec

1.1. Zákon č. 258/2000 Sb. ^[1]

V oblasti ochrany zdraví před hlukem v komunálním prostředí vyplývá z ustanovení § 30 odst. 1 mj., že provozovatel, popřípadě vlastník dráhy, je povinen technickými, organizačními a dalšími opatřeními zajistit, aby hluk nepřekračoval hygienické limity upravené nařízením vlády č. 272/2011 Sb. ^[2] pro chráněné prostory (dále i „NV“).

1.2. Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. ^[2]

V § 2 NV je pod písmenem n) výklad pojmu „stacionární zdroj hluku: *“stacionárními zdroji hluku jsou zejména stavby, objekty, provozovny a areály sloužící průmyslové a zemědělské výrobě, obchodní a administrativní činnosti a službám, včetně dopravy v těchto areálech, nepohybující se stroje a zařízení pevně fixované na své místo nebo ty, jejichž akční rádius je při pracovním nasazení omezen, dále přenosné a převozní stroje a zařízení, které se při svém použití jako celek nepohybují a dále seřadovací nádraží“*.

Hygienické limity hluku jsou v NV upraveny v § 11 pro chráněný vnitřní prostor staveb a v § 12 pro chráněný venkovní prostor a chráněný venkovní prostor staveb. Příslušné korekce jsou pak v Přílohách 2 a 3 tohoto NV.

Pro hluk ze stacionárních zdrojů se hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ stanoví v denní době pro 8 souvislých a na sebe navazujících nejhluchnějších hodin $L_{Aeq,8h}$, v noční době pro nejhluchnější 1 hodinu $L_{Aeq,1h}$. Hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku A se stanoví pro chráněné vnitřní prostory a hluk pronikající vzduchem zvenčí součtem základní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}} = 40$ dB a korekcí přihlížejících ke druhu chráněného prostoru a denní a noční době podle přílohy č. 2 k tomuto nařízení. V případě hluku s tónovými složkami se přičte další korekce -5 dB. Hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku A se pro

chráněný venkovní prostor a chráněný venkovní prostor stavby stanoví součtem základní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ 50 dB a korekcí přihlížejících ke druhu chráněného prostoru a denní a noční době, které jsou uvedeny v tabulce č. 1 části A přílohy č. 3 k tomuto NV. V případě hluku s tónovými složkami se přičte další korekce -5 dB.

Pro hluk z dopravy na dráhách se hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ stanoví pro celou denní dobu $L_{Aeq,16h}$ a celou noční dobu $L_{Aeq,8h}$. Hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku A pro vnitřní chráněný prostor se stanoví pro hluk pronikající vzduchem zvenčí součtem základní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}} = 40$ dB a korekcí přihlížejících ke druhu chráněného prostoru a denní a noční době podle přílohy č. 2 k tomuto NV. Hygienický limit ekvivalentní hladiny akustického tlaku A se pro chráněný venkovní prostor a chráněný venkovní prostor stavby stanoví součtem základní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ 50 dB a korekcí přihlížejících ke druhu chráněného prostoru a denní a noční době, které jsou uvedeny v tabulce č. 1 části A přílohy č. 3 k tomuto NV.

1.3. Metodický návod ^[3]

Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí (dále i „MNKom“) v kapitole 3 Termíny a výklady pojmů:

Bod 38. Hluk z provozu na železničních, tramvajových, trolejbusových a speciálních drahách je hluk vznikající při jízdě drážních vozidel po železniční, tramvajové, trolejbusové nebo speciální trati, včetně zastavení jednotky z důvodů nezávislých na vůli řidiče, vyvolaných zejména návěsní technikou, bezpečností provozu na dráze nebo zastavení jednotky ve stanicích nebo zastávkách za účelem vystoupení a nastoupení cestujících nebo při obratu jednotky v koncové stanici apod. POZNÁMKA 1: Za hluk z provozu na drahách se nepovažuje hluk související s provozem stacionárních technologických zařízení dráhy, např. kolejových brzd, hluk odstavených drážních vozidel apod., s výjimkou odstaveného drážního vozidla s běžícími motory a agregáty po dobu nezbytně nutnou po ukončení nebo pro zahájení jízdy.

Bod 39 Stacionární zdroje hluku

POZNÁMKA 2: Za stacionární zdroj hluku se považují odstavená drážní vozidla s běžícími motory a agregáty na části kolejiště pro tyto účely standardně používané (s výjimkou odstavení po dobu nezbytně nutnou po ukončení nebo pro zahájení jízdy), stejně jako autobusová nádraží a vozovny MHD (s výjimkou tzv. objízdne koleje sloužící k obratu vozidla).

POZNÁMKA 3: K určení, zda drážní vozidla odstavená s běžícími motory a agregáty na části kolejiště pro tyto účely standardně nepoužívané, jsou stacionárními zdroji hluku, je nutné zjistit minimální potřebnou dobu na přípravu drážního vozidla k bezprostřední jízdě (např. u dopravce). V případě překročení této doby se jedná o stacionární zdroj hluku.

2. Měření hluku z odstavených drážních vozidel

2.1 Vlastní měření

Akreditovaná laboratoř Zdravotního ústavu se sídlem v Ostravě provedla několik měření hluku z odstavených vlakových souprav. Jako příklad uvádíme měření na železniční trati 341. Cílem měření bylo zaznamenání provozu měřeného zdroje hluku, stanovení ekvivalentní hladiny akustického tlaku A , který proniká do chráněného venkovního prostoru stavby rodinného domu a určení, zda dochází nebo nedochází

k překračování hygienických limitů hluku upravených NV pro chráněný venkovní prostor stavby a noční a denní dobu. Předmětem měření byly příjezdy a odjezdy vlaků dopravce České dráhy, a.s. a dopravce ARRIVA vlaky s.r.o., přepřahání lokomotivy vlaků dopravce České dráhy, a.s. a stání nastartovaných vlaků dopravce ARRIVA vlaky s.r.o. v prostoru železniční stanice připravovaných k bezprostřední jízdě (4 provozní stavy-PS).

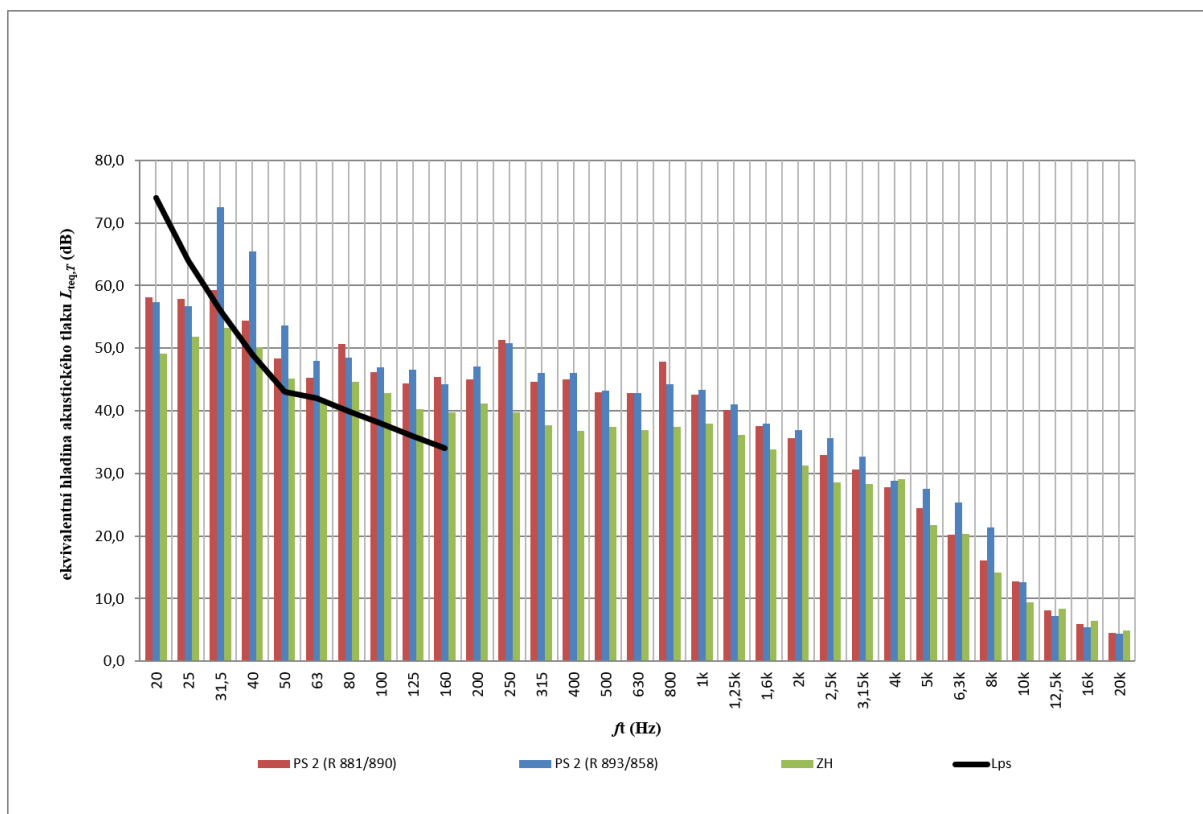
Ve výpočtech pro denní dobu byla použita teoreticky nejdelší možná doba stání nastartovaných vlaků dopravce ARRIVA vlaky s.r.o. v železniční stanici (tzn. celá denní doba 16 hod kromě odjezdů a příjezdů vlaků dopravce ARRIVA vlaky s.r.o.). Ve výpočtech noční doby byla použita doba stání 25 minut po každém příjezdu/před každým odjezdem s výjimkou prvního ranního odjezdu ve 4:30 hod, před kterým byla použita doba stání 45 minut.

Měření bylo provedeno, zpracováno a hodnoceno standardně podle MNKom.^[3]

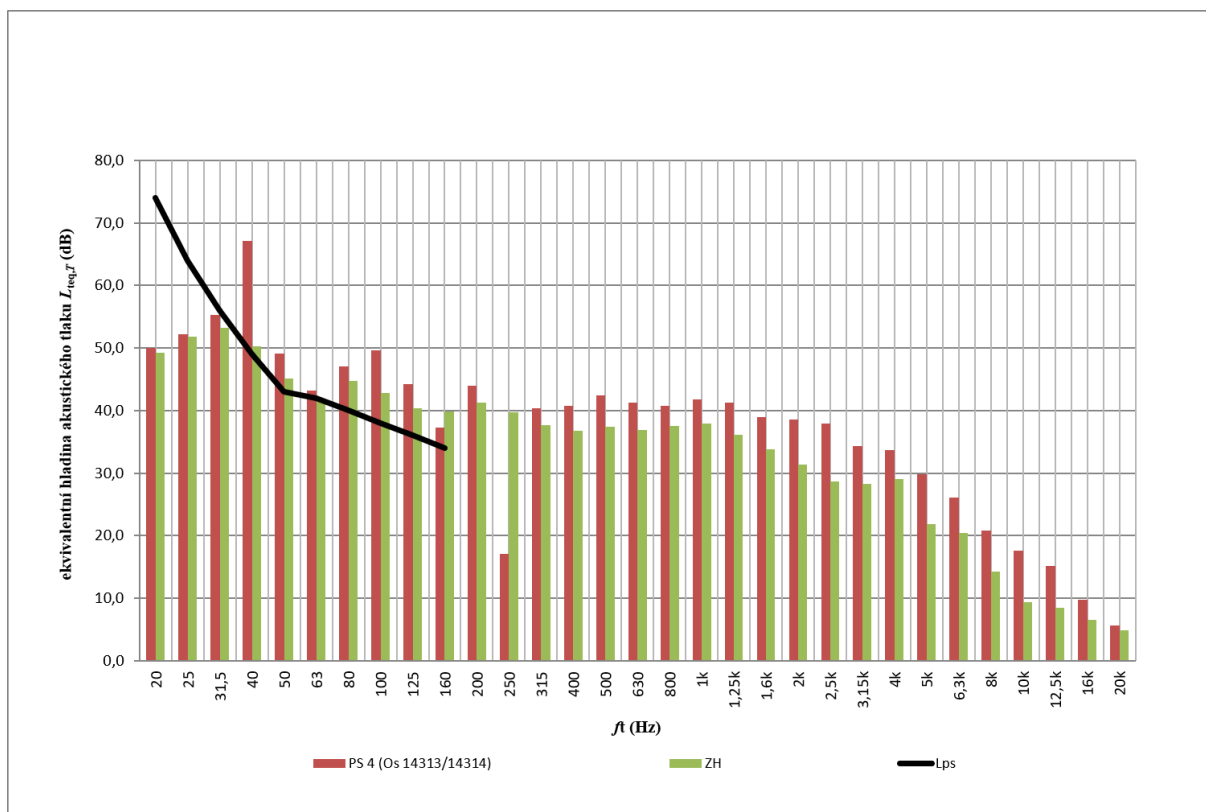
2.2. Vyhodnocení měření

V následujících obrázcích 1. a 2. je vidět přítomnost výrazných tónových složek. Červená křivka znázorňuje práh slyšení podle Přílohy č. 1. NV.^[2] Světle modrá křivka zbytkový hluk (ZH)

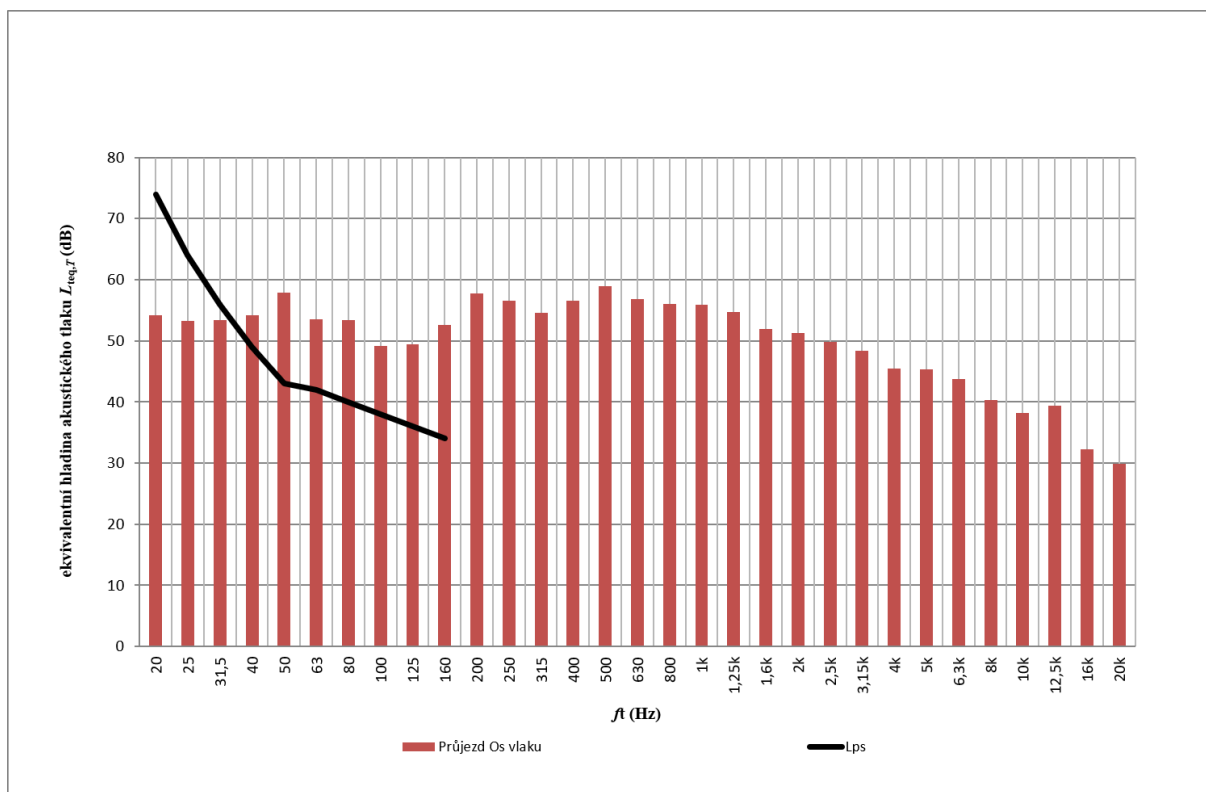
Obr. 1. Frekvenční spektrum v třetinooktávových pásmech v provozním stavu (PS) 2 – stání vlaků dopravce České dráhy, a.s.



Obr. 2. Frekvenční spektrum v třetinooktávových pásmech v provozním stavu (PS) 4 – stání vlakov dopravce ARRIVA vlaky s.r.o.



Obr. 3. Frekvenční spektrum v třetinooktávových pásmech při průjezdu vlaku



I z průběhu třetinooktávních spekter vyplývá, že se jedná zcela jednoznačně o jiný charakter akustického signálu (hluku), než který vydává jedoucí vlaková souprava na „širé trati“ (styk kolejnice s kolem); jedná se o jiný typ zdroje hluku, a to stacionární (hluk z chladících jednotek, hluk z vytápění souprav, hluk z motorické části souprav), většinou s přítomností tónové složky a vyšším podílem nízkofrekvenčního hluku. Naše výsledky jsou tak v souladu se zprávou Evropské komise ^[4], která slouží jako hlavní praktická příručka pro příslušné orgány členských států EU při plnění požadavků Směrnice o hlukovém prostředí (END) ^[5]. Ve zprávě Evropské komise se v kapitole 8.3.2 uvádí, že moderní vlaky jsou obvykle vybaveny velkým množstvím technických agregátů (např. klimatizace, elektrické zásuvky), aby se cestujícím pohodlněji cestovalo. Vlaky parkují na kolejištích, která se často nacházejí v železničních stanicích poblíž obytných oblastí nebo v jejich blízkosti. V pozdních večerních hodinách, tj. pozdě večer nebo brzy ráno, vlaky stojí na volnoběh se stále aktivním externím zařízením, protože se připravují na vypnutí nebo spuštění, nebo je prováděna údržba a čištění, což vede k obtěžování a rušení spánku hlukem z těchto zařízení. Kompresory, chladicí ventilátory a vzduchová čerpadla jsou často na střeše vlaků.

3. Závěr

Postup hygienické služby při hodnocení hluku z odstavených vlakových souprav jako hluku ze stacionárních zdrojů je odborně správný.

Je nutné se zaměřit na možná opatření ke snížení hluku jako např.:

- opatření týkající se vlastních drážních vozidel, jako je akustické kapotáže hlučných komponentů, tlumiče sání a výdechů, akusticky optimalizované přírůdky vzduchu a snížené otáčky ventilátorů;
- optimalizace míst pro odstav vlakových souprav s cílem zajistit, aby hlučné vlaky byly odstavovány daleko od obytných budov, výstavba protihlukových bariér kolem odstavných kolejí.
- provozní (organizační) postupy pro omezení používání klimatizace nebo omezení doby provozu na dobu nezbytně nutnou, spolupráce s výrobcí kolejových vozidel na zavedení režimů parkování s nízkou hlučností pro nová nebo stávající vozidla.

Literatura

- [1] Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Sbírka zákonů ČR, ISSN 2336-517X <https://www.aspi.cz/products/lawText/1/49577/1/2/zakon-c-258-2000-sb-o-ochrane-verejneho-zdravi-a-o-zmene-nekterych-souvisejicich-zakonu?vtextu=Z%C3%A1kon%20%C4%8D.%20258/2000%20Sb.>
- [2] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů ISSN 2336-517X. <https://www.aspi.cz/products/lawText/1/74904/1/2.>
- [3] Metodický návod MZ ČR pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí, Věstník MZ ČR, částka 14/2023, ze dne 25.10.2023.
- [4] Technical support for Noise Action Plans Measures and tools for Competent Authorities to reduce environmental noise under the Environmental Noise Directive, EC, January 2026.
- [5] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2002/49/ES ze dne 25. června 2002 o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí; 2002 červenec 18; L189/12.

Noise issues from parked railway vehicles and train sets

David Kresl, Dana Potužníková,

Public Health Institute Ostrava,

Partyzánské nám.2633/7, Moravská Ostrava,702 00 Ostrava, Czech Republic

e-mail: david.kresl@zuova.cz

Abstract

The issue of assessing noise from the operation of parked railway vehicles and train sets has recently been discussed in professional and legal circles. Although the Ministry of Health and the National Reference Laboratory for Municipal Noise consider the current legislation to be sufficient, there is repeated pressure from railway operators or owners to change the current legislation and methodological guidelines. The cause is complaints about long-term parking of parked trains, which disturbs and annoys the population with noise. Due to repeated complaints from citizens, this issue is addressed by the hygiene service and subsequently by the Railway Administration, s.o. in various locations in the Czech Republic. Complaints mainly concern noise at night. The issue of assessing noise from parked trains has been addressed practically continuously since 2020. The contribution summarizes the legislation and methodological approach of the hygiene service.

Strategické hlukové mapování popáté...

Eliška Kobzová, Pavel Junek

Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Partyzánské náměstí 2633/7, Moravská Ostrava, 702 00 Ostrava

e-mail: eliska.kobzova@zuova.cz

Abstrakt

Strategické hlukové mapy poskytují přehled o tom, kde a v jaké míře jsou obyvatelé vystaveni hluku ze silniční, železniční a letecké dopravy nebo jaká je hluková situace v aglomeracích. Dle Světové zdravotnické organizace je v současnosti hluk druhou nejzávažnější škodlivinou působící na lidské zdraví. Tento článek představuje páté kolo strategického hlukového mapování v České republice a přibližuje jeho význam. Vysvětluje, proč se hluk pravidelně mapuje, jaká data jsou pro tvorbu map využívána a jak lze výsledné mapy interpretovat. Pozornost je věnována také hlavním ukazatelům hluku (L_{dvn} a L_n) a jejich mezním hodnotám a dále návaznosti akčních plánů a protihlukových opatření na mapování. Část článku je zaměřena na legislativní rámec, který strategické hlukové mapování v České republice a Evropské unii upravuje. Hlavním cílem článku je srozumitelně přiblížit páté kolo strategického hlukového mapování a ukázat, jak mohou jeho výsledky přispět k lepšímu pochopení hlukové zátěže a k plánování opatření na její snížení.

1. Úvod

Zvuky jsou přirozeně všude kolem nás, jsou projevem přírodních dějů i varovnými signály. Člověku slouží k přijímání významného podílu informací z okolí i jako základní komunikační prostředek. Sluch řadíme mezi jeden z lidských smyslů, který je neustále v pohotovosti a jehož úplné vypnutí je nemožné. Pomáhá člověku rozlišit zdroj zvuku a jeho lokalizaci v prostoru. V případě, že se jedná o zvuk rušivý, obtěžující, až škodlivý mluvíme o hluku, jehož stupeň tolerance se u každého člověka liší. Účinky hluku poté dle jeho trvání rozlišujeme na akutní (projevující se poškozením sluchového aparátu, zvýšením krevního tlaku, zrychlením tepové frekvence) a chronické (zhoršení kvality spánku, zvýšený stres, porucha soustředění).^[1]

Více než 20 % evropské populace je vystaveno škodlivým hladinám hluku z dopravy ^[2] a pokud vezmeme v úvahu striktnější hladiny doporučené Světovou zdravotnickou organizací (World Health Organisation, WHO), jde asi o 30 % populace. Důraz z EU i od WHO na snižování hluku z dopravy (např. používání tichých povrchů, snižování hluku pneumatik v silniční dopravě) je na opačné straně narušován stále se zvyšujícím počtem aut.

Nejen proto se v roce 2002 evropské státy dohodly na důležitosti snižování hluku a zachovávání tichých míst. Při této příležitosti byla vydána směrnice 2002/49/ES ^[3], která stanovuje povinnost mapování hlukové situace v okolí významných zdrojů hluku každých pět let a následné navržení opatření ke snížení hluku v kritických místech určených mapováním. Strategické hlukové mapy (SHM) řeší mapování hluku v okolí hlavních zdrojů a v aglomeracích a navazující akční plány (AP) navrhuje opatření ke snížení hluku. Bez těchto opatření je nepravděpodobné, že cíle EU v oblasti snižování hlukové zátěže budou dosaženy, pokud nebude naplňována koordinace spolupráce mezi obcemi a státem v oblasti návrhů těchto opatření.

2. SHM a legislativa

Jak již bylo zmíněno, právní základ pro tvorbu SHM v České republice vychází především z evropské legislativy, konkrétně ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES ze dne 25. června 2002, o hodnocení a řízení environmentálního hluku.^[3] Směrnice vytváří základ pro hodnocení hlukové zátěže obyvatelstva, strategické hlukové mapování, tvorbu AP a informování veřejnosti. SHM jsou pak dle této směrnice nástrojem k celkovému posouzení expozice hluku v určité oblasti a k poskytování souhrnných údajů o této expozici. Pravidelný pětiletý cyklus také zajišťuje, že jsou údaje o hlukové zátěži aktualizovány a následně využívány při plánování protihlukových opatření.

V roce 2015 byla vydána Směrnice Komise (EU) 2015/996, o stanovení společných metod hodnocení hluku podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES.^[4] Tato směrnice definuje novou jednotnou metodiku výpočtu SHM v členských zemích EU CNOSSOS-EU. Členské státy jsou od 31.12.2018 povinny tuto metodiku používat pro výpočty SHM.

Jedním z hlavních požadavků evropské legislativy je používání jednotných hlukových ukazatelů v rámci SHM, kdy byly stanoveny ukazatele L_{dvn} (den-večer-noc, indikátor pro celkové obtěžování hlukem) a L_n (noc, hlukový indikátor pro rušení spánku). Jednotlivé hlukové indikátory představují dlouhodobou průměrnou denní hodnotu za období jednoho kalendářního roku. Pomocí těchto ukazatelů se identifikují problémové oblasti (tzv. hot-spots), na jejichž základě jsou poté vypracovávány AP snižování hluku^[3], které mohou obsahovat například opatření v oblasti dopravy, územního plánování nebo technická opatření ke snížení hlukového zatížení obyvatel. Součástí AP je vymezení tichých oblastí v aglomeracích a ve volné krajině, zajišťující ochranu území nezatížených hlukem.

Na evropskou úpravu navazuje český právní řád především prostřednictvím zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů.^[5] Tento zákon upravuje mimo jiné ochranu obyvatelstva před nepříznivými účinky hluku a stanovuje kompetence jednotlivých orgánů veřejné správy. SHM jsou zakotveny v § 80 odst. 1 písm. q)-u). V českém právním prostředí je však nutné rozlišovat systém strategického hlukového mapování od regulace hluku prostřednictvím hygienických limitů, kdy tuto oblast upravuje zejména nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.^[6] Nařízení stanovuje hygienické limity hluku a vibrací, podmínky jejich hodnocení a požadavky na měření. Mezní hodnoty uvedené v SHM proto nemusí být totožné s hygienickými limity stanovenými tímto nařízením. Konkrétní postupy zpracování SHM a AP upravuje v České republice vyhláška č. 315/2018 Sb., o strategickém hlukovém mapování.^[7] Tato vyhláška zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje mezní hodnoty hlukových ukazatelů, jejich výpočet pro hluk vytvářený silniční, železniční a leteckou dopravou a hluk pocházející z průmyslových zařízení, dále stanovuje základní požadavky na obsah strategických hlukových map a AP, konkretizuje podrobnosti ke způsobu informování veřejnosti o strategických hlukových mapách a AP. Pro vypracování těchto AP byl v roce 2023 vydán Ministerstvem zdravotnictví Metodický návod.^[8] Důležitým aspektem právní úpravy je rovněž informování veřejnosti srozumitelným a dostupným způsobem.^[3]

3. SHM popáté

V současné době Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě intenzivně pracuje na přípravě dat pro 5. kolo SHM, aby poté byly vstupem do výpočtových modelů hluku. Ty následně poskytnou přehled o tom, kde a v jaké míře jsou obyvatelé vystaveni hluku v aglomeracích a v okolí hlavních silnic, železnic a letišť.

Přesněji se mapují silnice s více než 3 miliony průjezdů vozidel ročně, železnice s více než 30 000 průjezdů vlaků ročně, letiště s více než 50 000 vzletů a přistání ročně a aglomerace Praha, Brno, Ostrava, Plzeň, Olomouc, Liberec-Jablonec nad Nisou a Ústí nad Labem-Teplice.

SHM jsou vytvářeny výpočtem, z toho plyne, že celková kvalita závisí na kvalitě vstupních dat, kvalitě aproximace chybějících dat, použitém výpočtovém softwaru (SW) a konkrétní implementaci výpočtové metodiky CNOSSOS-EU v použitém SW.

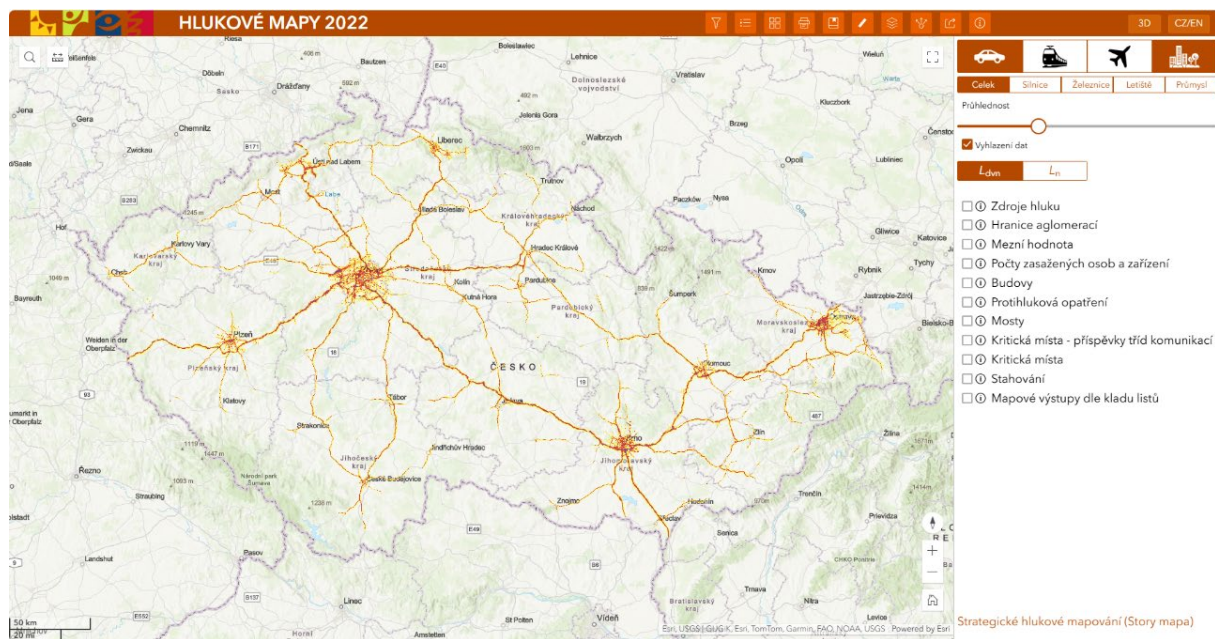
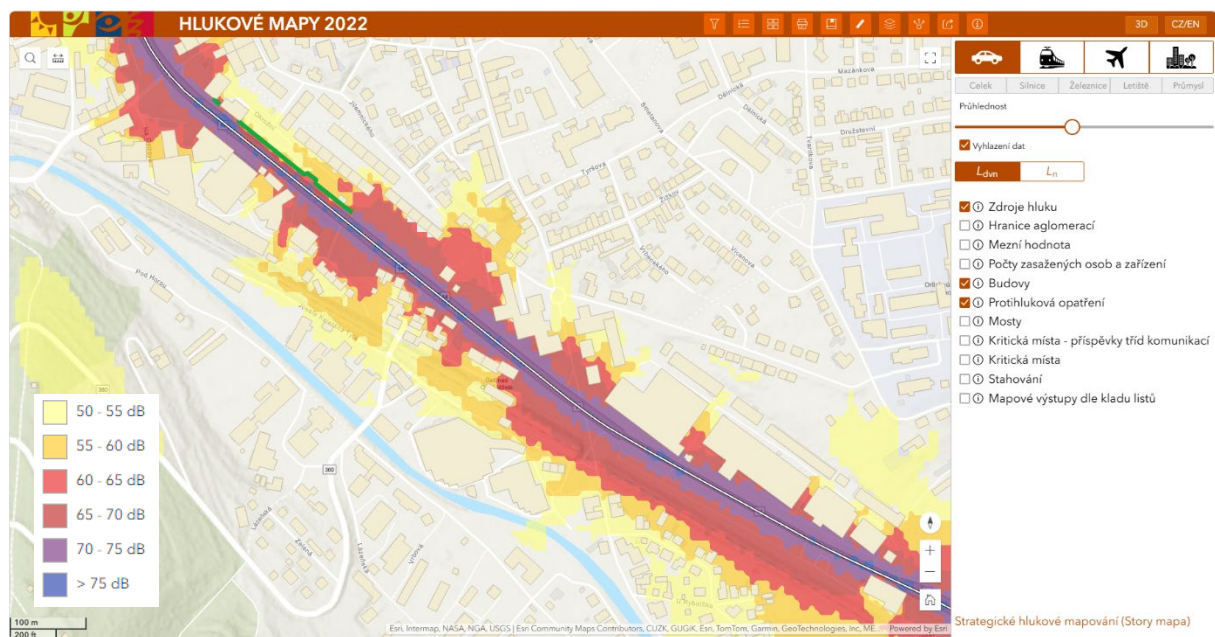
Mezi základní vstupní data patří pozice budov, výškopis (Český úřad zeměměřický a katastrální - Zabaged®), adresní body a územní členění ČR (Český statistický úřad), linie a pasport komunikací (Ředitelství silnic a dálnic s.p., Silniční databanka Ostrava), celostátní sčítání dopravy (Ministerstvo dopravy), linie a parametry kolejí, počty a parametry vlaků (Správa železnic s.o.), vybraná data pro území aglomerací (krajské úřady, magistráty měst, dopravní podniky) a také data o krajinném pokryvu Corine (Česká informační agentura životního prostředí).

Už nyní lze popsat první limitace u vstupních dat, kdy v České republice dosud není dostupná mapová vrstva jednotlivých budov s přiřazenou výškou nebo není vždy přesná a kompatibilní poloha adresního bodu vůči budově. I přes snahy vstupní data co nejvíce zpřesnit, mohou být tedy výsledky těmito nepřesnostmi ovlivněny.

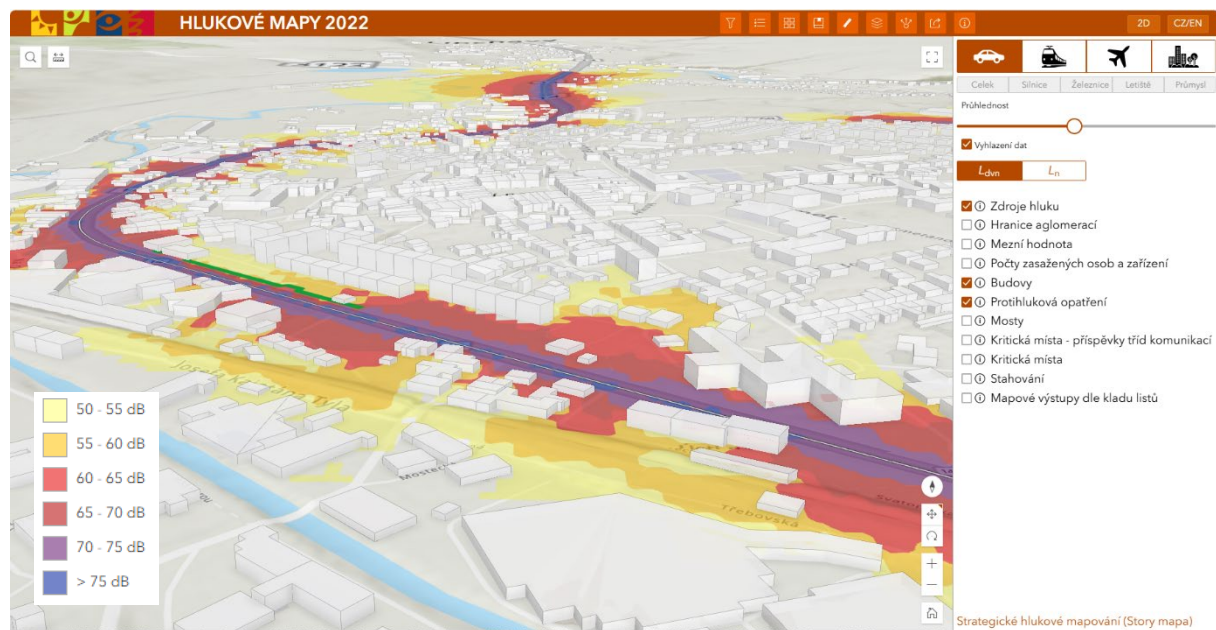
V první fázi tvorby SHM je potřeba vytvořit model území (linie komunikací, terén, budovy, protihlukové stěny, typ povrchů vozovek). Např. úprava a kontrola dat budov a správného přiřazení adresních bodů probíhá na první 2D úrovni v programu ArcGIS Pro^[9] ve stanovené vzdálenosti od zdrojů hluku (tzv. buffery). Linie komunikací se následně segmentují podle parametru intenzity dopravy z Celostátního sčítání dopravy (aktuálně 2025). V tu chvíli přichází v úvahu další parametry – rychlost, šířka vozovky nebo typ povrchu komunikace u silnic, dále rychlost, typ vlaků, brzd či kolejí u železnic a např. počet a typ letadel, letové trajektorie a časové rozložení provozu u letišť. Podstatné je, že hluk se šíří v prostoru, a tak pro správné výpočty jsou potřeba následně správná 3D data (modelování mostů a protihlukových stěn v návaznosti na terén). To probíhá již ve výpočtovém softwaru LimATM^[10], kde po vytvoření modelu proběhne vlastní výpočet SHM.

Výsledkem výpočtu a následného zpracování těchto dat jsou mapy 5 dB pásem hluku v okolí hlavních zdrojů hluku (ukázka Obr. 1, 2, 3), tabulky s počtem hlukem zasažených osob, budov pro bydlení, škol a nemocnic, celorepublikové souhrny. Výsledkem je také určení kritických míst (hot-spots), což jsou oblasti s nejvíce osobami zatíženými hlukem nad stanovenými mezními hodnotami. Tato místa jsou výchozím bodem pro tvorbu AP.

Obr. 1 Mapa aglomerací a silniční sítě v České republice zahrnutých do SHM

zdroj: <https://geoportal.mzcr.cz/shm/?locale=cs2>Obr. 2 Ukázka strategické hlukové mapy zobrazující dlouhodobou expozici obyvatel hluku ze silniční dopravy (ukazatel L_{dvn})zdroj: <https://geoportal.mzcr.cz/shm/?locale=cs2>

Obr. 3 Ukázka strategické hlukové mapy ve 3D zobrazující dlouhodobou expozici obyvatel hluku ze silniční dopravy (ukazatel L_{dvn})



4. Závěr

Páté kolo SHM navazuje na předchozí kola a přinese další aktualizaci informací o hlukové zátěži v České republice, kterou lze následně vyhodnotit a zjistit, ve kterých oblastech je situace nejproblematictější. SHM tak převádějí složitou problematiku environmentálního hluku do podoby, která je využitelná pro veřejnou správu, odborníky i veřejnost a dávají základ pro tvorbu AP.

Strategické hlukové mapování proto není pouze technickým výpočtem, ale jedním z nástrojů, které mohou přispět k plánování zdravějšího a příjemnějšího prostředí pro život.

Literatura

- [1] Zdravotní účinky hluku – SZÚ, navštíveno 12.8.2026
<https://szu.gov.cz/temata-zdravi-a-bezpecnosti/zivotni-prostredi/hluk/zdravotni-ucinky-hluku/>
- [2] European Environment Agency, *Environmental noise in Europe, 2025*, ISBN 978-92-9480-765-6
- [3] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES ze dne 25. června 2002 o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí; 2002 červenec 18; L189/12
- [4] Směrnice Komise (EU) 2015/996 ze dne 19. května 2015 o stanovení společných metod hodnocení hluku podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996>
- [5] Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Sbírka zákonů ČR
<https://www.aspi.cz/products/lawText/1/49577/1/2/zakon-c-258-2000-sb-o-ochrane-verejneho-zdravi-a-o-zmene-nekterych-souvisejicich-zakonu?vtextu=Z%C3%A1kon%20%C4%8D.%20258/2000%20Sb#lema0>
- [6] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů

- <https://www.aspi.cz/products/lawText/1/74904/1/2>
- [7] Vyhláška 315/2018 Sb., o strategickém hlukovém mapování ze dne 17. prosince 2018
<https://www.aspi.cz/products/lawText/1/91187/1/2>
- [8] Metodický návod pro zpracování akčních plánů protihlukových opatření podle Směrnice 2002/49/ES o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí
<https://geoportal.mzcr.cz/portal/sharing/rest/content/items/21d692b76b5e44f7b4765eb53a62ba2d/data>
- [9] Esri Inc. (2026). *ArcGIS Pro* (Version 3.7). Esri Inc.
<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- [10] Stapelfeldt GmbH (2026). *LimATM*
<https://stapelfeldt.de/en/lima>

Poděkování

Naše poděkování patří všem organizacím, které svá data udržují aktuální a neustále je zpřesňují (MD, ČÚZK, ZÚ, CENIA, ČSÚ, ŘSD, SŽ, KU, města, obce, a další).

Mapovou aplikaci ze 4. kola SHM lze najít na <https://geoportal.mzcr.cz/shm> spolu se story mapou přibližující informace v rámci SHM.

5th round of strategic Noise Mapping in the Czech Republic

Eliška Kobzová, Pavel Junek

Public Health Institute Ostrava

Partyzánské náměstí 2633/7, Moravská Ostrava, 702 00 Ostrava

e-mail: eliska.kobzova@zuova.cz

Abstract

Strategic noise maps provide an overview of where and to what extent residents are exposed to noise from road, rail and air traffic, as well as of the noise situation in urban agglomerations. According to the WHO, noise is currently the second most significant environmental pollutant affecting human health. This article presents the fifth round of strategic noise mapping in the Czech Republic and explains its importance. It describes why noise is regularly mapped, what data are used to create the maps, and how the resulting maps can be interpreted. Particular attention is paid to the main noise indicators (L_{den} and L_{night}), their limit values, and the links between noise mapping, action plans and noise mitigation measures. The article also addresses the legislative framework governing strategic noise mapping in the Czech Republic and the European Union. The main aim of the article is to provide a clear and accessible introduction to the fifth round of strategic noise mapping and to demonstrate how its results can contribute to a better understanding of noise exposure and to the planning of noise reducing measures.

Úloha akustického modelování při vyhodnocování rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření

Vítězslav Krivánek¹, Blanka Hablovičová¹, Aleš Peiger¹, Dana Potužníková²,
Vojtěch Máca³, Ondřej Volf², Jiří Michalík²

¹ Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

² Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Partyzánské nám.2633/7, Moravská Ostrava, 702 00, Ostrava

³ Univerzita Karlova

J. Martího 407/2, 162 00 Praha

e-mail: vitezslav.krivanek@cdv.gov.cz

Abstrakt

Posuzování rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření naráží v ČR na limity běžného strategického hlukového mapování. Tento příspěvek představuje roli detailního akustického modelování jako klíčového vstupu pro objektivní vyhodnocení přínosů a nákladů protihlukových opatření. Využitím 3D datových podkladů a výpočtem hlukové expozice na fasádách objektů s krokem po 1 dB lze podstatně zpřesnit rozřazení obyvatel do hlukových pásem pro navazující kvantifikaci hlukových externalit (společenských nákladů hluku). Získané výstupy tvoří podklad pro objektivní posouzení poměru nákladů a přínosů protihlukových opatření jak pro správce dopravní infrastruktury, tak pro orgány ochrany veřejného zdraví.

1. Úvod

Provoz na silniční a železniční síti představuje dominantní zdroj hlukové zátěže v České republice. Podle § 31 odst. 1 zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, se rozumně dosažitelnou mírou (RDM) protihlukových opatření (PHO) rozumí poměr mezi náklady na tato opatření a jejich přínosem ke snížení hlukové zátěže fyzických osob s ohledem na počet exponovaných obyvatel [1]. V praxi jde o aplikaci analýzy nákladů a přínosů (Cost-Benefit Analysis, CBA):

- Náklady: Investiční a provozní náklady vynaložené na přípravu, realizaci, provoz a údržbu PHO (např. protihlukových clon / stěn, výměny oken či nízkohlukových obrusných vrstev vozovek). Pro stanovení investičních nákladů v podmínkách ČR lze využít např. Oborový třídník stavebních konstrukcí a prací (OTSKP) [2].
- Přínosy: Úspora celospolečenských nákladů (redukce externalit) vzniklá snížením zdravotních rizik a jejich následků u dotčené populace [3].

Historické metodiky, jako byl např. švýcarský Kostennutzen Index z roku 1995 [4], pracovaly na straně přínosů pouze s celkovým akustickým útlumem opatření, nikoliv s reálným snížením škodlivých účinků na zdraví. Míra zdravotní újmy však nezávisí pouze na absolutním poklesu hladiny hluku v dB, ale především na výchozí hladině hlukové expozice.

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu TAČR č. CL02000043 (RODOMI) a zaměřuje se na klíčovou roli detailního akustického modelování jako primárního vstupu pro kvantifikaci hlukových externalit při posuzování RDM.

2. Metodika výběru reprezentativních lokalit

Pro kalibraci metodiky a nastavení vztahů hlukových externalit bylo nutné identifikovat a prověřit vhodné zájmové lokality v ČR. Pro akustické modelování a pro navazující terénní a analytické práce v projektu je velice důležitá volba lokalit. Jejich výběr vycházel ze tří skupin kritérií:

1. Akustická kritéria: Základem byla dominance posuzovaného zdroje hluku (silniční nebo železniční doprava) s minimálním rušením ostatními zdroji v pozadí. V prostředí GIS byly provedeny rozbory nad vrstvami Strategického hlukového mapování (SHM) zveřejněné roku 2022 [5, 6, 7] s cílem identifikovat obce či jejich části s nadlimitní expozicí.
2. Sociodemografická reprezentativnost: Propojily se datové sady SHM 2021 s výsledky Sčítání lidu, bytů a domů 2021 (Český statistický úřad) [8]. Data o věkové struktuře, vzdělání a typu bydlení posloužila k identifikaci sociodemografických odchylek na úrovni obcí, které by mohly zkreslit navazující dotazníková šetření vnímaného obtěžování.
3. Praktická validace: Do výběru cíleně nebyly zařazeny úseky se souběhem silniční a železniční dopravy z důvodu jednoznačné odlišitelnosti a identifikace dominantního zdroje hluku (silnice/železnice). Finální výběr lokalit byl uzavřen po konzultaci s klíčovými správci infrastruktury – Ředitelstvím silnic a dálnic s. p. (ŘSD) a Správou železnic, s. o. (SŽ).

3. Akustické modelování

Na vytipovaných lokalitách probíhá detailní akustické modelování podpořené ověřovacími měřeními hlučnosti v terénu a sociologickým dotazníkovým šetřením. Cílem je propojit vypočtenou akustickou zátěž se subjektivně vnímaným obtěžováním a zdravotními dopady na obyvatelstvo.

3.1. Zjemněný výpočet expozice s krokem po 1 dB

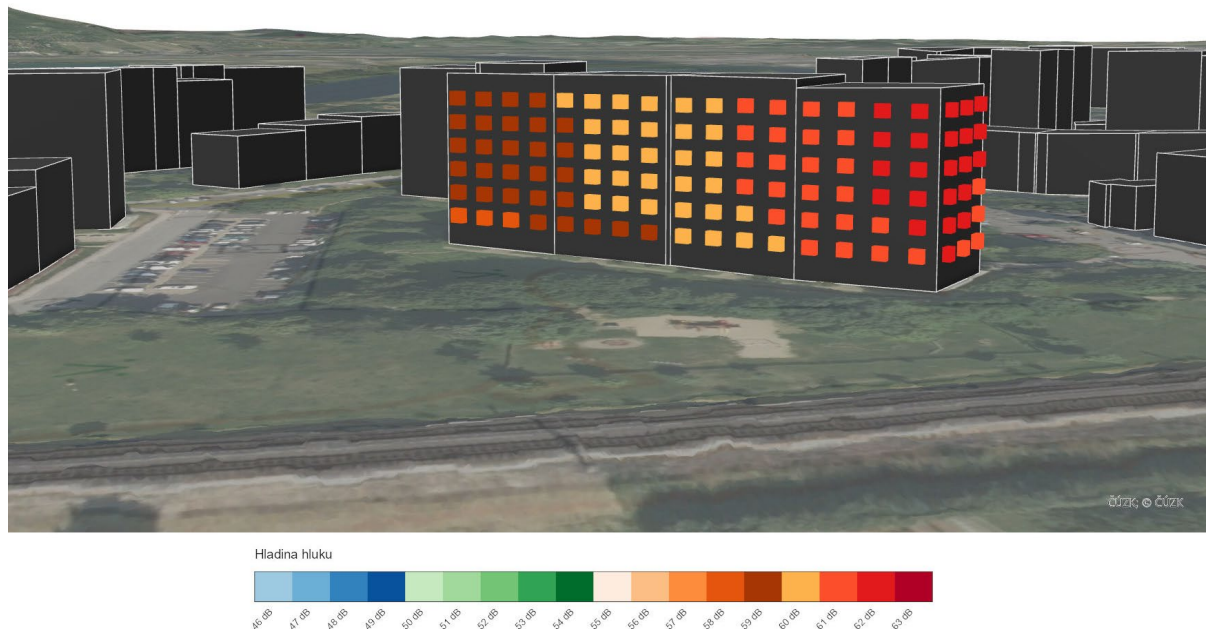
Strategické hlukové mapování zpracovávané podle evropské směrnice 2002/49/EC [5] obvykle pracuje s hlukovými pásmy po 5 dB. Výsledky SHM slouží jako globální strategický podklad pro identifikaci problémových území, nikoli však pro řešení detailních akustických poměrů v konkrétní ulici či u konkrétního bytového domu [9]. Pro potřeby exaktního hodnocení RDM a výpočtu externalit má však tento rastr nedostatečnou podrobnost a je málo detailní. Projekt RODOMI proto využívá zjemněné akustické modelování s již zmíněným krokem po 1 dB včetně nejaktuálnějších vstupních dat [10].

3.2. Využití aktuálních 3D datových podkladů a vliv výšky budov

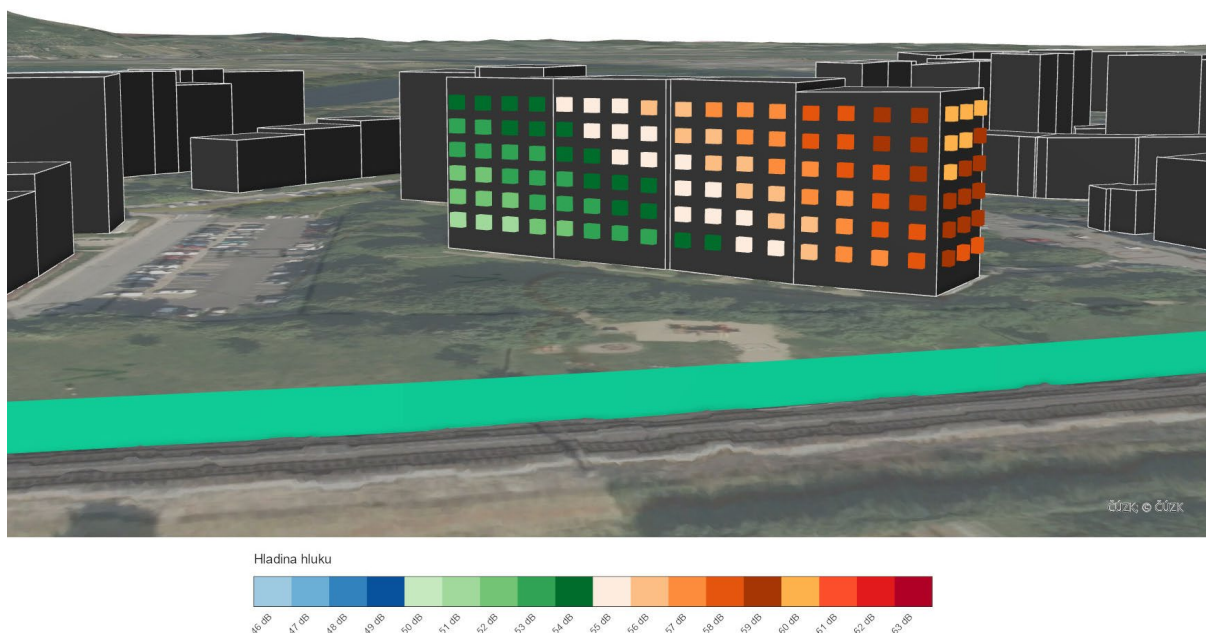
Akustické modelování je nezbytné realizovat výhradně z aktuálních a detailních datových podkladů. Starší či zjednodušené podklady neposkytují dostatečně přesnou představu o reálné 3D geometrii zástavby a terénních překážek. Při modelování hlukové zátěže totiž i malé odchylky ve výškovém uspořádání budov vedou k výrazným chybám. Starší datové sady často pracovaly pouze s 2D půdorysy a výšku objektů pouze odhadovaly, což znemožňovalo přesně spočítat rozsah akustického stínu, který budova vrhá na své okolí, i reálné stínění terénními překážkami. Na přesnost akustických výpočtů zátěže obyvatelstva má přímý vliv zvolená metodika vyhodnocení hluku na fasádě. Výsledky se mohou lišit podle toho, zda se vychází z průměrné hlukové expozice, mediánu, či maximálních hodnot. Využití maximálních hodnot může

vést k významnému zkreslení zatížení zde žijícího obyvatelstva, pokud celé budově přiřazujeme pouze špičkovou hodnotu, jež může být dosažena i na méně než 1% celé plochy budovy [10].

Obr. 1. Výpočet zatížení budovy (obyvatel) hlukem (po 1 dB) bez protihlukového opatření, hlukový indikátor pro denní dobu ($L_{Aeq,16}$).



Obr. 2. Výpočet zatížení budovy (obyvatel) hlukem (po 1 dB) s protihlukovým opatřením, hlukový indikátor pro denní dobu ($L_{Aeq,16}$).



Aktuální a detailní podklady jsou zcela nezbytné pro správné zachycení specifického chování hluku ve vertikálním profilu budovy. Šíření akustické energie z dopravního koridoru se totiž v jednotlivých patrech zásadně liší – zatímco spodní podlaží mohou být stíněna terénem nebo protihlukovou clonou, vyšší patra bývají vystavena přímému přenosu hluku, přičemž s rostoucí vzdáleností od zdroje se tyto

akustické poměry mohou dále měnit, viz obr. 1 a obr. 2. Bez přesných výškových dat nelze obyvatele správně alokovat do hlukových pásem podle jejich reálného umístění v objektu. Jelikož je přesné určení hlukové expozice populace primárním vstupem pro kvantifikaci hlukových externalit a následnou analýzu nákladů a přínosů (CBA), zkreslení výškových poměrů by přímo vedlo k systematickému zkreslení počtu exponovaných osob a následně ke znehodnocení celého výpočtu rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření.

3.3. Propojení modelování s oceněním externalit a návrhem protihlukových opatření

Detailní akustický model neslouží pouze k popisu stávajícího stavu, ale využívá se i k simulaci variantních scénářů:

1. Simulace účinku opatření: Model dokáže nasimulovat akustický účinek konkrétních protihlukových opatření (např. protihlukových stěn různé výšky či nízkohlučných povrchů) a vyčíslit, o kolik dB se sníží zátěž u konkrétních budov a obyvatel. Ukázka simulace šíření hluku s rozlišením po 1 dB na jednotlivá okna obytné vícepodlažní budovy bez a s protihlukovou stěnou je na obr. 1 a obr. 2.
2. Vstup pro ekonomické ocenění (externality): Výstupy z modelování jsou podkladem pro navazující dotazníkové šetření v exponovaných lokalitách a pro ekonomické vyčíslení snížení zdravotních dopadů a obtěžování hlukem (tzv. ocenění externalit).
3. Porovnání s náklady (RDM): Výsledek modelování umožňuje porovnat investiční a provozní náklady na protihlukové opatření (stanovené např. dle cenové databáze OTSKP) s finančně vyjádřeným přínosem pro zdraví exponovaných osob.

4. Závěr

Ačkoliv výsledky Strategického hlukového mapování představují nejkomplexnější dostupný datový soubor o hlukové zátěži v ČR, je nutné k nim přistupovat jako ke strategickému dokumentu určenému pro celkové hodnocení, nikoli pro detailní posuzování konkrétních lokalit. Pro účely stanovení rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření u konkrétních infrastrukturních staveb je nezbytné provádět detailní akustické modelování s krokem po 1 dB.

Jak bylo v příspěvku demonstrováno, správné určení hlukové zátěže populace zásadně závisí na:

- Aktuálnosti vstupních dat (dopravní intenzity, počty obyvatel).
- Metodice rozpočítání obyvatelstva ve vertikálním profilu budov (zohlednění reálné 3D geometrie a pater).
- Volbě reprezentativní metriky hlučnosti na fasádě (přednost průměru/mediánu před maximem).

Zjemněné akustické modelování navazující na terénní měření a dotazníkové šetření v rámci projektu RODOMI umožní přechod od teoretického posuzování útlumu v decibelech k adresnému oceňování zdravotních a společenských přínosů. Vyvíjené metodiky poskytnou správcům dopravní infrastruktury (ŘSD, SŽ) i orgánům ochrany veřejného zdraví transparentní a exaktní nástroj pro rozhodování o efektivní alokaci veřejných prostředků do protihlukových opatření.

Literatura

- [1] HELLMUTH, T., D. POTUŽNÍKOVÁ, P. BEDNARČÍK a Z. FIALA. Návrh metodiky "Stanovení rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření". *Hygiena*. 2014, 59(1), 27–31.
- [2] Oborový třídník stavebních konstrukcí a prací (OTSKP). Státní fond dopravní infrastruktury. [Online] 24. 4. 2026 [cit. 18. 8. 2026]. Dostupné z: <https://sfdi.gov.cz/cenove-databaze/otskp/>
- [3] World Health Organization. *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018. ISBN 978-92-890-5356-3.
- [4] DANTHINE, R. a J. OERTLI. Beurteilungskriterien für Lärmschutzmassnahmen. *Schweizer Ingenieur und Architekt*. 1995, 113(35), 754–759.
- [5] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*. 2002, L 189, 12–25.
- [6] KEPHALOPOULOS, S., M. PAVIOTTI a F. ANFOSSO-LÉDÉE. *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. ISBN 978-92-79-25281-5.
- [7] Hlukové mapy 2022 CZ. *Geoportál Ministerstva zdravotnictví*. [Online] 6. 11. 2023 [cit. 18. 8. 2026]. Dostupné z: <https://geoportal.mzcr.cz/shm/?locale=cs>
- [8] Sčítání 2021. *Český statistický úřad*. [Online] 2022 [cit. 18. 8. 2026]. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/scitani-2021>
- [9] European Environment Agency. *Environmental noise in Europe – 2020. Report No. 22/2019*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. ISBN 978-92-9480-209-5.
- [10] KŘIVÁNEK, V. et al. *Úloha akustického modelování při vyhodnocování rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření*. Silniční obzor, 2025.

Poděkování

Tento příspěvek byl financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy ČR v rámci Programu DOPRAVA 2030, v rámci řešení projektu CL02000043 Hodnocení rozumně dosažitelné míry protihlukových opatření v dopravě.

The role of acoustic modelling in evaluating the reasonably achievable level of noise reduction measures

Vítězslav Křivánek¹, Blanka Hablovičová¹, Aleš Peiger¹, Dana Potužníková², Vojtěch Máca³, Ondřej Volf², Jiří Michalík²

¹ *Transport Research Centre*

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

² *Public Health Institute Ostrava*

Partyzánské nám.2633/7, Moravská Ostrava,702 00, Ostrava

³ *Charles University*

J. Martího 407/2, 162 00 Praha

e-mail: vitezslav.krivanek@cdv.gov.cz

Abstract

Assessing the reasonably achievable level of noise mitigation measures in the Czech Republic is constrained by the limitations of conventional strategic noise mapping. This paper presents the role of detailed acoustic modelling as a key input for the objective evaluation of the benefits and costs of noise mitigation measures. By using 3D data and calculating noise exposure at building façades in 1 dB increments, the accuracy of assigning residents to noise exposure bands can be substantially improved, providing a more precise basis for the subsequent quantification of noise externalities (the social costs of noise). The resulting outputs provide a basis for an objective assessment of the cost-benefit ratio of noise mitigation measures, both for transport infrastructure managers and public health authorities.

Když hluk řídí dopravu: Smart technologie pro tišší silnice

Ing. Libor Ládyš, Ing. Martin Ládyš

EKOLA group, spol. s r.o.,

Mistrovská 558/4, 108 00 Praha 10

e-mail: libor.ladys@ekolagroup.cz; martin.ladys@ekolagroup.cz

Abstrakt

Hluk z provozu na pozemních komunikacích patří mezi významné environmentální zátěže a je nutným podkladem povolovacích procesů, veřejných připomínek ale i předmětem stížností obyvatel. Přestože existuje řada stavebních a technických protihlukových opatření, v některých situacích – zejména při průjezdech silničních tahů intravilány měst a obcí nebo v blízkosti obytné zástavby u obchvatů – mohou být možnosti jejich uplatnění omezené nebo již vyčerpané. Příspěvek představuje možnost aktivního snižování hlukové zátěže dopravního proudu pomocí inteligentního monitorovacího a predikčního systému. Ten vychází z dlouhodobé historie měřených dat, aktuální akustické, dopravní a meteorologické situace a z dynamického akustického modelu běžícího na pozadí datové infrastruktury. Systém průběžně vyhodnocuje vývoj hlukového zatížení u chráněné obytné zástavby v okolí sledovaného úseku komunikace a predikuje riziko možného překročení relevantního hygienického limitu hluku na konci aktuálního hodnoceného období den/noc. Na základě této predikce algoritmus navrhuje doporučený regulační zásah, zejména dočasné omezení maximální povolené rychlosti včetně předpokládaného časového intervalu. Cílem je snížit hlukovou zátěž ze sledovaného úseku právě v čase, kdy je to skutečně potřebné, a přispět k dodržení hygienických limitů v daném období (den/noc) bez nutnosti plošných nebo trvale působících omezení.

1. Hluk, který nelze vždy odstínit

Silniční doprava je typickým příkladem zdroje hluku, který nelze jednoduše „vypnout“. Komunikace plní svou dopravní funkci nepřetržitě, zatímco její okolí je současně místem pro bydlení, odpočinek a další chráněné činnosti. Pokud je hluková zátěž na hranici přijatelnosti, bývá prvním krokem hledání klasických opatření – protihlukových stěn, úprav povrchu, zemních valů nebo opatření na budovách. Ne vždy je však pro další stavební zásah potřebný prostor. V takové situaci se naskytá otázka, zda lze hluk omezit tím, že budeme v pravý okamžik řídit samotný dopravní proud?

Právě na této myšlence je založen systém aktivního snížení hlučnosti regulací rychlosti (ASH), ověřovaný na stavbě D0 513 Silničního okruhu kolem Prahy. Nejde o trvalé snížení rychlosti na celé období dne nebo noci. Smyslem je rozpoznat situaci, kdy vývoj hlukového zatížení směřuje k riziku překročení stanovené ekvivalentní hladiny, a pouze tehdy doporučit časově omezený regulační zásah. Hluk se tak stává jedním z dalších parametrů, které mohou vstoupit do inteligentního řízení dopravy.

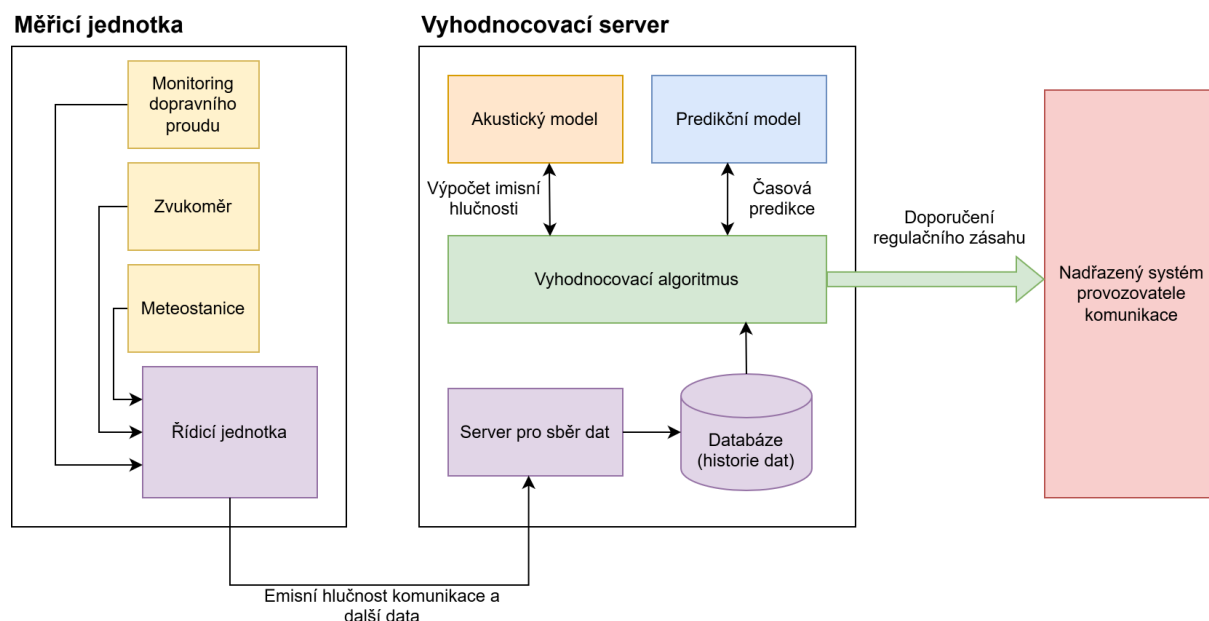
Pilotní lokalita D0 513 je pro tento přístup vhodná mimo jiné proto, že v okolí komunikace leží chráněná obytná zástavba v Jesenici, Vestci, Hodkovicích, Dolních Břežanech, Cholupicích a Komořanech. Současně je úsek vybaven portály proměnného dopravního značení, které vytvářejí technický předpoklad pro budoucí propojení akustického doporučení s liniovým řízením dopravy.

2. Neomezovat dopravu stále, ale pouze tehdy, kdy je to potřeba

Základní akustický princip je jednoduchý – změna rychlosti je jedním z parametrů, který mění hlukovou emisi dopravního proudu. Pro původně posuzované rychlostní režimy vycházelo při omezení rychlosti snížení akustické situace řádově o 2 až 3 dB. Pro denní dobu bylo například při režimu 70 km/h pro osobní i nákladní vozidla vypočteno zlepšení přibližně o 3 dB; jiné kombinace rychlostí vedly ke snížení přibližně o 2 až 2,5 dB. Pro noční dobu byly u posuzovaných variant dosaženy hodnoty kolem 2 dB.

Samotný akustický účinek však ještě nevytváří chytré řešení. Klíčová je odpověď na otázky kdy, na jak dlouho a jak výrazně rychlost snížit, aby celková ekvivalentní hladina v daném období u chráněné zástavby např. splnila hygienický limit. Trvalé omezení by působilo i v hodinách, kdy to není z hlediska hluku potřebné. Aktivní přístup proto nahrazuje princip „omezíme rychlost preventivně po celý den“ principem „omezíme ji tehdy, když z měřeného a predikovaného vývoje skutečně vyplývá potřeba zásahu“ z důvodu možného překročení limitní hodnoty.

Obr. 1. Obecný princip systému ASH – od sběru dat přes vyhodnocovací server až po doporučení regulačního zásahu.



Zdroj: EKOLA group [1]

3. Jak může silnice „vědět“, že začíná být příliš hlučná

Systém ASH nestojí na jediné naměřené hodnotě. Je navržen jako multikriteriální systém, ve kterém se propojují tři datové vrstvy: akustická, dopravní a meteorologická. Na portálech proměnného dopravního značení byly v obou směrech instalovány měřicí jednotky, které kontinuálně zaznamenávají hlukovou emisi v blízkosti komunikace. Současně jsou sledovány meteorologické podmínky a dopravní proud – intenzita, rychlost a skladba projíždějících vozidel.

Dopravní data nevstupují do systému pouze jako doplňková statistika. Monitoring využívá optické snímače a dopravní kamery; jejich úkolem je popsat provozní stav komunikace tak, aby predikční algoritmus znal nejen to, jaký hluk právě vzniká, ale také jaká doprava jej vytváří. Z hlediska hluku je významný zejména podíl nákladních vozidel a rychlost jednotlivých kategorií.

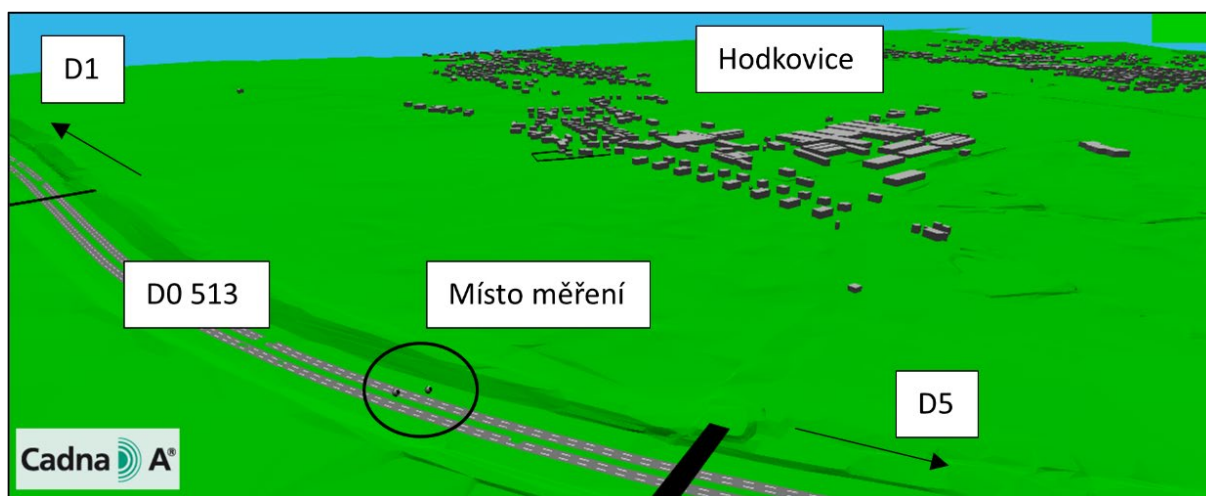
Stejně důležitá je meteorologie. Hladina naměřená u komunikace sama o sobě ještě neříká, jaká bude výsledná imise u obytné zástavby. Šíření zvuku ovlivňuje vzdálenost, profil a vlastnosti terénu, ale také rychlost a směr větru, teplota, vlhkost a srážky. Proto je mezi měřením u komunikace a vyhodnocením u chráněného objektu vložen dynamický akustický model.

3.1 Virtuální akustická situace běžící na pozadí

Pro každou konkrétní aplikaci musí být vytvořen model odpovídající skutečnému okolí sledovaného úseku. Z naměřené hlukové emise u komunikace a ze zjištěných dopravních a meteorologických dat model průběžně dopočítává imisní hodnoty v definovaných kontrolních bodech u chráněné zástavby. Model tedy představuje virtuální akustický obraz území, který se aktualizuje podle aktuálních vstupních dat. Tím odpadá nutnost trvale instalovat plnohodnotné měřicí stanice u každého chráněného objektu.

Správnost tohoto přepočtu byla ve zkušebním provozu ověřována dlouhodobým synchronním měřením v kontrolních bodech. Po kalibraci a optimalizaci modelu bylo dosaženo shody skutečně měřených a simulovaných hodnot v přesnosti do ± 2 dB. Následné ověřování v kontrolních bodech Vestec a Hodkovice ukázalo, že ve většině běžných případů výstup akustického modelu reálnou hlukovou situaci reprodukuje s dostatečnou přesností.

Obr. 2. Příklad části akustického výpočtového modelu používaného pro přepočet emisní hlučnosti na kontrolní body u chráněné zástavby.



Zdroj: EKOLA group [1]

4. Predikce místo reakce

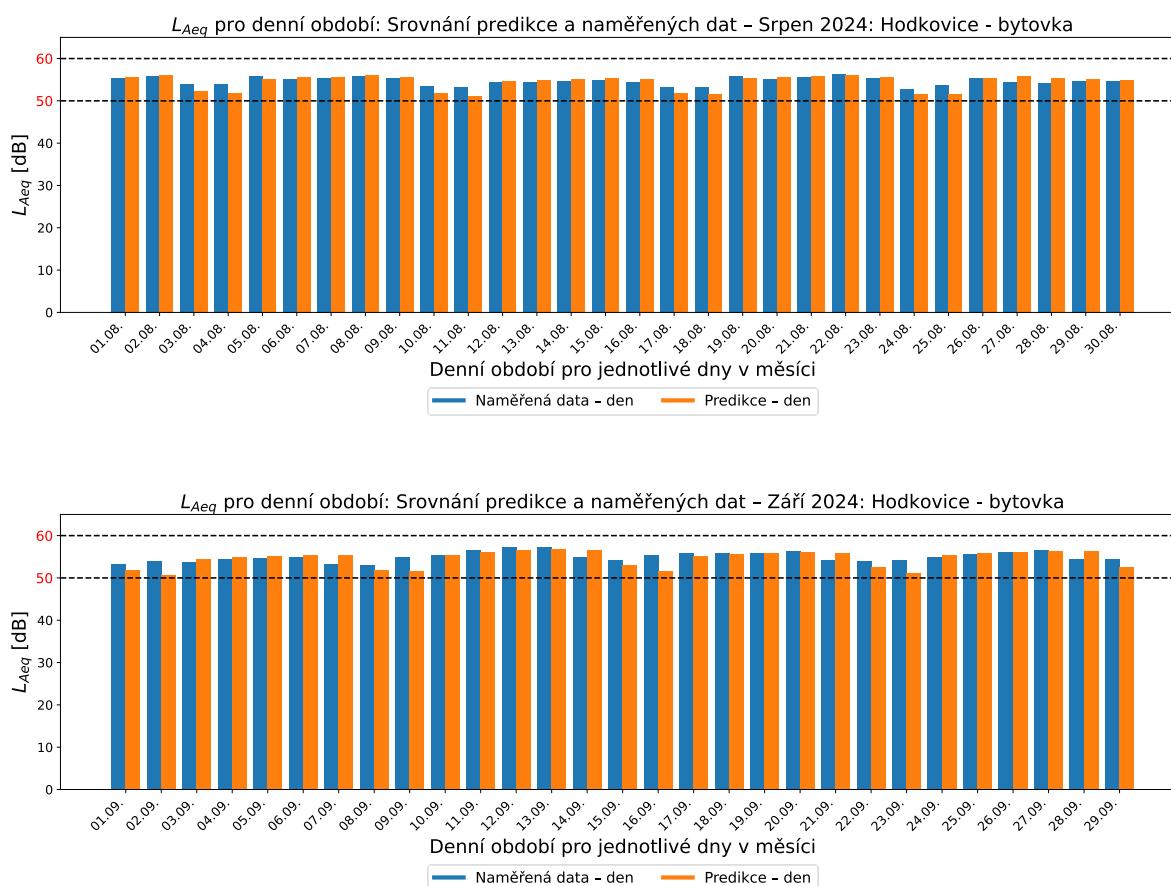
Pro aktivní řízení nestačí vědět, jaká je situace právě teď. Pokud by systém reagoval až v okamžiku, kdy je výsledná ekvivalentní hladina za denní nebo noční období již překročena, regulační zásah by přišel pozdě. Proto je druhou klíčovou vrstvou systému predikční model, který průběžně odhaduje, kam se bude výsledná hodnota L_{Aeq} do konce právě probíhajícího období vyvíjet.

Základním vstupem pro trénování pilotního modelu byly hodnoty L_{Aeq} ve 20 minutových intervalech. Model byl trénován na základních datech po dobu 84 dní a následně testován na dalších historicky naměřených datech, která nebyla součástí trénovací sady. Predikce zohledňuje denní a týdenní sezónnost a byla ověřována také s využitím dopravních a meteorologických faktorů. Pro každý okamžik daného období

Ize kombinovat již skutečně naměřenou část dne či noci s predikcí pro zbývající část období.

Prakticky to znamená, že například v průběhu večera systém již zná reálný hluk i dopravní zatížení za uplynulé hodiny a pro zbývající část nočního období doplní očekávaný vývoj. Výsledkem není jen další časová řada, ale odhad konečné ekvivalentní hladiny, a tedy i informace, zda se hodnota blíží ke kritické úrovni. Ve validačních grafech za srpen a září 2024 model věrohodně předvídal hodnotu na konci období; s přibývajícím podílem reálně naměřených hodin se predikce v některých případech dále zpřesňuje.

Obr. 3. Ukázky srovnání predikce výsledné denní LAeq se skutečně naměřenými hodnotami v kontrolním bodě.



Zdroj: EKOLA group [1]

5. Kdy se z predikce stává regulační zásah

Výstup systému je záměrně formulován jako doporučení. Jestliže predikce identifikuje riziko, že na konci aktuálního období den/noc může být překročena nastavená hodnota, algoritmus navrhne regulační zásah – především omezení maximální povolené rychlosti na sledovaném úseku. Doporučení musí obsahovat takovou podobu zásahu, aby bylo možné posoudit nejen jeho akustický účinek, ale také jeho slučitelnost s ostatními požadavky na řízení dopravy.

Tento princip je důležitý i provozně. Liniové řízení dopravy má logicky jiné, často vyšší priority: bezpečnost, mimořádné události, meteorologickou situaci nebo zachování plynulosti dopravy. Akustický požadavek proto nemůže fungovat izolovaně. Musí být jedním ze vstupů nadřazeného systému, který rozhodne, zda je v danou chvíli

možné doporučenou rychlost skutečně nastavit. Z tohoto důvodu je navrhováno předávání doporučujících signálů do velínu LŘD a následná zpětná informace o tom, zda byl zásah realizován.

Právě zpětná vazba je podstatná a nutná pro další učení modelu. Predikční algoritmus musí znát časové intervaly, ve kterých již rychlost regulována byla, jinak by mohl účinek regulace nesprávně interpretovat jako běžnou změnu hlukové situace. Pro budoucí ostrý provoz je proto nezbytné datové propojení oběma směry: systém ASH předává doporučení provozovateli komunikace a nadřazený systém vrací informaci o skutečně provedeném regulačním zásahu. I když systém může fungovat i autonomně, neboť si sám sleduje dopravní situaci, tzn. intenzitu dopravy a rychlost vozidel jednotlivých kategorií.

5.1 Simulace dříve, než se zasáhne do reálného provozu

Aby bylo možné chování systému srozumitelně vyhodnotit ještě před reálným nasazením regulace, byla vytvořena simulační aplikace. Uživatel v ní může nad historickými hlukovými a dopravními daty nastavit konkrétní rychlostní omezení a jeho časový interval a sledovat, jak se změna projeví na výsledné denní nebo noční hodnotě L_{Aeq} . Simulace tak převádí abstraktní predikční logiku do názorné otázky: o kolik a na jak dlouho je nutné rychlost snížit, aby se výsledná hluková zátěž dostala pod sledovanou hranici?

Výsledky dynamických simulací potvrdily základní závěry původního akustického posouzení o účinnosti jednotlivých rychlostních režimů. Zároveň ukázaly, že délka a intenzita zásahu nemusí být v každém dni stejná. To je podstatná výhoda aktivního přístupu: regulace se může přizpůsobovat skutečnému vývoji dopravy namísto toho, aby byla určena jednou pevnou hodnotou pro všechny provozní situace.

6. Co pilotní projekt ukázal

Zkušební provoz ukázal, že lze v jednom systému propojit dlouhodobý akustický monitoring, dopravně-inženýrská data, meteorologii, dynamický akustický model a predikci časových řad. Predikční algoritmus byl trénován a testován na reálných datech z lokality a vykázal příznivou shodu se skutečně měřenými daty jak při přepočtu emisní hlučnosti do kontrolních bodů, tak při predikci časového vývoje.

Současně pilotní projekt ukazuje hranice současného stavu. Algoritmus ještě potřebuje projít praktickým testem s reálnými zásahy do rychlosti a se zpětnou vazbou od provozovatele komunikace. Závěrečná fáze má proto zahrnovat kontrolované omezení maximální povolené rychlosti v časových intervalech, kdy to umožní bezpečnost a plynulost dopravy. Takto získaná data doplní trénovací soubor o skutečné stavy po regulačním zásahu a umožní připravit systém pro ostrý provoz.

7. Tišší silnice nemusí znamenat pomalejší silnici celý den

Aktivní regulace rychlosti není univerzální náhradou protihlukových stěn, nízkohlukových povrchů ani dalších tradičních opatření. Její potenciál je jinde. Umožňuje pracovat s časem a skutečným provozním stavem. V lokalitách, kde již nelze další stavební opatření efektivně realizovat, může být inteligentní řízení rychlosti doplňkovým nástrojem, který sníží hluk právě v období, kdy je to z hlediska výsledné ekvivalentní hladiny rozhodující.

Takový přístup může být výhodný i z hlediska přijatelnosti dopravního opatření. Namísto trvalého omezení rychlosti vzniká možnost dynamického režimu založeného

na datech. Řidič není omezen proto, že „je zde problém s hlukem obecně“, tak jako to mají např. v Německu, ale pouze v okamžiku, kdy aktuální a predikovaná situace ukazuje, že regulační zásah může mít reálný význam pro ochranu okolní zástavby.

Z pohledu smart mobility je přitom nejzajímavější změna role hluku. Dosud byl hluk zpravidla veličinou, která se měřila a následně vyhodnocovala. V systému ASH se stává aktivním provozním parametrem. Silnice tak v systému ASH získává vlastní „akustickou zpětnou vazbu“, tím pádem ví, jaký hluk vytváří, dokáže odhadnout, jak se situace vyvine, a může navrhnout reakci dříve, než je hodnocené období uzavřeno. Právě v tom spočívá princip, kdy hluk začíná řídit dopravu.

Systém ASH lze tedy využít nejen na dálnicích jako součást liniového řízení dopravy (LŘD), ale např. i na průtazích měst a obcí.

Literatura

- [1] EKOLA group, spol. s r.o.: D0 stavba 513 – Aktivní snížení hlučnosti regulací rychlosti. Zkušební provoz (pilotní projekt) – souhrnná zpráva. Praha, listopad 2025.

When Noise Controls Traffic: Smart Technologies for Quieter Roads

Ing. Libor Ládyš, Ing. Martin Ládyš

EKOLA group, spol. s r.o.,

Mistrovská 558/4, 108 00 Prague 10, Czech Republic

e-mail: libor.ladys@ekolagroup.cz; martin.ladys@ekolagroup.cz

Abstract

Road traffic noise is a significant environmental burden and increasingly becomes a subject of permitting procedures, public comments and complaints from residents. Although a wide range of structural and technical noise-control measures is available, their application may be limited or already exhausted, particularly where major roads pass through built-up areas or close to residential development. This paper presents an approach to active reduction of road traffic noise using an intelligent monitoring and prediction system. The system combines long-term measured data with the current acoustic, traffic and meteorological situation and a dynamic acoustic model running within the data-processing infrastructure. It continuously evaluates the development of noise exposure at protected residential locations and predicts the risk of exceeding the relevant noise limit at the end of the current day or night assessment period. Based on this prediction, the algorithm proposes a recommended regulatory intervention, primarily a temporary reduction of the maximum permitted speed for a defined time interval. The recommendation can be transferred to the road traffic control centre and, after integration with higher-priority traffic-management functions, to variable traffic signs. The objective is to reduce noise when it is actually necessary and thus contribute to compliance with noise limits without imposing blanket or permanently effective restrictions. The pilot project on the D0 motorway section 513 demonstrates the feasibility of linking continuous acoustic monitoring, traffic and meteorological data, a dynamic acoustic model and time-series prediction into a single decision-support system.

Jak čistý je opravdu zelený vodík?

Ing. Karel Borovec, Ph.D.; Ing. Milan Dej, Ph.D.; Ing. Petr Maršolek
VŠB – Technická univerzita Ostrava, Centrum energetických a environmentálních
technologií, Výzkumné energetické centrum
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba
e-mail: karel.borovec@vsb.cz

Abstrakt

Zelený vodík je zpravidla posuzován především podle původu elektrické energie a související uhlíkové stopy. Pro jeho využití v silniční dopravě je však stejně důležitá palivová kvalita. Vodík určený pro vozidla s protonově výměnnými membránovými palivovými články (PEMFC) musí splňovat velmi přísné požadavky na obsah stopových nečistot. Příspěvek popisuje praktický postup odběru vzorků vodíku z vysokotlakých plnicích stanic, vyvinutý a používaný ve Výzkumném energetickém centru VŠB-TUO, a návazné hodnocení čistoty. Pozornost je věnována konstrukci odběrové aparatury pro tlak až 700 bar, přípravě a proplachu odběrové trasy a vzorkovnic a možnosti přímého napojení kontinuálních analyzátorů. Současně jsou diskutovány hlavní nečistoty sledované u vodíku pro mobilitu a mechanismy jejich působení na membránovou elektrodovou sestavu PEMFC. Zvláštní důraz je kladen na CO, sirné sloučeniny a NH₃, které mohou již ve stopových koncentracích ovlivňovat katalytickou aktivitu, protonovou vodivost a dlouhodobou stabilitu palivového článku. Hlavním závěrem je, že označení „zelený“ vypovídá o původu vodíku, nikoliv automaticky o jeho chemické čistotě; spolehlivá kontrola kvality proto musí pokrývat celý řetězec od výroby až po výdejní pistoli plnicí stanice.

1. Úvod

Vodík patří mezi energetické nosiče, s nimiž se počítá při dekarbonizaci části dopravy, průmyslu a energetiky. V dopravě je jeho význam spojen zejména s využitím v protonově výměnných membránových palivových článcích (PEMFC), které umožňují elektrochemickou přeměnu chemické energie vodíku na elektrickou energii bez lokálních emisí oxidu uhličitého. V odborné i veřejné diskusi se přitom často používá označení „zelený vodík“, které charakterizuje především způsob výroby vodíku a původ použité elektrické energie.

Z pohledu palivového článku je však nutné oddělit dvě různé vlastnosti: environmentální původ vodíku a jeho chemickou čistotu. Vodík vyrobený elektrolýzou s využitím obnovitelné elektřiny může být z hlediska uhlíkové stopy velmi příznivý, avšak během výroby, sušení, komprese, skladování, distribuce a plnění může přijít do kontaktu s řadou zdrojů kontaminace. Proto nelze automaticky předpokládat, že „zelený“ znamená současně „dostatečně čistý pro PEMFC“.

Citlivost nízkoteplotních PEMFC na kontaminanty je vysoká. Odborná literatura popisuje tři hlavní oblasti působení nečistot: změnu kinetiky elektrodových reakcí v důsledku otravy katalyzátoru, snížení iontové vodivosti membrány nebo ionomeru a zhoršení transportu reaktantů či produktů v porézních vrstvách [4–6]. Praktická kontrola kvality vodíku proto není pouze laboratorním stanovením celkové koncentrace H₂, ale souborem činností začínajících reprezentativním odběrem vzorku.

2. Požadavky na kvalitu vodíku pro mobilitu

Požadavky na minimální kvalitativní charakteristiky vodíkového paliva stanovuje ISO 14687. V roce 2025 byla publikována nová edice ISO 14687:2025, která nahradila vydání z roku 2019 [1]. Norma zahrnuje vodík distribuovaný pro různé aplikace včetně vozidel. Pro oblast vodíkových plnicích stanic je dále významná řada ISO 19880; metodika VECV 006 při vlastním odběru vychází z požadavků ČSN ISO 19880-1 a ČSN ISO 14687 [2, 3].

Často uváděná čistota vodíku 99,97 % může vytvářet dojem, že zbývající podíl je z technologického hlediska zanedbatelný. Rozdíl do 100 % však představuje až stovky ppm ostatních složek a u PEMFC není rozhodující pouze jejich součet, ale především chemická identita jednotlivých kontaminantů. Některé látky jsou přípustné v jednotkách ppm, zatímco u oxidu uhelnatého, amoniaku nebo sirných sloučenin jsou požadavky podstatně přísnější.

Tab. 1. Vybrané limitní koncentrace nečistot ve vodíku pro PEMFC mobilitu podle podkladů použitých pro hodnocení vzorků

Složka	Jednotka	Limit
Voda (H ₂ O)	ppm	5
Kyslík (O ₂)	ppm	5
Oxid uhličitý (CO ₂)	ppm	2
Oxid uhelnatý (CO)	ppm	0,2
Amoniak (NH ₃)	ppm	0,1
Formaldehyd (HCHO)	ppm	0,2
Kyselina mravenčí (HCOOH)	ppm	0,2
Sirovodík (H ₂ S)	ppm	0,004
Karbonylsulfid (COS)	ppm	0,004
Metan (CH ₄)	ppm	100
Chlorovodík (HCl)	ppm	0,05
Ne-H ₂ plyny celkem	ppm	300
Celkové uhlovodíky mimo CH ₄	ppm	2
Prach / popel / soli	mg/m ³	1

Zdroj: ISIO 14687:2025

3. Kde může dojít ke kontaminaci zeleného vodíku

Kvalitu vodíku je vhodné posuzovat jako vlastnost celého technologického řetězce: výroba – čištění a sušení – komprese – skladování – distribuce – plnicí stanice – vozidlo. Při elektrolýze mohou být relevantní zejména zbytková voda a kyslík. Další kontaminanty mohou pocházet z procesních médií, materiálů zařízení nebo z nedostatečně vyčištěných částí technologie.

Významným bodem je komprese a vysokotlaké skladování. Podle konstrukce zařízení mohou do plynu vstupovat organické látky, maziva nebo částice. Potrubí, ventily

a zásobníky mohou být zdrojem kovových a jiných pevných částic nebo reziduální kontaminace z montáže a údržby. Příměs vzduchu se může projevit zvýšeným obsahem O_2 a N_2 . Kvalita vodíku na výstupu z elektrolyzátoru proto nemusí být totožná s kvalitou paliva skutečně vydávaného do vozidla.

Z hlediska ochrany palivového článku je proto logickým kontrolním místem výdejní zařízení plnicí stanice. Odběr na tomto místě zahrnuje vliv prakticky celého předcházejícího technologického řetězce a umožňuje posoudit palivo ve stavu, v jakém jej přijímá vozidlo.

4. Metodika vysokotlakého odběru vzorku vodíku VEC

Výzkumné energetické centrum VŠB-TUO používá pracovní metodiku VECV 006 „Odběr vzorků vodíku pro stanovení jeho čistoty“, vydanou 11. 10. 2024. Předmětem metodiky je odběr vzorků vodíku pro stanovení čistoty různými analytickými postupy ve vazbě na požadavky ČSN ISO 14687. Odběr smí provádět oprávněná osoba, která před měřením kontroluje stav zařízení a platnost kalibrací používaných měřidel [3].

4.1 Odběrová aparatura

Základem je odběrová aparatura H_2 TESCO s maximálním vstupním tlakem 700 bar. Na vstupu je plnicí hrdlo, za kterým T-spojka rozděljuje tok do odtlačovací a odběrové větve. Odběrová větev pokračuje přes kovový filtr mechanických nečistot do hlavního redukčního ventilu, kde je tlak plynu snížen z vysokotlaké úrovně na přibližně 100 bar.

Za hlavní redukci se odběrová trasa znovu rozděljuje. První větev je určena pro připojení kovových vzorkovnic. Druhá obsahuje vedlejší redukční ventil, který snižuje tlak pod 0,5 bar, hmotnostní průtokoměr a koncový ventil; umožňuje tak přímé připojení kontinuálních analyzátorů. Tato koncepce umožňuje při jednom odběrovém procesu získat tlakový vzorek pro laboratorní analýzu a současně provádět vybraná měření on-line [3].

Obr. 1. Zjednodušené funkční schéma odběrové aparatury H_2 podle metodiky VECV 006

Plnicí pistole H_2 stanice	Filtr	Hlavní redukce 700 → ~100 bar	T-rozdělení	Vzorkovnice 120/200 bar	Vedlejší redukce <0,5 bar	Kontinuální analyzátor
---------------------------------	-------	----------------------------------	-------------	----------------------------	------------------------------	---------------------------

Zdroj: zpracováno podle metodiky VECV 006 autorů.

4.2 Příprava vzorkovnic a odběrové trasy

Metodika používá kovové vzorkovnice s povrchovou úpravou omezující interakce analyzovaných stopových složek se stěnou nádoby. K dispozici je jednoventilová vzorkovnice SIAD o objemu 10 l s pasivovaným vnitřním povrchem a pracovním tlakem 200 bar a průtokové vzorkovnice Swagelok o objemu 1,0 a 2,25 l s povrchovou úpravou Sulfinert a pracovním tlakem 120 bar [3].

Před odběrem se průtokové vzorkovnice proplachují mírným průtokem vodíku čistoty 6.0 minimálně 30 s a uchovávají se s mírným přetlakem čistícího plynu. Obdobně se čistí celá odběrová aparatura. Smyslem této přípravy je minimalizovat paměťový efekt, desorpci předchozí kontaminace a sekundární kontaminaci vzorku, které jsou při sledování koncentrací v řádu ppm a nižších kritické.

4.3 Průběh odběru

Odběrová aparatura se připojí k plnicí pistoli výdejšího stojanu. Před vlastním plněním provádí stanice tlakový ráz s maximálním tlakem 875 bar; případná netěsnost vede k signalizaci chyby a plnění se neprovede. Následně se obě větve aparatury proplachují vzorkem vodíku nejméně 30 s bez připojených vzorkovnic a analyzátorů. Hlavní redukční ventil je v této fázi nastaven přibližně na 5–10 bar a vedlejší na cca 0,5 bar [3].

Po pročištění trasy se připojí zvolená kovová vzorkovnice a hlavním redukčním ventilem se nastaví tlak přibližně 100 bar. Při použití kontinuálních analyzátorů se vedlejším redukčním ventilem nastavuje tlak 0,2–0,3 bar. Průtoková vzorkovnice se před uzavřením výstupního ventilu dále proplachuje vzorkem minimálně 30 s. Metodika umožňuje odběr do jedné nebo více průtokových vzorkovnic i kombinaci průtokové a jednoventilové nádoby.

Po ukončení odběru je plnicí pistole odpojena a aparatura bezpečně odtlakována přes odtlakovací větev. Bezpečnostní postupy jsou navázány na zásady ČSN ISO 19880-1 [2, 3].

5. Vliv nečistot na PEM palivový článek

Membránová elektrodová sestava (MEA) PEMFC zahrnuje protonově vodivou membránu, ionomer v katalytických vrstvách, platinový nebo Pt-slutinový katalyzátor a porézní transportní struktury. Kontaminanty proto nemusí působit pouze na vlastní membránu. Mohou ovlivnit elektrodovou kinetiku, iontovou vodivost i transport hmoty [4–6].

5.1 Oxid uhelnatý – blokování aktivních míst katalyzátoru

Oxid uhelnatý je klasickým příkladem katalytického jedu pro nízkoteplotní PEMFC. Na anodě probíhá adsorpce a oxidace vodíku na povrchu platinového katalyzátoru. CO se však na Pt adsorbuje podstatně silněji než vodík a obsazuje aktivní místa potřebná pro reakci H₂. Důsledkem je omezení reakční plochy, růst anodové polarizace a pokles napětí a výkonu článku [4, 7].

Význam CO dobře ilustruje rozdíl mezi celkovou čistotou a specifickým limitem. V podkladech pro hodnocení vzorků je pro CO uvedena mez 0,2 ppm, tedy koncentrace o několik řádů nižší než celkový přípustný podíl nevodíkových složek. Literatura uvádí, že již nízké ppm koncentrace CO mohou při nízkých provozních teplotách výrazně ovlivnit výkon PEMFC [5]. Část otravy CO může být za vhodných podmínek reverzibilní, nicméně tolerance závisí na katalyzátoru, teplotě a provozním režimu.

5.2 Sirné sloučeniny – silná a obtížně vratná otrava

Sirovodík a další sirné sloučeniny patří mezi nejkritičtější nečistoty. Síra se silně chemisorbuje na platinovém povrchu a blokuje místa pro oxidaci vodíku. Oproti CO bývá obnova aktivity katalyzátoru po expozici sirným látkám obtížnější a může vyžadovat elektrochemické oxidační postupy; část ztráty aktivity může být nevratná [4, 6].

Tomu odpovídají i velmi nízké limitní koncentrace v podkladech: pro H₂S a karbonylsulfid COS je uvedeno 0,004 ppm. Analytické stanovení sirných sloučenin tak vyžaduje nejen citlivou instrumentaci, ale také vhodné materiály odběrové cesty a vzorkovnic, aby nedocházelo ke ztrátám analytu adsorpcí na povrchu.

5.3 Amoniak – narušení protonové vodivosti

Amoniak představuje jiný mechanismus kontaminace. V protonově vodivém ionomeru může reagovat s protony za vzniku NH_4^+ , čímž mění iontové prostředí a snižuje dostupnost protonů pro transport. Výsledkem může být zvýšení ohmického odporu membrány a katalytické vrstvy a následný pokles výkonu [4–6].

Z pohledu interpretace je důležité, že v tomto případě nejde primárně o blokování Pt stejným mechanismem jako u CO. Příklad NH_3 proto ukazuje, proč je vhodnější hovořit o působení kontaminantů na celou MEA než pouze o „poškození membrány“. Limit použitý v dodaných podkladech činí 0,1 ppm.

5.4 Další sledované složky

Voda, kyslík, oxid uhličitý, uhlovodíky, halogenované látky a pevné částice mohou mít odlišný význam. Zvýšený obsah vody může souviset s nedostatečným sušením vodíku a může způsobovat provozní problémy při vysokotlakém skladování a plnění. O_2 a N_2 mohou indikovat příměs vzduchu nebo nedostatečné oddělení plynů. CO_2 může ovlivňovat anodové prostředí a za určitých podmínek přispívat k tvorbě CO [4, 5].

Pevné částice představují vedle chemické kontaminace samostatné technické riziko. Mohou pocházet z potrubí, armatur, kompresorů nebo zásobníků a ovlivňovat ventily, filtry a další komponenty palivového systému. Kontrola kvality vodíku proto musí kombinovat analýzu stopových plynných složek s hodnocením částicové kontaminace.

Tab. 2. Příklad vztahu mezi vybranou nečistotou, mechanismem působení a možným dopadem na PEMFC

Nečistota	Hlavní mechanismus	Možný dopad
CO	silná adsorpce na Pt	blokování aktivních míst, růst anodové polarizace, pokles výkonu
H_2S / sirné látky	chemisorpce sirných forem na Pt	silná otrava katalyzátoru, obtížnější regenerace
NH_3	tvorba NH_4^+ v ionomeru	snížení protonové vodivosti, zvýšení odporu
CO_2	nepřímé elektrochemické/chemické působení	možná tvorba CO a změna anodového prostředí
H_2O	vlhkost/kondenzace	provozní problémy při nevhodném obsahu a teplotě
Pevné částice	mechanické zanášení	zatížení filtrů, ventilů a transportních cest

Zdroj: zpracováno podle [4–7].

6. Diskuse – proč nestačí údaj 99,97 % H_2

Pro provozovatele plnicí stanice i uživatele vozidla je podstatné, že celková čistota sama o sobě nevypovídá o technologickém riziku. Dva vzorky se shodným obsahem 99,97 % H_2 mohou mít zcela odlišnou vhodnost pro PEMFC, pokud se liší složením

zbývajících stopových komponent. Tři sta ppm inertních nebo méně kritických složek není z hlediska katalyzátoru totéž jako desetiny ppm CO nebo tisíce ppm sirných sloučenin.

Stejně důležitá je reprezentativnost odběru. Pokud se stopová složka adsorbuje na nevhodném povrchu odběrové trasy, může být laboratorní výsledek falešně nízký. Naopak nedostatečně vyčištěná vzorkovnice může vzorek sekundárně kontaminovat. Proto je v metodice VECV 006 kladen důraz na proplach čistým vodíkem, uchovávání s přetlakem čistícího plynu, předodběrové pročištění aparatury a použití pasivovaných nebo Sulfinert povrchů [3].

Z praktického hlediska lze kontrolu kvality využít nejen pro jednorázové rozhodnutí vyhovuje/nevyhovuje, ale také pro diagnostiku technologického řetězce. Opakované měření může odhalit trend zvyšování vlhkosti, průnik vzduchu, problém s kompresorem nebo vznik částic. Pro rozvoj vodíkové mobility je proto důležité budovat nejen výrobní a plnicí infrastrukturu, ale také metrologicky spolehlivý systém kontroly palivové kvality.

7. Závěr

Zelený původ a chemická čistota vodíku jsou dvě odlišné vlastnosti. Výroba elektrolýzou s využitím obnovitelné elektřiny sama o sobě nezaručuje, že vodík na výdejní pistoli splňuje požadavky pro dlouhodobý provoz PEM palivového článku.

Klíčovou roli má kontrola jednotlivých stopových nečistot. CO a sirné sloučeniny mohou blokovat aktivní místa platinového katalyzátoru, NH_3 může snižovat protonovou vodivost ionomeru a další plynné či pevné nečistoty mohou ovlivňovat transportní a provozní funkce systému. Kritické koncentrace se přitom pohybují od desítek či jednotek ppm až po desetiny a tisíce ppm.

Metodika VECV 006 vytváří praktický rámec pro reprezentativní odběr vodíku přímo z vysokotlaké plnicí stanice. Kombinace kontrolovaného vysokotlakého odběru, vhodně upravených vzorkovnic, možnosti přímého napojení analyzátorů a návazné stopové analytiky umožňuje odpovědět na otázku, která je pro uživatele palivového článku zásadní: nejen jak byl vodík vyroben, ale co skutečně vstupuje do vozidla.

Literatura

- [1] ISO 14687:2025. Hydrogen fuel quality – Product specification. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.
- [2] ČSN ISO 19880-1. Plynný vodík – Čerpací stanice – Část 1: Obecné požadavky.
- [3] VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum. VECV 006: Odběr vzorků vodíku pro stanovení jeho čistoty. Pracovní metoda a postup, vydání 11. 10. 2024.
- [4] CHENG, X.; SHI, Z.; GLASS, N.; ZHANG, L.; ZHANG, J.; SONG, D.; LIU, Z.-S.; WANG, H.; SHEN, J. A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation. *Journal of Power Sources*. 2007, 165(2), 739–756. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.012.
- [5] Reviews on the effects of contamination and research methodologies for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, 45(43), 23174–23200. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.145.
- [6] Poisoning of proton exchange membrane fuel cells by contaminants and impurities: Review of mechanisms, effects, and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*. 2019.
- [7] Carbon monoxide poisoning and mitigation strategies for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020.

Poděkování

Tato práce byla podpořena Technologickou agenturou České republiky v rámci projektu REFRESH Research Excellence for Region Sustainability and High-Tech Industries č. CZ.10.03.01/00/22_003/0000048 prostřednictvím Operačního programu Spravedlivá transformace a v rámci projektu č. TK050184, Metodika odběru H₂ při vysokých tlacích a navazující analýza jejich znečištění z hlediska dalšího účinného využití v dopravě a v energetice.

Autoři děkují pracovníkům Institutu enviromentálních technologií, CEET, VŠB – Technické univerzity Ostrava, kteří se spolupodíleli na rozvoji metod odběru a analytického hodnocení kvality vodíku.

How Clean Is Green Hydrogen Really?

Ing. Karel Borovec, Ph.D.; Ing. Milan Dej, Ph.D.; Ing. Petr Maršolek

VSB – Technical University of Ostrava, Centre for Energy and Environmental Technologies, Energy Research Center

17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic

e-mail: karel.borovec@vsb.cz

Abstract

Green hydrogen is commonly assessed primarily according to the origin of electricity used for its production and the related carbon footprint. For road transport, however, fuel quality is equally important. Hydrogen supplied to proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) vehicles must meet strict limits for trace contaminants. This paper describes a practical method for sampling hydrogen from high-pressure refueling stations developed and used at the Energy Research Center of VSB – Technical University of Ostrava and the subsequent assessment of hydrogen purity. Attention is paid to a sampling system designed for inlet pressures up to 700 bars, preparation and flushing of sampling lines and cylinders, and direct connection of continuous gas analyzers. The paper also discusses key contaminants relevant to hydrogen mobility and their effects on the PEMFC membrane electrode assembly. Particular attention is given to CO, sulfur compounds and NH₃, which may affect catalytic activity, proton conductivity and long-term fuel-cell stability even at trace concentrations. The main conclusion is that the term 'green' describes hydrogen origin but does not automatically guarantee the chemical purity required by a PEM fuel cell.

Stanovení čistoty vodíkového paliva v laboratoři: praktické zkušenosti se zaváděním metod kontroly čistoty vodíku pro PEM palivové články

Michal Neuschl, Radek Vít, Romana Michalicová

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: michal.neuschl@cdv.gov.cz

Abstrakt

Norma ISO 14687 přesně vymezuje, jaké nečistoty a v jakém množství může vodíkové palivo pro PEM palivové články obsahovat. Méně zřejmé je, jak tyto velmi nízké koncentrace spolehlivě měřit v běžném laboratorním provozu. V laboratořích CDV byly, díky řešení dvou projektů TAČR, postupně zavedeny a akreditovány metody stanovení nečistot s využitím GC-TCD, GC-FID s jetanizérem, TD-GC-MS, GC-PDHID a FTIR.

Příspěvek se proto nesoustředí jen na výsledné detekční limity jednotlivých metod stanovení, ale především na cestu k nim, tzn. na vliv čistoty plynových cest, dávkování a ředění kalibračních směsí, chromatografické separace, atmosférické kontaminace i čas potřebný ke stabilizaci přístrojů. Na příkladu stanovení kyslíku metodou GC-PDHID se ukázalo, že rozhodující problém nemusí být v citlivosti detektoru, ale v samotném způsobu dávkování; po úpravě sestavy klesla relativní směrodatná odchylka z 90,3 % na hodnoty pod 3 %. Zkušenosti z obou projektů ukazují, že při stopové analýze vodíku je analytickou metodou celý řetězec od plynové lahve a rozvodu až po validaci a akreditaci.

1. Úvod

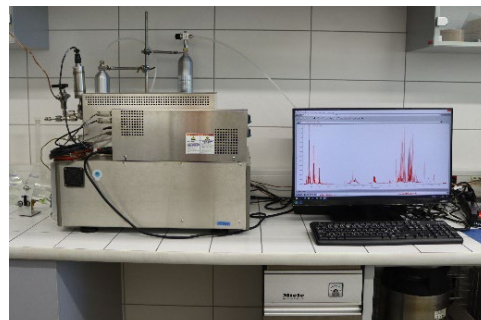
U nečistot sledovaných pro PEM aplikace (He, CO, CO₂, C_xH_y, CH₄, sirné a halogenované látky, formaldehyd, Ar, O₂, N₂, H₂O, NH₃ a kyselina mravenčí), se přípustné koncentrace pohybují od stovek ppm až po jednotky ppb. V tomto rozsahu už může být stopa vzduchu v rozvodné soustavě přístroje, kolísání průtoku nebo sorpce na vnitřním povrchu soustavy významným faktorem pro ovlivnění signálu hledaného analytu. S klesající koncentrací se proto součástí měření stává prakticky celý laboratorní systém – nejen samotný detektor přístroje.

Právě z této situace vycházely projekty CL01000029 „Vývoj metod analýz čistoty vodíku s využitím plynové chromatografie“ a CL01000071 „Vývoj metod analýz čistoty vodíku s využitím infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací“. Jejich cílem bylo převést požadavky ČSN ISO 14687 do postupů, které jsou dostatečně citlivé, přesné a opakovatelné. V průběhu řešení se tak vedle analytické citlivosti řešila čistota technických plynů, konstrukce a materiál rozvodů, stabilita pozadí, příprava a metodologie kalibrací, dávkování vzorku i interference mezi jednotlivými složkami [1-3].

Obr. 1. Přístroje využívané pro zavádění metod v laboratoři CDV



GC



FTIR

2. Od normativního limitu k funkční laboratorní metodě

V praxi se nenabízí možnost použití jediné univerzální laboratorní techniky pro stanovení všech nečistot. Jednotlivé skupiny analytů mají rozdílné fyzikálně-chemické vlastnosti a také rozdílné požadavky na citlivost. Laboratorní platforma proto vznikala jako soubor vzájemně se doplňujících metod: TCD pro permanentní plyny, velmi citlivý PDHID pro stopové atmosférické složky, FID s jetanizérem pro uhlíkaté látky, TD-GC-MS pro prekoncentrované stopové organické, sirné a halogenované látky a FTIR pro přímé souběžné stanovení sedmi vybraných molekul. Tabulka 1 shrnuje nejen jejich roli, ale především to, kde se při zavádění skutečně objevil limit systému.

Tab. 1. Kritická místa při zavádění analytických metod

Přístrojová technika	Stanovované analyty	Kritická místa analýzy	Řešení
GC-TCD	He	separace H_2/He a odezva vodíkové matrice	vodík 7.0 jako nosný plyn; vhodné nastavení separace
GC-PDHID	Ar, O_2 , N_2 , CO	stopový vzduch, čistota He a variabilita dávkování O_2	depleční pasti a gettery; He oplach ventilu; přímé dávkování CRM
GC-FID + jetanizér	CO, CO_2 , CH_4 , NMHC	složitě dvoukolonové zapojení a časování backflush	delší HayeSep Q; vyřazení druhé kolony; optimalizace průtoku a teploty
TD-GC-MS	HCHO, sirné a halogenované látky	ztráty při dávkování a výrazně odlišná odezva skupin analytů	CRM v tlakových lahvích; prekoncentrace; tři samostatné podmetody
FTIR	H_2O , NH_3 , CH_4 , CO, CO_2 , HCHO, HCOOH	H_2O a CO_2 z okolní atmosféry; překryv spekter	dlouhodobý N_2 purge; stabilizace pozadí; selektivní absorpční oblasti

3. Kritická místa zavádění analytických metod

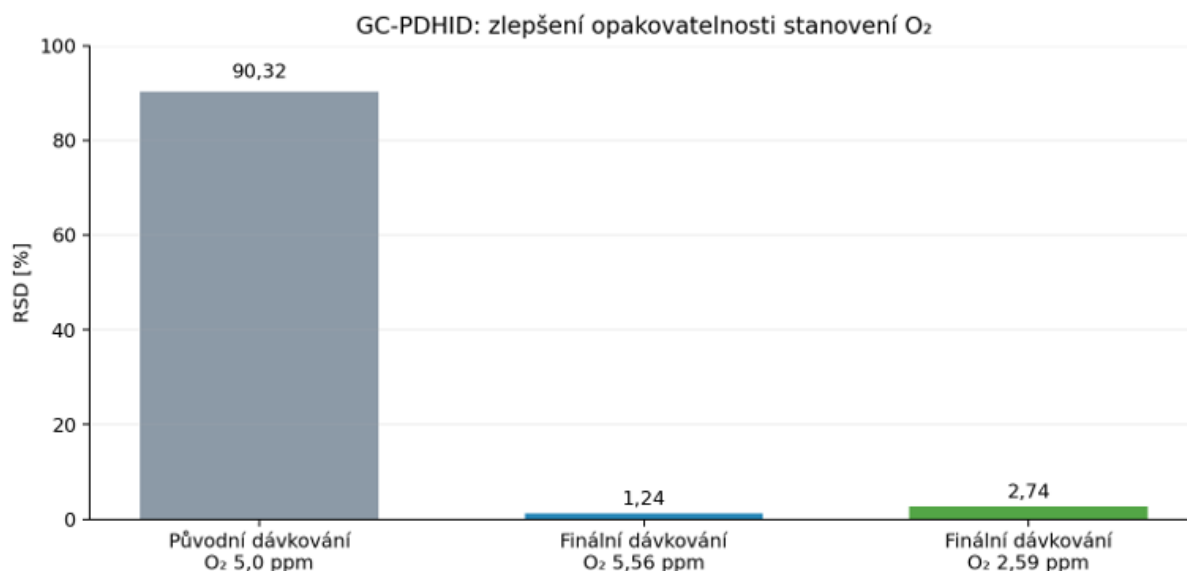
3.1. GC-PDHID

Nejvýraznějším příkladem byla metoda GC-PDHID. Detektor má díky své vysoké citlivosti velkou rezervu vůči normovaným limitním koncentracím, což klade vysoké nároky na „čistotu“ plynu schopnost dokonalého vytěsnění atmosferických plynů podél celého rozvodného systému. Pro dosažení stabilního pozadí bylo např. nutné nahradit měděnou kapiláru přívodu helia za nerezovou, zapojit adsorpční náplňové pasti, doplněnou o dvojici vyhřívaných reagenčních getterů, a pořídit nástřikový ventil s vnitřním sedlovým oplachem se zapojením helia. Cena za takto nízké pozadí je čas: před měřicí kampaní vyžaduje systém přibližně šestihodinový proplach a v praxi se připravuje již den předem [2].

Samotná vysoká citlivost však neřešila opakovatelnost stanovení O_2 kolem normativního limitu 5 ppm. V původním uspořádání činila relativní směrodatná odchylka (RSD) při této koncentraci 90,32 %. Nejprve se prověřovala možná saturace překryvu signálů Ar/O_2 a také účinnější rázové proplachování rozvodů, ani jedno řešení ale nepřineslo zásadní změnu. Obrat nastal až ve chvíli, kdy byl z dávkovacího řetězce úplně vyřazen průtokový směšovač. Kalibrační plyny byly vedeny na nástřikovou smyčku přímo z tlakových lahví přes společný redukční ventil.

Po této úpravě klesla RSD u O_2 na 1,24 % při 5,56 ppm a na 2,74 % při 2,59 ppm. Původní variabilita tedy nebyla důsledkem citlivosti PDHID, ale nestability vstupní koncentrace při dynamickém ředění. Tento výsledek se stal jedním z nejdůležitějších praktických poznatků projektu: u stopových koncentrací může přidání dalšího „sofistikovaného“ prvku do sestavy měření zhoršit, zatímco jeho odstranění může metodu výrazně zpřesnit [2].

Obr. 2. Opakovatelnost stanovení O_2 před a po úpravě dávkovací soustavy GC-PDHID

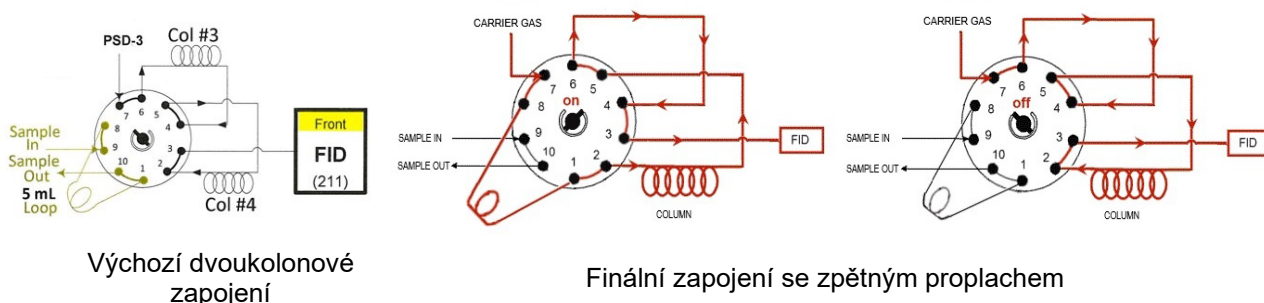


3.2. GC-TCD a GC-FID

Podobná zkušenost se objevila i u méně citlivých chromatografických metod. U stanovení He na GC-TCD se nejprve nedařilo uspokojivě oddělit vodík a helium při použití argonu jako nosného plynu. Přepojení na vodík z elektrolytického generátoru odstranilo dominantní odezvu vodíkové matrice a metoda pak mohla být standardně validována. Ještě názornější byl vývoj GC-FID s jetanizérem. Původní sériové zapojení

náplňové a kapilární kolony komplikovalo určení okamžiku, kdy se má 10cestný ventil přepnout do reverzního toku pro stanovení NMHC. Po výměně předkolony za delší HayeSep Q se ukázalo, že CO, CH₄ a CO₂ jsou dostatečně separovány už na první koloně. Druhá kolona proto byla zcela vyřazena a výsledná soustava až při takto zjednodušeném zapojení poskytovala požadovanou separaci sledovaných komponent [2].

Obr. 3. GC-FID od původního dvoukolonového zapojení k finální jednodušší konfiguraci se zpětným proplachem

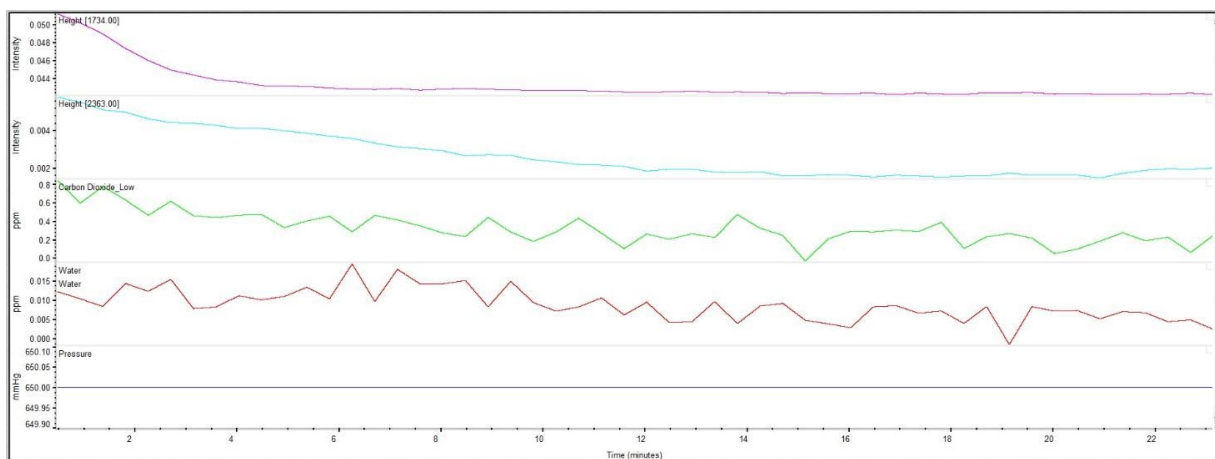


3.3. TD-GC-MS

U sirných, halogenovaných látek a formaldehydu se řešil opačný problém: analyty byly přítomné v tak malém množství, že před vlastní GC-MS analýzou musely být zakonzentrovány na modulu termální desorpce. První pokusy s laboratorní přípravou standardů a dávkováním z odběrových vaků nebyly dostatečně opakovatelné, proto byly kalibrace převedeny na certifikované plynné směsi v tlakových lahvích. Termální desorpce následně umožnila kumulovat analyt na fokusovací pasti; u sirných látek na úrovni jednotek ppb se pracovalo přibližně s 1 l vzorku. Současně se ukázalo, že univerzální nastavení pro všechny tři skupiny není výhodné. Formaldehyd, sirné a halogenované látky vyžadují odlišné teplotní programy i dávkované objemy, takže výsledný postup byl rozdělen do tří podmetod. U formaldehydu navíc kalibrační standard obsahoval i 1,3,5-trioxan, což souvisí s rovnováhou formaldehydu v plynné fázi, kterou bylo nutné minimalizovat během optimalizace teplotního programu dávkování [2,4,5].

3.4. FTIR

FTIR přineslo jiný typ problému. Vodík je v infračervené absorpční spektroskopii neaktivní, takže plyn lze analyzovat přímo a z jednoho spektra současně vyhodnotit více nečistot. Výhodná vlastnost matrice ale neřeší okolní prostředí. Otevřená optická soustava přístroje byla citlivá na atmosférickou H₂O a CO₂; voda navíc spektrálně zasahuje do oblastí důležitých pro formaldehyd a kyselinu mravenčí. Do metodiky proto musel být zahrnut kontinuální proplach optického modulu dusíkem 6.0, sorpční dočištění a především kontrola, zda se spektrální pozadí skutečně ustálilo. Při nové kalibraci se měření běžně zahajuje až přibližně 3-4 hodiny po spuštění promývání optického rozhraní [3].

Obr. 3. Ustalování signálu H₂O a CO₂ v průběhu promývání optické soustavy FTIR

Teprve na stabilním pozadí bylo možné hledat spektrální oblasti, v nichž se analyty vzájemně ovlivňují co nejméně. Výběr byl proveden na základě databázových i laboratorně naměřených spekter a samostatné kalibrační modely byly následně spojeny do jedné souhrnné metody pro H₂O, NH₃, CH₄, CO, CO₂, HCHO a HCOOH. Ředění kalibračních směsí lze připravovat přímo v desetimetrové kyvetě postupným odčerpáním části plynu a doplněním čistým H₂; výsledná koncentrace se dopočítává z aktuálního tlaku a teploty. Výsledkem je metoda, která umožňuje z jediného spektra současně kvantifikovat sedm sledovaných složek a byla v roce 2026 akreditována [3].

4. Od optimalizaci k akreditaci

Teprve po odstranění hlavních zdrojů variability mělo smysl přejít k vlastní validaci. U jednotlivých metod byly stanoveny LOD a LOQ, kalibrační model, opakovatelnost, správnost a nejistota měření a výsledky byly ověřeny dvoustranným mezilaboratorním porovnáním s Výzkumným energetickým centrem VŠB-TUO. Akreditace tak nebyla jen administrativní závěrečnou fází, ale praktickou zkouškou toho, zda je celý postup dostatečně stabilní a přenositelný do rutinního režimu. V průběhu projektů se také ukázalo jako účelnější akreditovat metody postupně podle jejich skutečné připravenosti, nikoli čekat na společný závěr všech vývojových větví [2,3].

Pro rutinní použití bylo stejně důležité převést zkušenosti z vývoje do jednoznačných provozních kroků. Nestačilo tedy uvést, že metoda vyhovuje požadovanému limitu; bylo nutné popsat i podmínky, za nichž jej skutečně dosahuje. U GC-PDHID jde například o čistotu helia, přípravu systému den před měřením a přesně definovaný způsob plnění nástřikové smyčky, u FTIR o kontrolu ustálení spektrálního pozadí a u TD-GC-MS o samostatné nastavení pro různé skupiny analytů. Tyto praktické kroky byly promítnuty do standardních operačních postupů a aplikačních listů, které mají usnadnit zavedení metod i mimo řešitelskou laboratoř. Mezilaboratorní porovnání pak ověřilo, že takto popsaný postup nevede pouze k reprodukovatelnému výsledku uvnitř jedné laboratoře, ale je srovnatelný i s nezávislým měřením [2,3].

5. Závěr

Zavádění analytických metod pro kontrolu vodíkového paliva ukázalo, že otázka „jak citlivý je detektor?“ je pouze začátek. U koncentrací na úrovni ppm a ppb rozhoduje o kvalitě výsledku celý analytický řetězec. Někdy bylo nutné zvýšit čistotu plynu a odstínit okolní atmosféru, jindy naopak zjednodušit dávkování nebo chromatografické zapojení. Kombinací GC-TCD, GC-PDHID, GC-FID, TD-GC-MS a FTIR tak vznikla komplementární platforma, která pokrývá široké spektrum nečistot požadovaných pro PEM aplikace. Praktická zkušenost z projektů je přitom obecnější: u stopové analýzy je třeba hledat nikoli jen dostatečně citlivý přístroj, ale především dostatečně kontrolovaný proces měření.

Literatura

- [1] ISO 14687:2025. Hydrogen fuel quality - Product specification.
- [2] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. Odborná zpráva projektu CL01000029: Vývoj metod analýz čistoty vodíku s využitím plynové chromatografie. DOPRAVA 2030, 2026.
- [3] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. Odborná zpráva projektu CL01000071: Vývoj metod analýz čistoty vodíku s využitím infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací. DOPRAVA 2030, 2026.
- [4] NPL Report AS 64. Methods for the analysis of trace-level impurities in hydrogen for fuel cell applications. National Physical Laboratory, 2011.
- [5] Production and stability of low amount fraction of formaldehyde in hydrogen gas standards. International Journal of Hydrogen Energy 43 (2018), 6711–6722.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.

Výsledky prezentované v příspěvku vznikly v projektech TA ČR CL01000029 a CL01000071, řešených v programu DOPRAVA 2030 za podpory Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy ČR, s financováním z Národního plánu obnovy.

Autoři děkují spoluřešitelům Altium International, s. r. o., a Nicolet CZ, s. r. o., a partnerům z VŠB-TUO za možnost uskutečnění mezilaboratorního porovnání.

Determination of hydrogen Fuel Purity in the Laboratory: Practical Experience with the Implementation of Methods for Monitoring Hydrogen Purity for PEM Fuel Cells

Michal Neuschl, Radek Vít, Romana Michalicová

Transport Research Centre

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: michal.neuschl@cdv.gov.cz

Abstract

The ISO 14687 standard precisely defines what impurities hydrogen fuel for PEM fuel cells may contain and in what quantities. What is less clear is how to reliably measure these very low concentrations in routine laboratory operations. Thanks to two TAČR projects, methods for determining impurities using GC-TCD, GC-FID with a jetanizer, TD-GC-MS, GC-PDHID, and FTIR were gradually implemented and accredited in the CDV laboratories.

This paper therefore focuses not only on the resulting detection limits of the individual determination methods, but primarily on the path to achieving them—that is, on the influence of gas line purity, the dosing and dilution of calibration mixtures, chromatographic separation, atmospheric contamination, and the time required for instrument stabilization. Using the determination of oxygen by the GC-PDHID method as an example, it was shown that the critical issue may not lie in the detector's sensitivity, but in the dosing method itself; after modifying the setup, the RSD dropped from 90.3% to values below 3%. Experience from both projects shows that in trace hydrogen analysis, the entire chain—from the gas cylinder and distribution system to validation and accreditation—constitutes the analytical method.

Metodika kontroly kvality vodíkového paliva

Adéla Svejková, Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Michal Neuschl, Petr Polanský

Centrum dopravního výzkumu

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: adela.svejkovska@cdv.gov.cz

Abstrakt

Rozvoj vodíkové mobility představuje jednu z cest vedoucích ke snížení emisí skleníkových plynů a znečišťujících látek v dopravě. Základním předpokladem spolehlivého a bezpečného provozu vozidel vybavených palivovými články je zajištění vysoké čistoty vodíkového paliva. Přítomnost kontaminantů může vést ke snížení účinnosti palivových článků, urychlení jejich degradace nebo k nevratnému poškození jejich součástí. Příspěvek představuje metodiku kontroly kvality vodíkového paliva určenou pro hodnocení rizik kontaminace v celém dodavatelském řetězci. Metodika vychází z požadavků normy ČSN ISO 14687 a zahrnuje identifikaci zdrojů kontaminace, hodnocení jejich pravděpodobnosti výskytu a posouzení dopadů na provoz vozidel s palivovými články. Součástí metodiky jsou registry potenciálních kontaminantů přiřazené jednotlivým technologickým uzlům dodavatelského řetězce vodíkového paliva. Registry zahrnují relevantní technologické varianty výroby, transportu a skladování vodíku a zároveň zohledňují univerzálně kontrolované kontaminanty, které mohou být do systému vnášeny napříč celým dodavatelským řetězcem. Metodika zahrnuje rovněž hodnocení kumulativního rizika kontaminantů. Klíčovým výstupem metodiky je rozhodovací matice, která umožňuje systematické hodnocení rizikovosti konkrétních technologických řetězců a identifikaci relevantních kontaminantů z pohledu požadavků na kvalitu vodíku pro vozidla s palivovými články.

1. Úvod

Vodík představuje významný bezemisní energetický nosič pro oblast mobility, přičemž vozidla s palivovými články typu PEM (Proton Exchange Membrane) patří mezi nejperspektivnější technologie jeho využití. Spolehlivost a životnost těchto systémů jsou však přímo závislé na kvalitě dodávaného vodíkového paliva, protože i stopová množství kontaminantů mohou způsobit degradaci palivového článku a snížení jeho výkonu.

Kvalita vodíku je ovlivňována celým dodavatelským řetězcem od výroby přes transport a skladování až po plnění vozidel. Jednotlivé články řetězce přitom představují specifické zdroje potenciální kontaminace, jejichž význam závisí na použité technologii a konfiguraci systému.

Požadavky na kvalitu vodíkového paliva stanovuje zejména norma ČSN ISO 14687, doplněná dalšími dokumenty zaměřenými na kontrolu kvality v rámci vodíkové infrastruktury. Tento příspěvek se zabývá návrhem postupu kontroly kvality vodíku, který zohledňuje technologické, provozní a institucionální podmínky České republiky a umožňuje efektivní zaměření analytických kontrol na reálná kontaminační rizika v dodavatelském řetězci.

2. Metodická část

Primárním cílem metodiky je vytvořit jednotný postup pro identifikaci a hodnocení rizik spojených s kontaminací vodíkového paliva určeného pro vozidla vybavená palivovými články. Metodika reaguje na skutečnost, že kvalita vodíku je ovlivňována mnoha technologickými procesy probíhajícími od výroby až po plnění vozidla, a proto posuzuje potenciální zdroje kontaminace v celém dodavatelském řetězci vodíku.

2.1 Metodický přístup k hodnocení kontaminantů

Pro účely jednotného hodnocení potenciálních kontaminantů v jednotlivých částech dodavatelského řetězce vodíku byl vytvořen standardizovaný hodnoticí rámec. Hodnoticí rámec je založen na posouzení dvou klíčových parametrů, kterými jsou pravděpodobnost výskytu kontaminantu v daném technologickém uzlu a závažnost jeho dopadu na funkci, spolehlivost a životnost palivového článku. Po zohlednění kumulativního rizika v rámci celého dodavatelského řetězce jsou oba parametry vzájemně vyhodnoceny a použity pro sestavení rozhodovací matice. Ta slouží k určení významnosti jednotlivých kontaminantů a podporuje rozhodování o potřebě jejich cíleného monitorování a analytického ověřování.

V rámci stanovení pravděpodobnosti výskytu kontaminantu je v metodice stanovena škála – viz Tabulka 1. Škála pro dopad (kritičnost) kontaminantu je uvedena v Tabulce 2.

Tab.1. Škála pravděpodobnosti výskytu kontaminantů

Pravděpodobnost výskytu	Charakteristika	Numerická hodnota pravděpodobnosti
N/A (bez identifikovaného zdroje)	Kontaminant nemá v daném tech. uzlu zdroj	0
Časté	Typická vlastnost	5
Možné	Opakovaný, provozně závislý	3
Vzácné	Výjimečný/nestandardní	2
Velmi vzácné	Nepravděpodobné, poruchové stavy	1

Tab. 2. Škála dopadu (kritičnosti) kontaminantu

Dopad	Charakteristika	Numerická hodnota dopadu
Velmi vysoký	Nevratná degradace; kritické poškození	10
Vysoký	Výrazný pokles výkonu; převážně vratný	5
Střední	Postupné ovlivnění výkonu; částečně vratné	2
Nízký	Nevýznamný účinek; rychlá obnova	1

2.2. Identifikace zdrojů kontaminace

Základem metodiky jsou registry potenciálních kontaminantů vytvořené pro jednotlivé technologické uzly dodavatelského řetězce vodíkového paliva, konkrétně pro výrobu, transport a skladování vodíku. Samostatnou část tvoří také skupina univerzálně kontrolovaných kontaminantů, jejichž výskyt není vázán na konkrétní technologii, ale může souviset s běžným provozem, manipulací, údržbou nebo kontaktem se zařízením napříč celým dodavatelským řetězcem.

Technologické varianty zahrnuté do jednotlivých uzlů dodavatelského řetězce byly vybrány s ohledem na technologie relevantní pro současné i očekávané podmínky rozvoje vodíkového hospodářství v České republice. Pro vybrané technologie byly následně sestaveny registry potenciálních kontaminantů, které představují základ pro identifikaci a hodnocení rizik kvality vodíkového paliva. Univerzálně kontrolované kontaminanty jsou posuzovány odděleně od kontaminantů specifických pro jednotlivé technologické uzly a tvoří pevnou součást systému kontroly kvality. Registry potenciálních kontaminantů byly sestaveny pro následující technologické varianty výroby, přepravy, skladování a univerzální kontaminaci:

Technologický uzel výroba:

- alkalická elektrolyza vody,
- elektrolyza vody s protonvýměnnou membránou (PEM),
- elektrolyza solanky,
- parní reformování zemního plynu s následnou tlakovou adsorpcí (SMR+PSA),
- parní reformování bioplynu s následnou tlakovou adsorpcí (SMR+PSA bioplynu),
- parciální oxidace ropných zbytků s následnou tlakovou adsorpcí (POX+PSA),
- krakování amoniaku.

Technologický uzel přeprava:

- Potrubí nové
- Potrubí upravené po přepravě zemního plynu
- Trailer

Technologický uzel skladování:

- Stacionární tlakové zásobník a zásobníkové systémy (storage banks)
- Podzemní zásobníky ve směsi s metanem

Univerzálně kontrolované kontaminanty.

2.3. Rozhodovací matice a kumulativní riziko

Rozhodovací matice představuje nástroj pro systematické stanovení potřeby kontroly jednotlivých kontaminantů na základě jejich pravděpodobnosti výskytu a míry dopadu pro palivový článek. Matice vychází z dat shromážděných z předchozí specifikace pro uzly výroby, přepravy, skladování vodíku a z univerzálně kontrolovaných kontaminantů.

Součástí metodického postupu je také posouzení kumulativního rizika kontaminace v celém dodavatelském řetězci vodíku. Hodnocení jednotlivých technologických uzlů nemusí vždy postihnout případy, kdy je tentýž kontaminant vnášen do systému opakovaně v různých fázích výroby, přepravy, skladování či

v rámci univerzální kontaminace. V důsledku toho může docházet k postupnému zvyšování jeho koncentrace a tím i celkového rizika pro kvalitu vodíkového paliva. Vyhodnocení kumulativního rizika proto představuje nezbytný krok před následnou aplikací rozhodovací matice.

Postup hodnocení kumulativního rizika

Pro vyhodnocení kumulativního rizika je každé úrovni pravděpodobnosti výskytu kontaminantu přiřazena bodová hodnota – viz Tabulka 1. V případě, že se daný kontaminant vyskytuje ve více člancích dodavatelského řetězce, jsou příslušné body pro ten daný kontaminant sčítány. Výsledný součet vyjadřuje kumulativní pravděpodobnost výskytu kontaminantu a slouží jako vstupní parametr pro jeho následné zařazení do rozhodovací matice. Jedná se tedy o výpočet indexu kumulativní pravděpodobnosti výskytu kontaminantu:

$$I_{kp} = \sum_i P_i$$

kde

- I_{kp} je index kumulativní pravděpodobnosti výskytu kontaminantu,
- P_i značí hodnotu pravděpodobnosti výskytu kontaminantu v jednotlivém technologickém uzlu

Aby matice zůstala zachovaná, I_{kp} se nepoužije přímo do násobení s dopadem. Nejdříve se převede zpět na výslednou kategorii pravděpodobnosti – viz Tabulka 3.

Tab. 3. Převod kumulativního indexu pravděpodobnosti na výslednou kategorii pro rozhodovací matici

I_{kp}	Kategorie pravděpodobnosti pro rozhodovací matici (vstupující do matice)	Logika nastavení
0	N/A (bez identifikovaného zdroje) – nevstupuje do matice	Kontaminant nemá v řetězci identifikovaný zdroj. Nejde o nízkou pravděpodobnost, ale o nerelevantní látku pro daný řetězec
1	Velmi vzácné	Jeden izolovaný zdroj kontaminace. Zachycuje ojedinělý výskyt, který u nízké a středně kritických látek nevede k testování
2	Vzácné	Jeden vzácný zdroj nebo dva velmi vzácné zdroje. Riziko je vyšší než u jednorázového slabého výskytu, ale stále omezené
3–4	Možné	Jeden možný zdroj nebo kumulace více slabších zdrojů
$\geq 5^1$	Časté	Jeden častý zdroj nebo kombinace více zdrojů

¹ Index kumulativní pravděpodobnosti výskytu kontaminantu (I_{kp}) není přímo vstupem do rozhodovací matice. Slouží pouze k přiřazení odpovídající kategorie pravděpodobnosti. Hodnoty I_{kp} vyšší než 5 nejsou dále rozlišovány, protože představují stav opakovaného nebo souběžného výskytu kontaminantu ve více částech dodavatelského řetězce a z hlediska rozhodovací matice odpovídají kategorii „Časté“.

Po převodu I_{kp} na výslednou pravděpodobnost se použije rozhodovací matice – viz tabulka 4.

Tab. 4. Rozhodovací matice pro určení potřeby testování kontaminantů

Dopad	Velmi vysoký 10	10	20	30	50
	Vysoký 5	5	10	15	25
	Střední 2	2	4	6	10
	Nízký 1	1	2	3	5
		Velmi vzácné 1	Vzácné 2	Možné 3	Časté 5
Pravděpodobnost					

1–4

Nízké riziko – NETESTOVAT

≥5

Vysoké riziko – TESTOVAT

2.4. Příklad aplikace metodiky

Pro ověření a názornou prezentaci navrženého postupu byl zvolen příklad konkrétního dodavatelského řetězce, na kterém je demonstrována aplikace metodiky od identifikace potenciálních kontaminantů až po stanovení potřeby jejich testování.

Definice dodavatelského řetězce:

- Výroba: elektrolýza solanky
- Transport: trailer
- Skladování: stacionární tlakové zásobníky
- Univerzálně kontrolované kontaminanty

Identifikace kontaminantů z jednotlivých technologických uzlů:

Výroba – elektrolýza solanky

Kontaminant (pravděpodobnost výskytu; dopad)

- O₂ (5 – časté; 2 – střední)
- H₂O (5 – časté; 2 – střední)
- Halogeny (3 – možné; 10 – velmi vysoký)
- CO₂ (1 – velmi vzácné; 2 – střední)

Transport – trailer

- Rezidua dříve přepravovaného média (nelze blíže specifikovat)

Skladování

- Rezidua dříve skladovaného média (nelze blíže specifikovat)

Univerzálně kontrolované kontaminanty

- H₂O (3 – možné; 2 – střední)
- O₂ (3 – možné; 2 – střední)
- N₂ (3 – možné; 1 – nízký)
- Ar (2 – vzácné; 1 – nízký)
- Celkové uhlovodíky bez metanu (3 – možné; 2 – střední)
- Pevné částice (3 – možné; 10 – velmi vysoký)

Tab. 5. Souhrnná tabulka kumulace pravděpodobnosti výskytu kontaminantů a jejich vyhodnocení podle rozhodovací matice (viz Tab. 4)

Kontaminant	Výroba	Transport	Skladování	Univerzální kontaminace	I_{kp}	Výsledná pravděpodobnost vstupující do matice ²	Dopad kontaminantu	Výsledek
H ₂ O	5	0	0	3	8	5 – Časté	2 – Střední	Testovat
O ₂	5	0	0	3	8	5 – Časté	2 – Střední	Testovat
Halogeny	3	0	0	0	3	3 – Možné	10 – Velmi vysoký	Testovat
CO ₂	1	0	0	0	1	1 – Velmi vzácné	2 – Střední	Netestovat
N ₂	0	0	0	3	3	3 – Možné	1 – Nízký	Netestovat
Ar	0	0	0	2	2	2 – Vzácné	1 – Nízký	Netestovat
Celkové uhlovodíky bez metanu	0	0	0	3	3	3 – Možné	2 – Střední	Testovat
Pevné částice	0	0	0	3	3	3 – Možné	10 – Velmi vysoký	Testovat

Výsledky hodnocení ukazují, že nejvyšší index kumulativní pravděpodobnosti výskytu dosahují kontaminanty H₂O a O₂. Jejich výsledná pravděpodobnost byla vyhodnocena jako „častá“, přičemž ve spojení se středním dopadem na provoz palivových článků vedou k překročení hranice akceptovatelného rizika v rozhodovací matici. Z tohoto důvodu jsou oba kontaminanty označeny jako relevantní pro následné analytické ověření kvality vodíku.

Významným kontaminantem jsou rovněž halogeny, které jsou charakteristické pro technologii elektrolýzy solanky. Přestože je jejich pravděpodobnost výskytu hodnocena pouze jako možná, jejich velmi vysoký dopad na životnost a funkčnost palivových článků způsobuje zařazení mezi kontaminanty vyžadující kontrolu. Obdobně byly jako rizikové vyhodnoceny pevné částice, jejichž potenciální výskyt v dodavatelském řetězci v kombinaci s velmi vysokým dopadem vede k doporučení jejich testování.

Naopak CO₂, N₂ a Ar byly vyhodnoceny jako kontaminanty s nízkou výslednou rizikovostí a jejich analytická kontrola proto není v rámci posuzovaného řetězce prioritně vyžadována.

Příklad demonstruje princip metodiky, kdy výsledný rozsah kontrolovaných parametrů není dán pouze seznamem potenciálních kontaminantů uvedených v normě, ale vychází z kombinace pravděpodobnosti jejich výskytu v konkrétním

² Pravděpodobnost vstupující do rozhodovací matice je stanovena na základě hodnoty indexu kumulativního pravděpodobnosti výskytu kontaminantu (I_{kp}) podle tabulky 3. Převod I_{kp} na výslednou pravděpodobnost je následující: $I_{kp} = 1 \rightarrow$ *Velmi vzácné*, $I_{kp} = 2 \rightarrow$ *Vzácné*, $I_{kp} = 3-4 \rightarrow$ *Možné*, $I_{kp} \geq 5 \rightarrow$ *Časté*. V případě $I_{kp} = 0$ (bez identifikovaného zdroje) kontaminant do rozhodovací matice.

dodavatelském řetězci a závažnosti jejich dopadu na provoz vozidel s palivovými články. Tento přístup umožňuje cíleně zaměřit kontrolu kvality na kontaminanty představující nejvyšší riziko a současně omezit rozsah zbytečných analýz.

3. Diskuse

Příklad ukazuje, že riziko kontaminace vodíkového paliva je výrazně závislé na konfiguraci dodavatelského řetězce. Zatímco některé kontaminanty jsou spojeny pouze s konkrétními výrobními nebo transportními či skladovacími technologiemi, jiné se mohou vyskytovat napříč více technologickými uzly. To potvrzuje potřebu hodnotit kvalitu vodíkového paliva v kontextu celého dodavatelského řetězce.

Významným zjištěním je také vliv kumulativního rizika. U některých kontaminantů může docházet k jejich opakovanému zavádění do vodíku v různých fázích výroby, transportu a skladování, což zvyšuje jejich celkovou relevanci pro hodnocení kvality paliva. Tento aspekt není běžně zohledňován při kontrolách založených pouze na pevném seznamu sledovaných látek.

Navržená metodika proto rozšiřuje stávající přístup ke kontrole kvality vodíku o hodnocení technologických specifik dodavatelského řetězce a umožňuje lépe identifikovat kontaminanty, které představují skutečné riziko pro provoz palivových článků.

4. Závěr

Příspěvek představil metodický postup pro hodnocení kvality vodíkového paliva určeného pro mobilitu na bázi palivových článků PEM. Navržený přístup vychází z identifikace potenciálních kontaminantů v jednotlivých technologických uzlech dodavatelského řetězce a z jejich hodnocení na základě pravděpodobnosti výskytu a dopadu na palivový článek. Součástí metodiky je také zohlednění kumulativního rizika vznikajícího opakovaným výskytem kontaminantů napříč dodavatelským řetězcem.

Pro demonstraci využití metodiky byl zvolen modelový dodavatelský řetězec, na kterém byl prezentován postup identifikace relevantních kontaminantů, vyhodnocení jejich rizikovosti a stanovení potřeby jejich testování pomocí rozhodovací matice. Výsledky ukázaly, že rozsah kontroly lze přizpůsobit konkrétní konfiguraci dodavatelského řetězce a zaměřit analytické kontroly na kontaminanty představující reálné riziko pro kvalitu vodíkového paliva.

Navržený přístup představuje flexibilní nástroj, který oproti plošnému sledování pevně stanoveného seznamu kontaminantů umožňuje zohlednit technologická specifik výroby, transportu a skladování vodíku. Metodika tak může přispět ke zvýšení efektivity systému kontroly kvality vodíkového paliva a podpořit bezpečný rozvoj vodíkové mobility v podmínkách České republiky.

Poděkování

Tato metodika vznikla v rámci projektu Národního centra vodíkové mobility (TN02000007) a byla spolufinancována se státní podporou Technologické agentury České republiky v rámci Programu Národní centra kompetence.

Methodology for Hydrogen Fuel Quality Control

Adéla Svejková, Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Michal Neuschl, Petr Polanský

Transport Research Centre

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: adela.svejkovska@cdv.gov.cz

Abstract

The development of hydrogen mobility represents one of the pathways toward reducing greenhouse gas emissions and air pollutants in the transport sector. A fundamental prerequisite for the reliable and safe operation of fuel cell vehicles is ensuring a high level of hydrogen fuel purity. The presence of contaminants may lead to reduced fuel cell efficiency, accelerated degradation, or irreversible damage to fuel cell components.

This paper presents a methodology for hydrogen fuel quality control designed to assess contamination risks throughout the entire hydrogen supply chain. The methodology is based on the requirements of ČSN ISO 14687 and includes the identification of contamination sources, evaluation of their likelihood of occurrence, and assessment of their impacts on the operation of fuel cell vehicles.

The methodology incorporates registers of potential contaminants assigned to individual technological nodes within the hydrogen fuel supply chain. These registers cover relevant technological options for hydrogen production, transportation, and storage, while also taking into account universally monitored contaminants that may be introduced across the entire supply chain. Furthermore, the methodology includes an assessment of the cumulative risk posed by contaminants throughout the hydrogen supply chain.

The key output of the methodology is a decision matrix that enables the systematic evaluation of the risk level associated with specific technological supply chains and the identification of relevant contaminants with respect to hydrogen quality requirements for fuel cell vehicles.

Vodíková ostrovní řešení – podpůrné nástroje koncepčního návrhu

Vojtěch Příkryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Petr Polanský

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: vojtech.prikryl@cdv.gov.cz

Abstrakt

Příspěvek představuje výsledky projektu DP001 „Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility“, realizovaného v rámci Národního centra vodíkové mobility (NAHYC-m). Cílem projektu bylo vytvořit metodiku pro koncepční návrh vodíkových ostrovních řešení, která propojují výrobu, skladování a spotřebu vodíku v jedné lokalitě a umožňují optimalizaci investičních i provozních nákladů. Metodika byla ověřena na pěti modelových lokalitách v České republice: Litoměřice, Most/Litvínov, Liberec, SAKO Brno a Planá nad Lužnicí.

Pro jednotlivé lokality byly navrženy varianty vodíkových řetězců využívající různé zdroje energie, způsoby výroby, skladování a distribuce vodíku. Následně bylo provedeno technické a ekonomické hodnocení navržených řešení včetně analýzy vlivu dotační podpory. Výsledky ukazují, že ekonomika ostrovních řešení je významně ovlivněna zejména využitím elektrolyzéru, potřebou skladovacích kapacit, charakterem zdroje elektrické energie a velikostí spotřeby vodíku.

Příspěvek shrnuje klíčové poznatky a doporučení pro návrh vodíkových ostrovních řešení v podmínkách České republiky a identifikuje faktory, které mají zásadní vliv na jejich technickou proveditelnost a ekonomickou udržitelnost. Výsledky mohou sloužit jako podklad pro rozhodování investorů, samospráv i provozovatelů dopravní infrastruktury při přípravě projektů vodíkové mobility.

1. Úvod

Tento příspěvek je založený na výsledcích dosažených v rámci projektu DP001: Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility, který je součástí Národního centra vodíkové mobility (NAHYC-m).

Cílem projektu bylo navrhnout metodiku pro modulární vodíková ostrovní řešení, která podpoří rozvoj vodíkové infrastruktury v dopravě s důrazem na efektivní optimalizaci investičních a provozních nákladů. Vodíkovým ostrovním řešením se dále myslí lokalita, která obsahuje výrobu a spotřebu vodíku. Cílem ostrovního řešení je minimalizovat přepravní vzdálenosti od výroby ke spotřebě. Metodika vytvořená v tomto projektu představuje zjednodušený návod pro investory, podle kterého mohou navrhnout ostrovní řešení tak, aby výroba a spotřeba vodíku byly co nejvíce ve shodě, čímž dojde k optimalizaci investičních a provozních nákladů ostrovního řešení.

Tento příspěvek představuje návrhy ostrovních řešení v modelových lokalitách po ČR a jeho cílem je představit některá základní pravidla návrhu ostrovních řešení v podmínkách ČR.

2. Lokality

Pro účel vytvoření metodiky bylo zvoleno 5 modelových lokalit v ČR. V těchto lokalitách byl vypracován návrh ostrovního řešení. Poznatky získané na modelových lokalitách byly využity k tvorbě a ověření metodiky. Jedná se o tyto lokality:

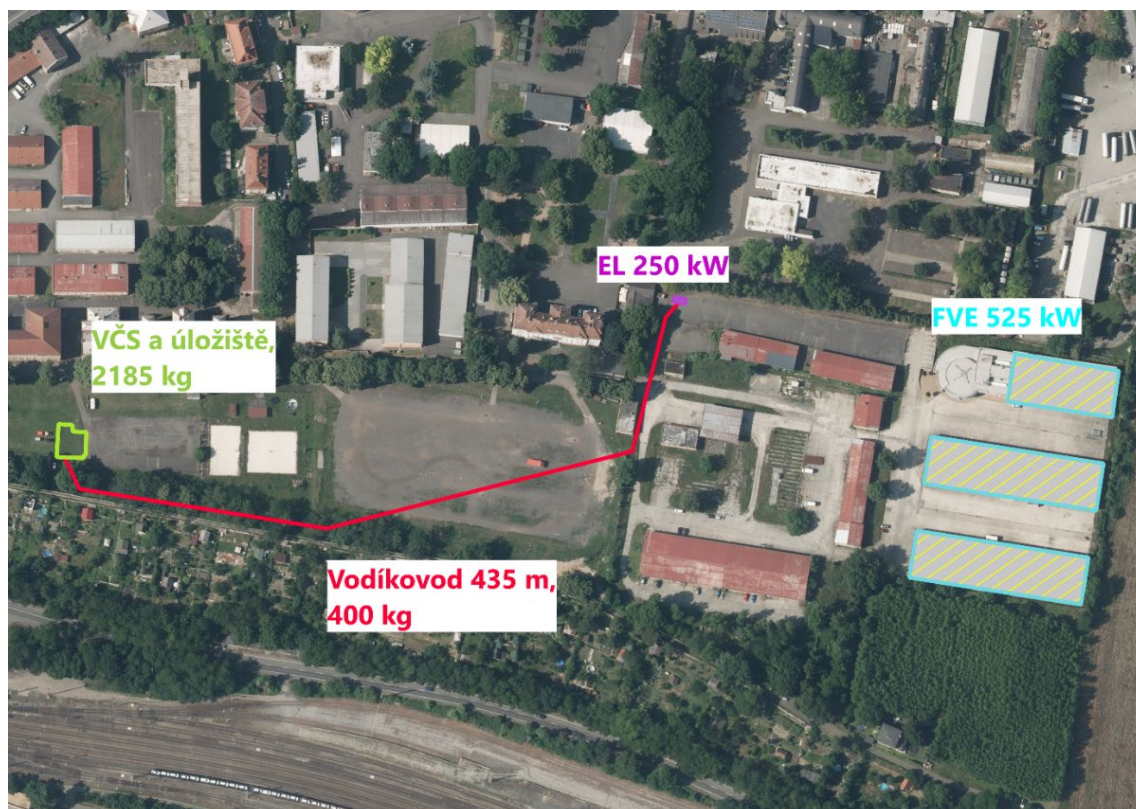
1. Litoměřice [1]
2. Most/Litvínov [2]
3. Liberec [3]
4. SAKO Brno [4]
5. Planá nad Lužnicí [5]

2.1 Litoměřice

Lokalita Litoměřice byla zvolena, protože v prostorách výzkumného areálu Ringen byla mj. plánována výstavba pilotního vodíkového hospodářství. 250 kW elektrolyzátor (EL) využívající elektřinu z 525 kW FVE vyrábí vodík pro palivový článek, který dodává teplo a elektřinu areálu v zimních měsících. Podle původního návrhu by elektrolyzátor vyrobil cca 6,7 t H₂ ročně a palivový článek by spotřeboval pouze cca 1 t H₂ ročně. Je tedy nutné pro přebytečný vodík najít využití, například v autobusové dopravě.

V Litoměřicích jsou v provozu 4 linky autobusové dopravy. Vzhledem k množství dostupného vodíku je možné převést jednu linku na vodíkový pohon. Jelikož fotovoltaická elektrárna vyrobí výrazně více elektřiny v letních měsících počítáme, že v letních měsících by vodíkový autobus jezdil po náročnější lince a v zimním období se přesunul na linku s nižší denní spotřebou paliva. I přes toto opatření je v ostrovním řešení nutné skladovat velké množství vodíku, protože samotná zimní výroba nestačí k pokrytí spotřeby autobusu a palivového článku. Kompletní návrh ostrovního řešení ukazuje Obr. 1.

Obr. 1. Návrh ostrovního řešení – Litoměřice



Vodíková čerpací stanice (VČS) na obrázku obsahuje také úložiště vodíku složené z několika stacionárních kontejnerů. Vzhledem k tomu, že nejvhodnější plocha k umístění stanice není přímo v sousedství elektrolyzérů jsou výroba a spotřeba propojeny podzemním vodíkovodem dlouhým 435 m. Výhoda tohoto řešení je, že samotný vodíkovod může sloužit jako úložiště vodíku a tedy snižuje nutnou kapacitu úložiště u stanice.

Výslednou cenu za 1 kg H₂ ukazuje Tab. 1. Vzhledem k tomu, že některé prvky ostrovního řešení budou dotovány z projektu výstavby výzkumného centra a VČS by pravděpodobně sloužila jako neveřejná pouze pro účely autobusové dopravy, pak se jako nejreálnější cena jeví 1 008 Kč/kg H₂ (počítáme s 35% dotací z programu IROP).

Důvod, proč je cena takto vysoká ukazuje Obr. 2, hlavní podíl na ceně mají investiční náklady, hlavně na výstavbu úložiště vodíku, vodíkové stanice a vodíkovodu. Tento efekt je způsobený tím, že ostrovní řešení sice vyrábí plně obnovitelný vodík podle evropské legislativy, ale elektrolyzér má velmi nízké využití (<16 % max. roční kapacity). Pro ekonomickou životnost tohoto řešení je tedy nezbytné získat další zdroj elektřiny, který doplní FVE. Pokud by byla využita např. větrná energie, pak by díky její vyšší výrobě v zimních měsících došlo k vyššímu využití elektrolyzérů, takže investiční náklady by se rozložily do většího množství vodíku a také by mohla být snížena kapacita úložiště, což rovněž povede k významným úsporám.

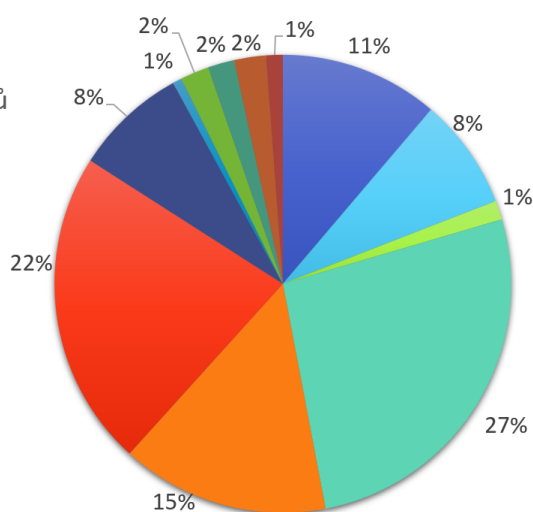
Tab. 1. Cena za 1 kg H₂ – Litoměřice

H ₂ cena – bez dotací	1 765 Kč/kg H ₂	69 €/kg H ₂
H ₂ cena – dotovaná (OPD)	707 Kč/kg H ₂	28 €/kg H ₂
H₂ cena – dotovaná (IROP)	1 008 Kč/kg H₂	40 €/kg H₂
H ₂ cena – dotovaná (IROP+Greengas)	961 Kč/kg H ₂	38 €/kg H ₂

Obr. 2. Rozklad ceny 1 kg H₂ – Litoměřice

Složky ceny

- CAPEX - Elektrolyzér
- CAPEX - Elektrolyzér, výměna komponentů
- CAPEX - Palivový článek
- CAPEX - Úložiště vodíku
- CAPEX - Vodíkovod
- CAPEX - Vodíková stanice
- Cena elektřiny - PPA
- Cena elektřiny - Stanice a kompresor
- Údržba elektrolyzérů
- Údržba palivového článku
- Údržba stanice
- Údržba úložiště



2.2. Most/Litvínov

Návrh ostrovního řešení v Mostě a Litvínově vychází z dokumentu SWOT analýza – porovnání využití autobusů s alternativním pohonem v rámci MHD v Mostě a Litvínově [6]. Tento dokument zjišťuje, které oběhy hromadné dopravy v Mostě a Litvínově je možné obsloužit bateriovými elektrobusey a pro které je potřeba vodíkový pohon. Po aktualizaci tohoto dokumentu vyšlo, že je potřeba 19 autobusů pro Most a 9 pro Litvínov.

Návrh ostrovního řešení počítá s dvěma VČS v depech dopravních podniků obou měst. Jako zdroj vodíku pro ostrovní řešení se nabízí stávající výroba vodíku v ORLEN Unipetrol. Vodík by byl přepravován trailery s ocelovými tlakovými nádobami. Pro ostrovní řešení jsou potřeba 4 takovéto trailery (2 v Mostě, 1 v Litvínově, 1 v ORLEN Unipetrol), které by sloužily zároveň jako úložiště vodíku pro stanice. Při vyprázdňení úložiště se trailer jednoduše vymění za plný. Pro plynulý provoz vodíkové flotily je nutné vhodně navrhnout harmonogram plnění vodíku, aby se celá flotila naplnila před příští směnou a harmonogram závozu trailerů, aby byl vždy dostatek vodíku. Ukázalo se, že při plnění autobusů rychlostí 1 kg H₂/min a denním zavážení trailerů (12h směna) lze flotilu obsloužit s malou časovou rezervou.

Výslednou cenu za 1 kg H₂ ukazuje Tab. 2. jelikož se v návrhu ostrovního řešení počítá s odběrem vodíku z již existující výroby je zde uvedena nákupní cena vodíku.

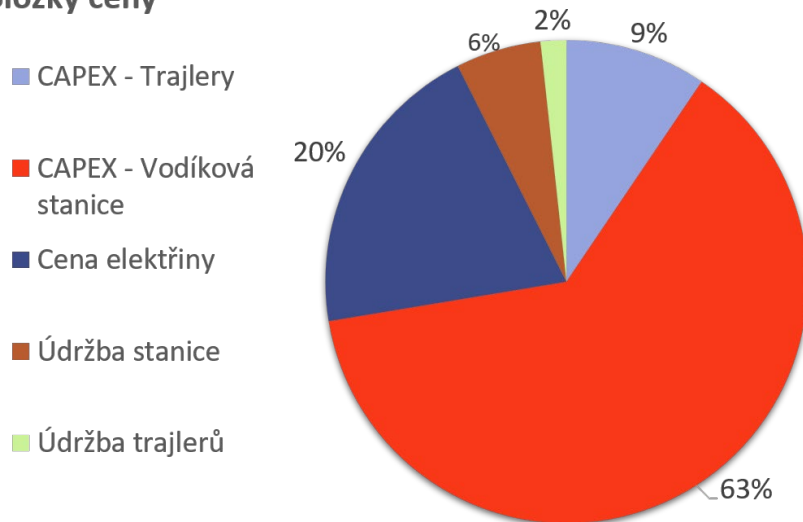
Obr. 3. ukazuje, že dominantní položkou v ceně vodíku je investice na pořízení stanic, což vychází z toho, že stanice jsou dvě a jejich provozní režim je poměrně náročný kvůli nutnosti naplnit celou flotilu přes noc. Vzhledem k využití neobnovitelného vodíku je reálnější cena ~348 Kč/kg H₂, protože dotačně podpořené stanice se zavazují, že od roku 2035 budou vydávat pouze obnovitelný vodík a ostrovní řešení by od tohoto data musela najít jiný zdroj vodíku.

Tab. 2. Cena za 1 kg H₂ – Most a Litvínov

	Nákupní cena	Cena technologií	Celková cena	
H ₂ cena – bez dotací	~200 Kč/kg H ₂	148 Kč/kg H ₂	~348 Kč/kg H ₂	~14 €/kg H ₂
H ₂ cena – dotovaná (IROP)	~200 Kč/kg H ₂	110 Kč/kg H ₂	~310 Kč/kg H ₂	~12 €/kg H ₂

Obr. 3. Rozklad ceny 1 kg H₂ – Most a Litvínov

Složky ceny



2.3. Liberec

V Liberci je plánovaná výstavba nového dopravního terminálu, jehož součástí by mohla být vodíková čerpací stanice. Tato stanice by sloužila dvěma příměstským autobusům. Jako zdroj elektřiny se nabízí 100 MW_p fotovoltaická elektrárna na místě bývalého letiště v Ralsku. Vzhledem k tomu, že FVE je od Liberce cca 20 km je potřeba navrhnout jak propojit výrobu se spotřebou.

V návrhu ostrovního řešení bylo zkoumáno, jestli se více vyplatí mít menší elektrolyzátor s bateriovým úložištěm, nebo větší, který vyrábí pouze když svítí slunce. Vzhledem k ceně bateriového úložiště byla vybrána varianta s menším elektrolyzátelem. Dále bylo zkoumáno umístění elektrolyzátoru: u FVE s dovozem pomocí silničních trailerů vs. u VČS s využitím přenosové sítě.

Varianta u FVE: Transport by probíhal pomocí dvou párů AB-roll kontejnerů. První pár by stál u elektrolyzátoru, kde by sloužil jako úložiště pro vyrobený vodík. Druhý pár by stál u stanice a sloužil by jako úložiště pro vydávaný vodík. Jednou týdně by se oba páry kontejnerů prohodily. Nevýhodou tohoto řešení je, že u výroby by musela stát kompresní stanice pro plnění kontejnerů a menší stacionární úložiště pro dobu, kdy dochází k výměně kontejnerů.

Varianta u VČS: V této variantě by byla elektrická energie dodávána z FVE v Ralsku přes elektrickou soustavu pomocí PPA kontraktu (dlouhodobý kontrakt o dodávce energie z obnovitelných zdrojů za pevnou cenu) do elektrolyzátoru stojícího poblíž stanice. Výhodou tohoto řešení je, že stacionární úložiště vodíku u stanice by mohlo být plněné kompresorem. Nevýhodou tohoto řešení je, že elektrická energie se prodáží o poplatky za využívání přenosové sítě a také by bylo nutné vyřešit umístění a stavební povolení pro elektrolyzátor v centru města.

Ekonomické zhodnocení obou variant ukazuje Tab. 3. Pro návrh ostrovního řešení se jako nejrealističtější jeví varianta, kdy výrobní část by byla dotována z programu Greengas – 45 % dotace a výdejní část dotována z programu IROP – 35 % pro neveřejnou stanici. V tomto případě cena vychází na 594 Kč/kg H₂, což je výrazně lepší cena než v Litoměřicích. Důvodem je, že FVE má několikanásobně vyšší výrobní kapacitu než je elektrolyzátor schopen spotřebovat, takže je možné vyrábět na plný výkon kdykoliv, kdy FVE vyrábí, tedy využití elektrolyzátoru je mnohem vyšší než v Litoměřicích a není nutné sezónní skladování.

Ceny uvedené v Tab. 3 předpokládají, že se vyrobí pouze tolik vodíku, kolik je potřeba pro provoz dvou autobusů. Výrobní kapacita elektrolyzátoru je o něco vyšší a pokud by pro přebytečný vodík byl nalezen odběratel může cena vodíku významně klesnout.

Tab. 3. Cena za 1 kg H₂ – Liberec

	Varianta u FVE		Varianta u VČS	
H ₂ cena – bez dotací	906 Kč/kg H ₂	36 €/kg H ₂	749 Kč/kg H ₂	30 €/kg H ₂
H ₂ cena – dotovaná (OPD+Greengas)	527 Kč/kg H ₂	21 €/kg H ₂	470 Kč/kg H ₂	18 €/kg H ₂
H₂ cena – dotovaná (IROP+Greengas)	651 Kč/kg H ₂	26 €/kg H ₂	594 Kč/kg H₂	23 €/kg H₂

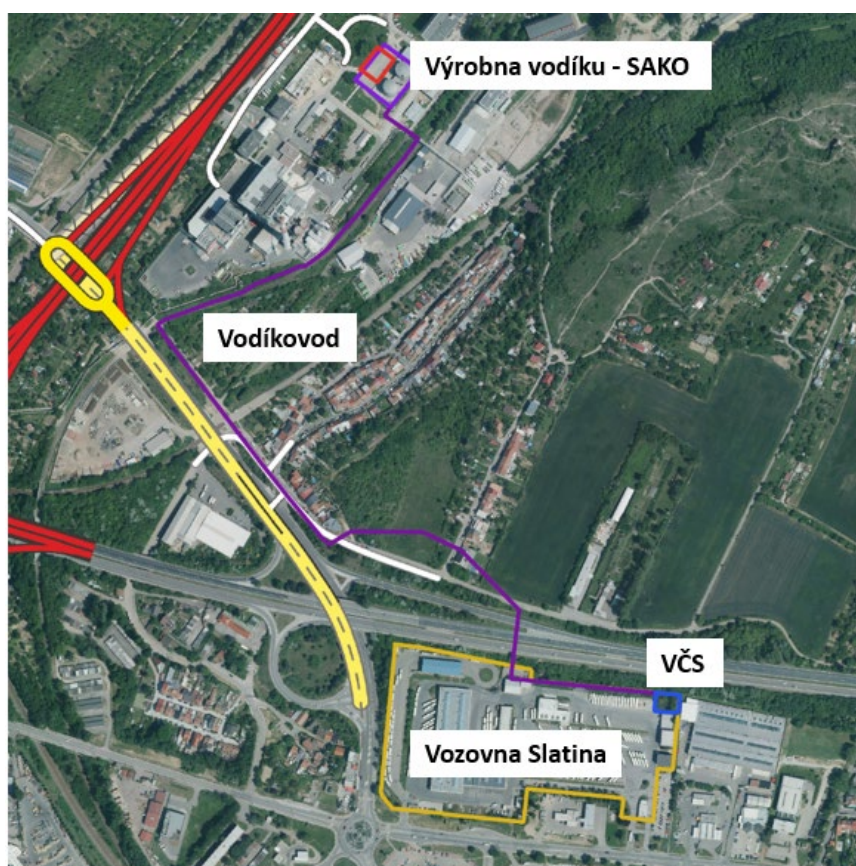
2.4. SAKO Brno

V lokalitě SAKO Brno se nachází zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO). ZEVO představuje stabilní zdroj elektřiny, který by mohl být využit k výrobě vodíku, kterým by mohly být plněny vodíkové autobusy. V sousedství areálu SAKO se nachází vozovna Dopravního podniku města Brna. Zdejší CNG autobusy se blíží konci životnosti a jejich náhrada by tedy mohla být vodíková. Vozovna bude v blízké době rekonstruována, takže by bylo možné připravit prostor pro vodíkové technologie. SAKO Brno i dopravní podnik patří jsou vlastněny městem, což by ulehčilo spolupráci.

V návrhu ostrovního řešení bylo mimo jiné zkoumáno, která výrobní technologie je pro výrobu u ZEVO nejvhodnější. Vzhledem k tomu, že ZEVO vytváří kromě elektřiny také teplo bylo zkoumáno využití elektrolyzéru s pevnými oxidy, který pracuje na vysokých teplotách. Také byla zkoumána možnost využití odpadního CO_2 ze spalování odpadů k metanizaci vodíku. Obě varianty se ukázaly ekonomicky nevýhodné – obě technologie by vyžadovaly řádově větší výrobu než navrhujeme v ostrovním řešení.

Finální návrh ostrovního řešení představuje Obr. 4. Vzhledem k omezenému prostoru ve vozovně jsou technologické celky rozděleny na výrobu v SAKO Brno a spotřebu ve Vozovně Slatina. Oba celky jsou pak propojeny vodíkovodem.

Obr. 4. Návrh ostrovního řešení – SAKO Brno



Pro výrobu byly zvoleny dva 1 MW elektrolyzéry s aniontovou výměnnou membránou, které vyrobí 740 kg H_2 denně. Toto množství stačí k provozu až 24 vodíkových autobusů. Jelikož dopravní podnik požaduje zachování stejné délky plnicího okna pro celou flotilu autobusů i při přechodu na vodík je nutné, aby stanice měla 3 výdejní stojany, aby bylo možné všech 24 autobusů naplnit při plnicí rychlosti 1 kg H_2 /min. Řešení je navrženo tak, aby i při částečné poruše některého z celků

nedošlo k výpadku celého vodíkového řetězce. Vodíkovod je veden souběžně v 1,3 km dlouhé trase stávajícího horkovodu a tlak vodíku v něm je 500 bar.

Ekonomického zhodnocení návrhu uvádí Tab. 4. Elektřina ze spalování odpadu není z pohledu evropské legislativy dostatečná ke klasifikaci vodíku jako plně obnovitelného (obnovitelné palivo nebiologického původu – RFNBO), tudíž není na pořízení vodíkové stanice možné získat dotaci. Alternativní možností je získat dotaci na celé ostrovní řešení jako na výzkumnou infrastrukturu v programu OP TAK – míra dotace 20 %.

Tab. 4. Cena za 1 kg H₂ – SAKO Brno

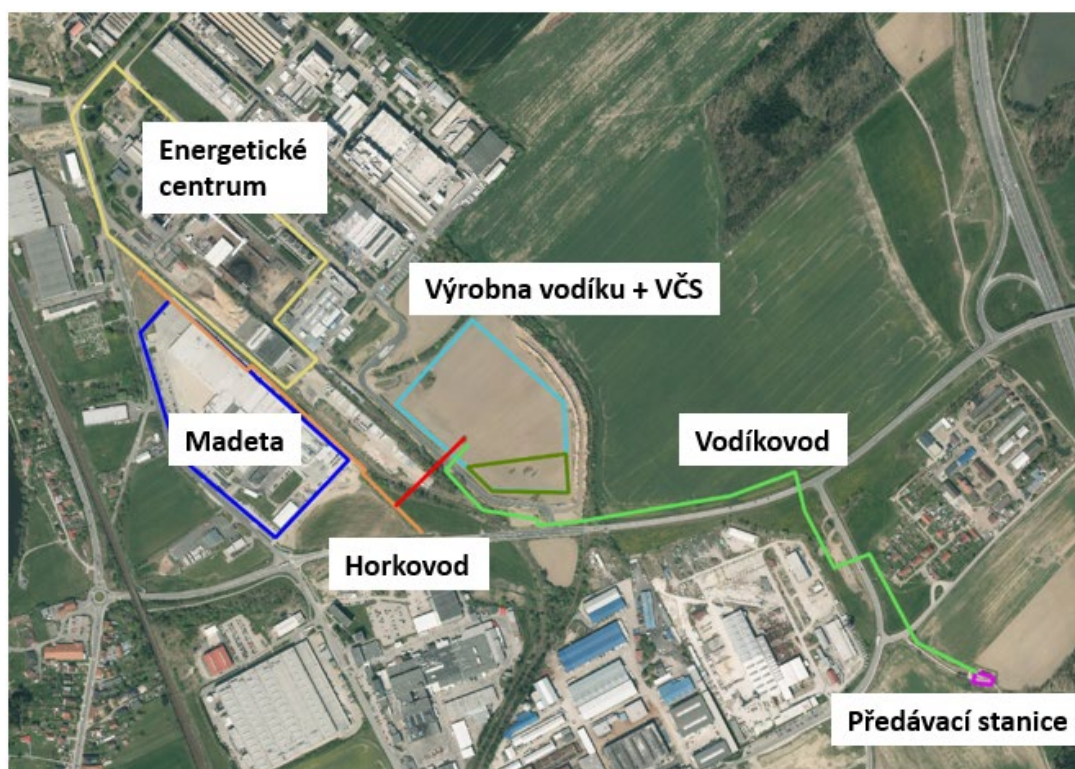
H ₂ cena – bez dotací	264 Kč/kg H ₂	~11 €/kg H ₂
H ₂ cena – dotovaná (OP TAK)	233 Kč/kg H ₂	~9 €/kg H ₂

2.5. Planá nad Lužnicí

V Plané nad Lužnicí se nachází energetické centrum, které kombinuje výrobu elektřiny pomocí FVE a spalování biomasy. Lokalita je také zdrojem tepla pro Planou, v blízkém okolí je veden tranzitní plynovod a v sousedství je společnost Madeta s významnou logistickou flotilou. Návrh ostrovního řešení se zabývá výrobou vodíku pro veřejnou VČS, využitím odpadního tepla z elektrolýzy a možností vtláčení vodíku do plynárenské sítě.

Návrh ostrovního řešení ukazuje Obr. 5. V návrhu se předpokládá, že výroba vodíku a VČS budou na jednom místě. Výrobní pak bude připojená na prodloužený horkovod (červeně) a vodíkovodem na předávací stanici, u které bude probíhat vtláčení.

Obr. 5. Návrh ostrovního řešení – Planá nad Lužnicí



Pro výrobu byly zvoleny 2,5 MW + 1 MW elektrolyzéry s výrobní kapacitou 290 t H₂ ročně z toho 139 t je vyrobeno pomocí elektřiny z FVE a 151 t elektřinou z biomasy.

Flotila Madety se skládá z 18 vozidel – 8 cisteren a 10 tahačů. Pro minimalizaci prostojů při plnění vozidel je čerpací stanice podobně jako v Brně navržena se 3 výdejními stojany s rychlostí plnění 1 kg/min. Jeden z těchto stojanů umožňuje také plnění na 700 bar, tedy pro osobní vozidla.

Vtláčení vodíku je navržena tak, aby nedocházelo ke kolísání podílu mezi vodíkem a zemním plynem. Z tohoto důvodu je vtláčení modulováno podle aktuálního průtoku plynu, vodíku je tedy 0,06 hm. %, což odpovídá max. 300 kg H₂ denně.

Ekonomické zhodnocení návrhu ukazuje Tab. 5. Vzhledem k tomu, že by spotřebitelé na VČS neměli platit za vtláčení vodíku, které s dopravou nesouvisí, jsou ceny za jednotlivé komponenty v tabulce rozděleny. Rozdělení ukazuje, že vtláčení je v zamýšleném množství ekonomicky neefektivní, a proto tabulka ukazuje také cenu vodíku, pokud by z návrhu bylo vtláčení odstraněno (bude odebrán 1 MW elektrolyzér, vodíkovod a vtláčecí jednotka). Podobně jako v Brně je i zde vodík neobnovitelný, a tedy lze získat pouze dotaci na výzkumnou infrastrukturu.

Tab. 5. Cena za 1 kg H₂ – Planá nad Lužnicí

	S vtláčením				Bez vtláčení	
	Cena na VČS		Cena na předávací stanici		Cena na VČS	
H ₂ cena – bez dotací	237 Kč/kg H ₂	~10 €/kg H ₂	785 Kč/kg H ₂	~32 €/kg H ₂	242 Kč/kg H ₂	~10 €/kg H ₂
H ₂ cena – dotovaná (OP TAK)	212 Kč/kg H ₂	~9 €/kg H ₂	632 Kč/kg H ₂	~26 €/kg H ₂	210 Kč/kg H ₂	~9 €/kg H ₂

3. Závěr

Na 5 lokalitách je demonstrováno, jak je možné navrhnout ostrovní řešení v České republice. Příspěvek ukazuje best practices a čemu se při návrhu naopak vyhnout. Hlavní poznatky získané z každé lokality jsou následující:

Litoměřice – malá FVE jako zdroj energie nestačí, Sezónní skladování je příliš nákladné, využití elektrolyzérů je klíčové.

Most/Litvínov – Neobnovitelný vodík je cenově přijatelnější než plně obnovitelný, větší spotřeba vodíku vede k vyšší využitelnosti technologie a tedy nižší ceně za kg, dotační podmínky vytvářejí nejistotu po roce 2035.

Liberec – Předimenzovaná FVE vede k vyšší utilizaci a nižším cenám, výroba na místě je levnější, ale komplikovanější.

SAKO Brno – spalováním odpadů nelze vyrobit obnovitelný vodík, metanizace a vysokoteplotní elektrolýza se nevyplatí, současné plnění z vícero stojanů umožní zachování stávajících plnicích oken

Planá nad Lužnicí – Kombinací FVE se spalováním biomasy také nelze dosáhnout na plně obnovitelný vodík, vtláčení vodíku se za současných podmínek nevyplatí.

Literatura

- [1] VAHALÍK, Bronislav; PŘIKRYL, Vojtěch; LIČBINSKÝ, Roman; POLANSKÝ, Petr; DYNDÁ, Vladimír; LEVÝ, Martin; MÁDLE, Luděk; SOCHOR, Jan; POLÁČIK, Jan; PŘIBYL, Zdeněk; ŠEVČÍK, Jakub a PŘIKRYL, Jan. *Optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku v ostrovním řešení* [online]. Dostupné z: https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP001-V02-O-Overeni_metody_optimalizace_ukladani_H2.pdf
- [2] VAHALÍK, Bronislav; PŘIKRYL, Vojtěch; LIČBINSKÝ, Roman; POLANSKÝ, Petr; DYNDÁ, Vladimír; LEVÝ, Martin; MÁDLE, Luděk; SOCHOR, Jan; POLÁČIK, Jan; PŘIBYL, Zdeněk; ŠEVČÍK, Jakub a PŘIKRYL, Jan. *Optimalizace provozu ostrovní vodíkové čerpací stanice pro kombinovanou flotilu autobusů* [online]. Dostupné z: https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP001-V03-O-Overeni_metody_navrhu_optimalizovaneho_provozu_VCS_pro_flotilu_autobusu.pdf
- [3] VAHALÍK, Bronislav; PŘIKRYL, Vojtěch; LIČBINSKÝ, Roman; POLANSKÝ, Petr; VYSKOČILOVÁ, Lucie; DYNDÁ, Vladimír; LEVÝ, Martin; MÁDLE, Luděk; SOCHOR, Jan; POLÁČIK, Jan; PŘIBYL, Zdeněk; ŠEVČÍK, Jakub a PŘIKRYL, Jan. *Optimalizace parametrů vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku* [online]. Dostupné z: https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP001-V04-O-Optimalizace_parametru_VCS_a_jejeho_zasobovani.pdf
- [4] VAHALÍK, Bronislav; PŘIKRYL, Vojtěch; SMUTNÝ, Roman; DYNDÁ, Vladimír; LEVÝ, Martin; MÁDLE, Luděk; SOCHOR, Jan; PŘIBYL, Zdeněk; PELČÁK, Jakub; ŠEVČÍK, Jakub a PŘIKRYL, Jan. *Optimalizace ostrovního vodíkového hospodářství v zařízení pro energetické využití odpadů* [online]. květen 2025. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/files/nahyc-dp001-v05-o-optimalizace-ostrovnio-vodikoveho-hospodarstvi-v-zarizeni-pro-energeticke-vyuziti-odpadu.pdf>
- [5] VAHALÍK, Bronislav; PŘIKRYL, Vojtěch; SMUTNÝ, Roman; DYNDÁ, Vladimír; LEVÝ, Martin; MÁDLE, Luděk; SOCHOR, Jan; PŘIBYL, Zdeněk; PELČÁK, Jakub; ŠEVČÍK, Jakub a PŘIKRYL, Jan. *Optimalizace ostrovního vodíkového hospodářství v energetickém centru* [online]. srpen 2025. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/files/nahyc-dp001-v06-o-optimalizace-ostrovnio-vodikoveho-hospodarstvi-v-energetickem-centru.pdf>
- [6] SMÍŠEK, Ondřej. *SWOT analýza - porovnání využití autobusů s alternativním pohonem v rámci MHD v Mostě a Litvínově*. září 2022

Poděkování

Tato práce vznikla na základě výsledků projektu TN02000007-001. Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národní centra kompetence.

Hydrogen microgrids – conceptual design support tools

Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík, Roman Smutný, Petr Polanský

Transport Research Centre

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: vojtech.prikryl@cdv.gov.cz

Abstract

This publication presents the results of Project DP001, “Methodology for the development of microgrid solutions for the acceleration of hydrogen mobility” carried out as part of the National Center for Hydrogen Mobility (NAHYC-m). The goal of the project was to develop a methodology for the conceptual design of hydrogen island solutions that integrate hydrogen production, storage, and consumption within a single location and enable the optimization of both investment and operating costs. The methodology was validated at five model locations in the Czech Republic: Litoměřice, Most/Litvínov, Liberec, SAKO Brno, and Planá nad Lužnicí. For each location, variants of hydrogen value chains were proposed, utilizing various energy sources, as well as different methods of hydrogen production, storage, and distribution. Subsequently, a technical and economic evaluation of the proposed solutions was conducted, including an analysis of the impact of subsidy support. The results show that the economics of stand-alone solutions are significantly influenced, in particular, by the use of an electrolyzer, the need for storage capacity, the nature of the electricity source, and the volume of hydrogen consumption.

This publication summarizes key findings and recommendations for the design of hydrogen island solutions in the Czech Republic and identifies factors that have a fundamental impact on their technical feasibility and economic sustainability. The results can serve as a basis for decision-making by investors, local governments, and transportation infrastructure operators when preparing hydrogen mobility projects.

Plnicí standardy vodíkové stanice z pohledu bezpečnosti

Roman Smutný, Bronislav Vahalík, Vojtěch Příkryl

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: roman.smutny@cdv.gov.cz

Abstrakt

Vodík se často zmiňuje v souvislosti s dekarbonizací energetiky a dopravy. Jednou z jeho zdůrazňovaných výhod je rychlost naplnění nádrže vozidla, která má být srovnatelná s tankováním kapalných paliv, na rozdíl od dobíjení baterie. Rychlé plnění vodíku ale není technicky samozřejmé. Naráží na fyzikální překážku spočívající v tom, že se vodík při stlačování v nádrži a při škrcení zahřívá, a teplota plynu přitom nesmí překročit konstrukční limit tlakové nádrže. Odpovědí na tento problém je soubor plnicích protokolů SAE International, který definuje závazné algoritmy řízeného plnění tak, aby proces zůstal v bezpečných mezích za všech provozních podmínek. Tento příspěvek podává přehled aktuálního stavu standardizace se zaměřením na normy SAE J2601 (osobní vozidla), SAE J2601-5 (rychlé plnění těžkých vozidel, revize únor 2025) a SAE J2799 (komunikace mezi vozidlem a stanicí). Důraz je kladen na bezpečnostní mechanismy, které jednotlivé protokoly obsahují, jako tlakový koridor, teplotní limity, řízení dynamické reakce, chování při ztrátě komunikace a nové mechanismy zavedené v revizi J2601-5 pro těžká vozidla.

Klíčová slova: vodíková mobilita, plnicí protokoly, SAE J2601, SAE J2601-5, bezpečnost plnění, nízkoemisní doprava

1. Úvod

O vodíku se v posledních letech mluví stále častěji, a to nejen v souvislosti s dekarbonizací průmyslu, ale i dopravy. Vedle bateriových elektromobilů se do popředí zájmu dostává alternativa v podobě vodíkového pohonu, u které se často akcentuje jedna zásadní praktická výhoda: rychlost naplnění nádrže srovnatelná s tankováním kapalných paliv. Dosažení této rychlosti je však termodynamicky náročnější, než by se dalo čekat, a naráží na fyzikální omezení, která nejsou na první pohled zřejmá.

Nárůst teploty vodíku v nádrži během plnění má dvě příčiny. První je kompresní teplo vznikající při zvyšování tlaku plynu v nádrži. Druhou je Jouleův–Thomsonův jev při škrcení vodíku, který je za daných tlakových a teplotních podmínek charakterizován záporným Jouleovým–Thomsonovým koeficientem. Vodík vykazuje záporný Jouleův–Thomsonův koeficient v celém rozsahu typických podmínek plnění, tedy přibližně 210 až 470 K a 0,1 až 900 bar. Na rozdíl od většiny běžných technických plynů se tedy vodík při izoentalpické expanzi neochlazuje, ale ohřívá. Teplota v nádrži se přitom musí udržet v přípustném rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, který stanovují mezinárodní normy, aby nedošlo k poškození kompozitního obalu tlakové nádoby. Rychlost plnění je proto vždy kompromisem mezi dobou tankování a bezpečností provozu vozidla i infrastruktury.

Aby bylo možné rychlé plnění provozovat bezpečně a zaručit kompatibilitu mezi vozidly a stanicemi napříč výrobci, vyvinula americká profesní organizace SAE International soubor plnicích protokolů. Ty definují závazné algoritmy plnění tak, aby

proces zůstal v bezpečných mezích bez ohledu na výrobce vozidla, výrobce stanice, teplotu okolí nebo počáteční stav nádrže. Klíčovým nástrojem je předchlazení vodíku před výdejem. Protokoly pracují s výdejní teplotou paliva v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, rozdělenou do čtyř teplotních tříd T40, T30, T20 a T10, kde T40 je nejchladnější. Tyto protokoly jsou dnes celosvětově přijímaným referenčním technickým základem pro vodíkovou plnicí infrastrukturu a mezinárodní normy ISO na ně přímo odkazují ve svých specifikacích pro plnicí stanice (ISO 19880-1) i pro plnicí spojky (ISO 17268).

Tento příspěvek podává přehled aktuálního stavu standardizace SAE v oblasti rychlého plnění vodíkem, s důrazem na bezpečnostní mechanismy, které jednotlivé protokoly obsahují. Zaměřuje se na tři klíčové dokumenty: SAE J2601 pro osobní vozidla, SAE J2601/5 pro střední a těžká vozidla, vydaný v únoru 2024 a revidovaný v únoru 2025, a SAE J2799 pro komunikaci mezi vozidlem a stanicí. Příspěvek vznikl v rámci projektu Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007), jehož jedním z výstupů jsou také didaktické podklady pro úroveň středního školství.

2. Proč rychlé plnění

Plnění vodíkových vozidel může probíhat ve dvou základních režimech: pomalém plnění (anglicky time fill) a rychlém plnění (anglicky fast fill).

Při pomalém plnění proudí vodík do nádrže nízkým průtokem po dobu desítek minut až několika hodin. Delší doba plnění umožňuje odvod tepla do stěny nádrže, takže ohřev plynu nedosahuje kritických hodnot a není nutné aktivní předchlazení ani dynamické řízení procesu. Infrastruktura pomalého plnění je proto konstrukčně jednodušší a investičně méně náročná.

Rychlé plnění má za cíl naplnit nádrž během několika minut, srovnatelně s tankováním kapalných paliv. Vyžaduje vysoký průtok plynu, aktivní předchlazení vodíku před vstupem do vozidla, typicky na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, a přesné řízení průběhu plnění. Bez předchlazení vede ohřev plynu k tomu, že při dosažení předepsaného koncového tlaku zůstane v nádrži menší množství vodíku, tedy k neúplnému naplnění.

Volba mezi oběma režimy nesouvisí primárně s typem vozidla, ale s provozní situací. Autobusy a nákladní vozidla mohou pomalé plnění využívat v depech, kde stojí přes noc a doba naplnění není kritická. Během dne, kdy jsou vozidla nasazena na trasách, ale potřebují mít možnost rychlého doplnění paliva. Osobní vozidla vlastní depo obvykle nemají a plní se výhradně na veřejných stanicích rychlým plněním.

Ekonomický tlak na rychlost plnění je nejsilnější u těžké dopravy:

- U kamionové dopravy je doba plnění přímo ekonomickou veličinou. Řidič má legislativně omezenou pracovní dobu a každá minuta strávená na veřejné stanici snižuje celkovou produktivitu vozidla.
- U městské hromadné dopravy je rychlost plnění mimo depo určující pro dimenzování vozového parku. Možnost dotankovat během směny na trase snižuje počet vozidel nutných v provozní rezervě.

Rychlé plnění je tedy nezbytnou podmínkou pro to, aby vodíková mobilita mohla ekonomicky a provozně soupeřit s konvenčními palivy i s bateriovými vozidly. Zároveň jde o režim, který naráží na fyzikální omezení popsána v následující kapitole. Tento příspěvek se dále zabývá výhradně rychlým plněním, protože právě jeho technická náročnost vedla ke vzniku souboru plnicích protokolů SAE.

3. Úskalí rychlého plnění vodíku

Nárůst teploty vodíku v nádrži během plnění má dvě příčiny. První je kompresní teplo, které vzniká přívodem entalpie do nádrže při zvyšování tlaku plynu. Druhou je Jouleův-Thomsonův jev při škrcení vodíku v armaturách a plnicí spojce. U většiny běžných plynů, například kyslíku, dusíku, vzduchu nebo oxidu uhličitého, je expanze za běžných podmínek doprovázena ochlazováním plynu. Vodík se chová opačně: v celém rozsahu podmínek typických pro plnění, tedy přibližně 210 až 470 K a 0,1 až 900 bar, má záporný Jouleův-Thomsonův koeficient a při izoentalpické expanzi se ohřívá [1, 2].

Oba mechanismy působí současně a jejich intenzita roste s rychlostí plnění. Teplota plynu v nádrži přitom nesmí překročit hodnotu, na kterou je nádrž konstruována, typicky 85 °C. Při překročení hrozí poškození polymerní vložky, snížení životnosti nádrže nebo v krajním případě ztráta těsnosti.

3.1. Kritické parametry nádrže

Soustava tlakových nádrží, ventilů, snímačů a propojovacího potrubí ve vozidle se v normách označuje jako CHSS (Compressed Hydrogen Storage System). Norma SAE J2579 [3] definuje tři klíčové tlakové hladiny, se kterými plnicí protokoly pracují:

- NWP (Nominal Working Pressure) – jmenovitý pracovní tlak, referenční hodnota při 15 °C a plném naplnění. Pro osobní vodíková vozidla dominuje tlaková třída H70 (NWP = 70 MPa), pro autobusy a některá starší vozidla H35 (NWP = 35 MPa).
- MOP (Maximum Operating Pressure) – nejvyšší přípustný tlak během plnění, který činí $1,25 \times \text{NWP}$ (tedy 87,5 MPa pro H70). Stanice ho může krátkodobě dosáhnout.
- MAWP (Maximum Allowable Working Pressure) – hranice pro bezpečnostní systémy, která činí $1,38 \times \text{NWP}$ (tedy 96,6 MPa pro H70). Dosažení této hodnoty spouští bezpečnostní odstavení plnění.

Vedle absolutního tlaku pracuje protokol se stavem naplnění SOC (State of Charge), tedy poměrem aktuální hustoty vodíku v nádrži k hustotě při NWP a 15 °C, vyjádřeným v procentech. Z této definice plyne, že plnicí protokol necílí na pevnou hodnotu tlaku, ale na cílový SOC, typicky 95 až 100 %, který přepočítává podle předpokládané teploty plynu na konci plnění.

Např.: Hustota vodíku v nádrži třídy H35 při tlaku 35 MPa, teplotě 15 °C a 100 % SOC činí 24,0 g/l. Pro H70 je to 40,2 g/l.

3.2. Tvrdé hranice plnicího procesu

Z fyzikálních vlastností vodíku a konstrukce nádrže vyplývají čtyři hranice, které plnicí protokol musí za všech okolností respektovat:

- Teplota plynu v CHSS nesmí kdykoli během plnění překročit 85 °C.
- Tlak v CHSS nesmí kdykoli překročit hodnotu MAWP ($1,38 \times \text{NWP}$).
- Konečný SOC nesmí překročit 100 %.
- Hmotnostní průtok nesmí překročit limit stanovený kategorií protokolu.

Splnění těchto podmínek napříč celým rozsahem provozních stavů, tedy pro různé teploty okolí, různé počáteční tlaky v nádrži a různé objemy CHSS, je hlavním obsahem plnicích protokolů SAE. Bez řízeného algoritmu plnění by nebylo možné

rychlé plnění bezpečně provozovat u vozidel různých výrobců na stanicích různých provozovatelů.

4. Vodíková plnicí stanice a její bezpečnostní architektura

Vodíková plnicí stanice (anglicky Hydrogen Refueling Station, HRS) je infrastruktura, která dodává stlačený vodík do nádrže vozidla. Z pohledu uživatele se podobá běžné čerpací stanici, kdy řidič přijede, připojí spojku k hrdlu vozidla a po několika minutách odjíždí. Vnitřní složitost stanice a její bezpečnostní architektura jsou ale výrazně vyšší než u stanic kapalných paliv.

4.1. Hlavní komponenty stanice

Typická veřejná vodíková stanice na rychlé plnění se skládá z těchto hlavních funkčních bloků:

- Zdroj vodíku – vodík se na stanici dostává buď v kontejnerech (trailer s vysokotlakými lahvemi), pomocí potrubí z výroby, nebo se vyrábí přímo na místě elektrolýzou.
- Kompresor – stlačuje vodík ze vstupního tlaku na provozní tlak zásobníků stanice, který dosahuje až 90 MPa. Vstupní tlak se liší podle způsobu zásobování, u potrubního přívodu a elektrolýzéry jde typicky o 2 až 5 MPa (20 až 50 bar), u traileru s vysokotlakými lahvemi o podstatně vyšší hodnoty.
- Vysokotlaké zásobníky (banks) – sada tlakových lahví na stanici, obvykle rozdělená do několika tlakových úrovní. Plnění vozidla probíhá přepouštěním vodíku ze zásobníku s vyšším tlakem do nádrže s tlakem nižším. Kaskádové uspořádání zásobníků umožňuje efektivněji využít uložený vodík a snížit energii potřebnou na jeho stlačování.
- Předchlazovací jednotka (pre-cooler) – výměník tepla, který chladí vodík před výstupem ze stanice na nízkou teplotu. Standardní stanice pro 70 MPa chladí vodík na třídu T40 (–33 až –40 °C).
- Výdejní stojan (dispenser) – koncové zařízení, které se skládá z plnicí hadice, spojky (anglicky nozzle), průtokoměru, regulačního ventilu a uživatelského rozhraní. Stojan obsahuje řídicí elektroniku, která řídí plnění podle protokolu.
- Komunikační rozhraní – infračervený přijímač na spojce, který načítá data od vozidla podle normy SAE J2799 (viz kapitola 8).

4.2. Bezpečnostní prvky stanice

Vodík je hořlavý plyn s mimořádně širokým rozsahem výbušných koncentrací (4–75 obj. % ve vzduchu) a velmi nízkou energií iniciace zapálení. Stanice proto musí být vybavena řadou pasivních a aktivních bezpečnostních prvků [4]:

- Detektory úniku vodíku rozmístěné v rizikových místech (kompresor, zásobníky, stojan).
- Pojistné ventily (Pressure Relief Valves) na všech tlakových komponentech.
- Pojistné prvky na zásobnících stanice, které při překročení přípustného tlaku nebo teploty odvedou obsah bezpečným odvětráním do volného prostoru.
- Systém nouzového odpojení (Emergency Shutdown, ESD), který okamžitě odstaví stanici při detekci anomálie nebo manuálním stiskem tlačítka.
- Bezpečnostní vzdálenosti technologií plnicí stanice od veřejných prostor, budov a komunikací.

Detailní bezpečnostní požadavky na stanice řeší mezinárodní norma ISO 19880-1 [4], která navazuje na plnicí protokoly SAE a rozšiřuje je o požadavky na infrastrukturu jako celek. Samotné hardwarové prvky ale nestačí. Pro bezpečné rychlé plnění je nutná také řídicí logika, která rozhoduje o průběhu plnicího procesu s ohledem na tlakové a teplotní limity CHSS. Tuto řídicí logiku poskytují právě plnicí protokoly SAE, kterým se věnují následující kapitoly.

5. Soubor standardů SAE pro rychlé plnění vodíku

SAE International (původně Society of Automotive Engineers) je americká profesní organizace pro inženýry v dopravě. Její normy nemají formálně status mezinárodních norem, tuto úlohu plní normy ISO, ale v oblasti vodíkového plnění slouží jako referenční technický základ, na který se mezinárodní (ISO 19880-1, ISO 17268) i evropské (EN 17127) normy přímo odkazují.

Pro plnění vodíkových vozidel je v SAE k dispozici sedm hlavních norem (tab. 1). Liší se rozsahem, tedy typem vozidla, tlakovou třídou a maximálním průtokem, a vzájemně se doplňují. Část z nich pokrývá samotné plnicí protokoly, část navazující oblasti, jako je vozidlová strana nebo komunikace mezi vozidlem a stanicí. Normy se dále liší statusem, který určuje jejich váhu i budoucí vývoj. Standard je plnohodnotná norma, Information Report (v literatuře také TIR, Technical Information Report) je informativní dokument s nižší závazností, používaný pro technologie s omezenou validací, a stabilizovaná norma je sice platná, ale SAE ji dále nereviduje, typicky proto, že její funkci převzal dokument novější.

Tab. 1. Přehled norem SAE pro rychlé plnění vodíkem

Norma	Rozsah	Status
SAE J2579	palivový systém ve vozidle (CHSS)	Standard
SAE J2601	plnicí protokol pro osobní vozidla, ≤ 60 g/s	Standard
SAE J2601-2	protokol pro těžká vozidla, ≥ 10 kg vodíku	Stabilizovaná
SAE J2601-3	protokol pro průmyslové vozíky (H25/H35)	TIR
SAE J2601-4	protokol pro plnění bez předchlazení	TIR
SAE J2601-5	protokol pro rychlé plnění těžkých vozidel, 60–300 g/s	TIR
SAE J2799	komunikace mezi vozidlem a stanicí (IrDA)	Standard

Zdroj: vlastní zpracování autorů podle [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

Normy se dále liší způsobem, jakým proces plnění vymezují. Předepisující (prescriptive) protokol určuje stanici konkrétní postup, tedy rychlost nárůstu tlaku i cílový tlak, které stanice odečte z tabulek nebo vypočítá podle vzorce (SAE J2601, J2601-5). Výkonnostní (performance-based) protokol naopak stanoví pouze mantinely v podobě tlakových rozsahů, přípustných teplot a bezpečnostních tolerancí a ponechává na výrobci stanice, jakým algoritmem jich dosáhne (SAE J2601-2, J2601-3). Volnost výkonnostního přístupu vyhovuje tam, kde je okruh vozidel předem znám, ale znemožňuje zaručit, že libovolné vozidlo bude bezpečně a plně natankováno na libovolné stanici. Právě proto je pro veřejnou infrastrukturu nutný přístup předepisující.

V následujících kapitolách se zaměříme na tři normy, které tvoří jádro rychlého plnění vodíku: SAE J2601 jako základ pro osobní vozidla, SAE J2601-5 jako protokol pro rychlé plnění těžkých vozidel a SAE J2799 pro komunikaci mezi vozidlem a stanicí.

6. Bezpečnostní mechanismy SAE J2601

SAE J2601 [6] je základní normou SAE International pro plnění osobních vodíkových vozidel stlačeným vodíkem. Pokrývá vozidla s objemem nádrže od 49,7 litrů, v tlakových třídách H35 i H70, s maximálním hmotnostním průtokem 60 g/s. Cílem normy je naplnit vozidlo z typického počátečního stavu (tlak 10 MPa, okolní teplota 20 °C) na 95 až 100 % SOC do tří minut při dodržení všech tvrdých hranic uvedených v kapitole 3.

6.1. Klíčové pojmy protokolu

Plnicí protokol pracuje s několika provozními parametry, které stanice měří nebo přijímá od vozidla:

- T_{fuel} – teplota vodíku vystupujícího z plnicího stojanu po předchlazení. Klíčový parametr, na kterém závisí celá strategie plnění.
- T_{amb} – teplota okolního vzduchu. Stanice ji používá jako odhad počáteční teploty plynu v nádrži.
- P_0 – počáteční tlak v nádrži vozidla na začátku plnění.
- APRR (Average Pressure Ramp Rate) – průměrná rychlost nárůstu tlaku během plnění, vyjádřená v MPa/min.

6.2. Kategorie stanic a vozidel

Norma rozděluje plnicí stanice do tří teplotních kategorií podle teploty, na kterou jsou schopny předchladit vystupující vodík: T40 (–40 až –33 °C), T30 (–33 až –26 °C) a T20 (–26 až –17,5 °C). Čím nižší je teplota vystupujícího vodíku, tím rychleji a bezpečněji může vozidlo naplnit, protože do nádrže přichází chladnější plyn a celkový tepelný nárůst během plnění je menší.

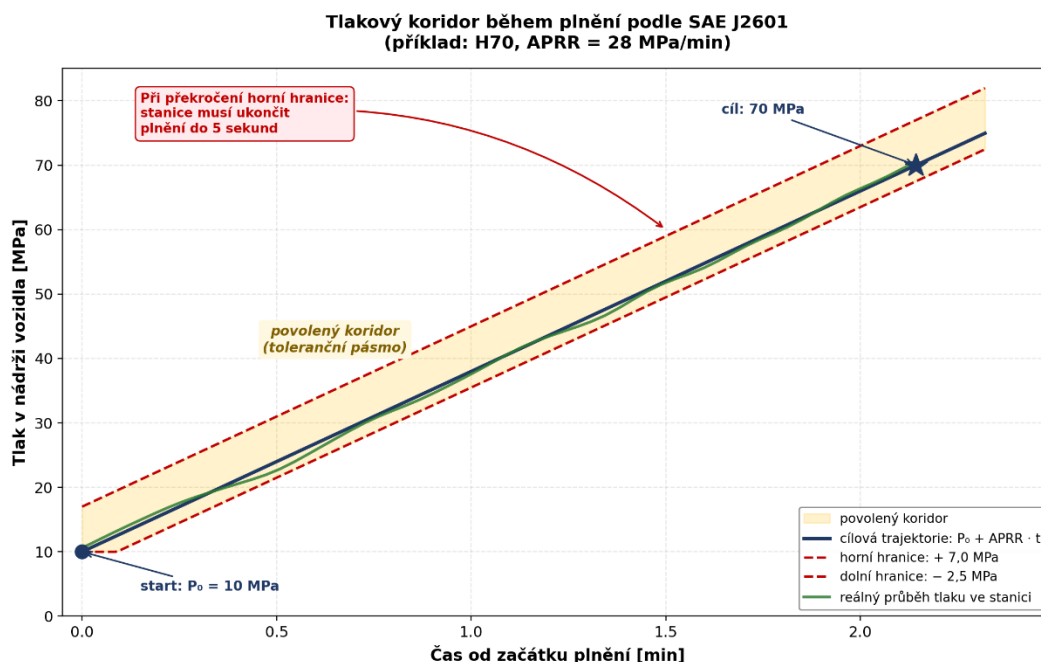
Vozidla se klasifikují podle objemu CHSS do kategorií A až D. Pro každou kombinaci kategorie stanice a kategorie vozidla poskytuje norma samostatnou tabulku parametrů plnění. Toto rozdělení zaručuje, že plnicí protokol je nastaven na míru dané kombinaci vozidla a stanice a nedochází k nebezpečnému překročení teplotních nebo tlakových limitů.

6.3. Dvě metody řízení a role tlakového koridoru

SAE J2601 zavádí dvě rovnocenné metody řízení plnění, které si výrobce stanice volí podle svých možností. Tabulková metoda (anglicky table-based) používá předem vypočtené tabulky s hodnotami APRR a pevným cílovým tlakem. Dynamická metoda (v normě označená jako MC Formula) průběžně počítá cílový tlak i aktuální rychlost nárůstu na základě termodynamického modelu nádrže. Obě metody lze provozovat jak s komunikací mezi vozidlem a stanicí podle SAE J2799, tak bez ní. Při plnění s komunikací stanice zpřesňuje výpočet o data přijatá od vozidla, tedy o naměřený tlak a teplotu v nádrži a její kapacitu.

Klíčovým bezpečnostním prvkem obou metod je tlakový koridor. Aby plnění zůstalo bezpečné a stanice neporušila parametry nádrže, musí udržet aktuální tlak v definovaném tolerančním pásmu kolem cílové trajektorie. Pro tabulkovou metodu platí horní hranice $P_0 + APRR \times t + 7,0 \text{ MPa}$ a dolní hranice $P_0 + \max(APRR \times t - 2,5 \text{ MPa}; 0)$. Toleranční pásmo (–2,5 / +7,0 MPa) kompenzuje krátkodobé výkyvy průtoku, například při přepínání mezi jednotlivými zásobníky stanice. Pokud stanice z koridoru vypadne, tedy pokud nedokáže udržet tlak v mezích, musí plnění ukončit do pěti sekund (obr. 1).

Obr. 1. Tlakový koridor během plnění vodíku podle SAE J2601



Zdroj: vlastní zpracování autorů podle [6]

7. Bezpečnostní mechanismy SAE J2601-5 pro rychlé plnění těžkých vozidel

SAE J2601-5 [7] v aktuální revizi z února 2025 řeší rychlé plnění těžkých vodíkových vozidel, tedy kamionů, autobusů a velkých užitkových vozidel. Pokrývá obě tlakové třídy, H35 i H70, a maximální hmotnostní průtok dosahuje 300 g/s. Rozsah objemů závisí na tlakové třídě: ve třídě H35 sahá od 248,6 do 7 500 litrů, což odpovídá 5,97 až 180 kg vodíku v CHSS, ve třídě H70 od 248,6 do 5 000 litrů, tedy 10 až 201 kg. Pro plnění těžkých vozidel byla dříve používána norma SAE J2601-2, kterou SAE v roce 2023 stabilizovala a která je podle vlastního zdůvodnění určena pouze pro neveřejné stanice se známým okruhem vozidel.

7.1. Vztah k SAE J2601

SAE J2601-5 vychází z principů zavedených v J2601 a rozšiřuje je pro vysoké průtoky a velké nádrže. Z J2601 přebírá princip dělení stanic do teplotních kategorií podle T_{fuel} , dělení vozidel podle kapacity CHSS, princip tolerančního koridoru tlaku (s upravenými hodnotami) a dvě filozofie řízení, tabulkovou a dynamickou (MC Formula). Co norma přidává navíc, je dáno tím, že u těžkých vozidel nestačí přímočaré rozšíření J2601. Při průtoku 300 g/s je třeba citlivěji řídit dynamiku plnění, velké nádrže mají jinou teplotní odezvu než menší a provozní scénáře těžké dopravy zahrnují situace, které J2601 neřeší.

7.2. Nové bezpečnostní mechanismy

SAE J2601-5 zavádí několik nových bezpečnostních mechanismů, které v J2601 nejsou:

- FTI (Fueling Time Indicator) – explicitní rozlišení mezi aktivním plněním a plánovanou pauzou plnění, například při přepínání zásobníků. Během

pauzy stanice zmrazí cílovou trajektorii tlaku, čímž brání tomu, aby přerušení bylo interpretováno jako vypnutí z koridoru.

- Minimální hmotnostní průtok – pokud průtok klesne pod tabulkovou hodnotu (od 1,25 g/s pro malé nádrže až do 10 g/s pro nádrže nad 2 000 L) na déle než 10 sekund, stanice musí plnění ukončit. Cílem je předejít situaci, kdy stanice uvízne na velmi nízkém průtoku kvůli poruše nebo nesouladu.
- Subsequent fueling countermeasure – bezpečnostní opatření pro vozidla s duálním plnicím systémem (dvě nezávislé nádrže s různými spojkami, například kombinace H35HF a H70). Pokud vozidlo právě naplnilo jednu nádrž s vysokým průtokem a hned poté začne plnit druhou nádrž, hrozí, že zbytkové teplo z první nádrže přehřeje plyn ve druhé. Stanice v takovém případě sníží cílový tlak druhé nádrže.

7.3. Šest teplotních kategorií a nové spojky

Zatímco SAE J2601 má tři teplotní kategorie stanic (T40, T30, T20), SAE J2601-5 zavádí šest kategorií. Tři nové kategorie (T10, T0, TA) reflektují potřebu plnit těžká vozidla i v podmínkách, kde stanice nemá kapacitu na hluboké předchlazení, typicky depa autobusů a kamionů, kde je investičně neúnosné stavět stanici s předchlazením na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vyšší hmotnostní průtoky vyžadují nové typy plnicích spojek. Stávající spojky H35 a H70 (podle normy ISO 17268 a SAE J2600) nejsou na průtoky 120 a 300 g/s navrženy. Nové spojky H35MF, H35HF a H70HF mají jinou geometrii, jiné mechanické těsnění a u některých i jinou geometrii pro infračervený přenos komunikace.

8. Role komunikace pro bezpečné plnění (SAE J2799)

SAE J2799 [8] specifikuje, jakým způsobem si vozidlo a stanice vyměňují informace během plnění. Komunikace není podmínkou funkčnosti protokolů, protože všechny lze provozovat i bez ní, ale podmínkou jejich plného výkonu, tedy nejkratší doby plnění a nejvyššího dosaženého SOC.

8.1. Co komunikace přináší dynamické metodě

Dynamická metoda MC Formula průběžně počítá cílový tlak a rychlost jeho nárůstu na základě termodynamického modelu nádrže. Model potřebuje znát počáteční tlak vodíku v nádrži, počáteční teplotu plynu, objem nádrže a tlakovou třídu. Z těchto veličin stanice žádnou přímo změřit nedokáže. Tlak na výstupu plnicího stojanu se od tlaku v nádrži liší o tlakovou ztrátu v hadici a spojce, teplotu plynu uvnitř nádrže nemůže stanice měřit vůbec.

Komunikace podle SAE J2799 dodá tyto veličiny přímo z vozidla. Model tak pracuje se skutečným stavem nádrže místo s odhadem, což umožňuje plnit blíže k teplotní hranici $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledkem je kratší doba plnění a vyšší dosažený SOC.

8.2. Infračervený přenos a chování při ztrátě komunikace

Komunikace probíhá pomocí infračerveného záření podle standardu IrDA (Infrared Data Association). Vysílač je umístěn na vozidle u plnicího hrdla, přijímače ve spojce stanice; přenos je jednosměrný, z vozidla na stanici. Vozidlo odesílá v intervalu 100 ms tlak a teplotu plynu v nádrži, objem CHSS, tlakovou třídu hrdla a plnicí povel.

Rámec, ve kterém stanice s těmito daty pracuje, vymezuje norma sama. Protokol IrDA nebyl v době vydání klasifikován podle žádné úrovně funkční bezpečnosti, ať už ASIL, nebo SIL, takže signály z vozidla nejsou zaručeně správné a odpovědnost za dodržení procesních limitů zůstává na stanici. Přenos je navíc náchylný k rušení okolním osvětlením. Stanice proto přijatá data průběžně kontroluje: pokud se povinná pole neaktualizují do 500 ms, považuje se komunikace za ztracenou a plnění pokračuje v nekomunikačním režimu podle pravidel plnicího protokolu.

Výjimkou je povel Abort. Na ten musí stanice reagovat i tehdy, když ostatní data v intervalu nedorazila, a plnění ukončit. Vozidlo tím nepřebírá řízení plnicího procesu, ale získává možnost jej kdykoli zastavit na základě informace o stavu nádrže, kterou stanice nemá.

9. Závěr

Rychlé plnění vodíku je jednou z klíčových technických podmínek pro nasazení vodíkové mobility jako součásti dekarbonizace dopravy. Jeho fyzikální náročnost, daná ohřevem plynu při stlačování v nádrži, vylučuje jednoduché přepuštění vodíku ze zásobníku do vozidla a vyžaduje řízený algoritmus plnění, který za všech provozních podmínek udrží proces v bezpečných mezích.

Odpovědí na tuto potřebu je soubor plnicích protokolů SAE International. Jádrem souboru jsou dvě normy. SAE J2601 pro osobní vozidla zavedla základní principy plnicího procesu, tedy teplotní kategorie stanic, kategorie CHSS, dvě metody řízení a tlakový koridor. Novější SAE J2601-5 tyto principy rozšiřuje pro rychlé plnění těžkých vozidel na průtoky do 300 g/s a přidává nové bezpečnostní mechanismy, mezi nimi FTI, minimální hmotnostní průtok a opatření pro vozidla s duálním plnicím systémem. Doplněuje je komunikační norma SAE J2799, která oběma metodám řízení umožňuje pracovat se skutečným stavem nádrže místo s konzervativním odhadem, a která dává vozidlu možnost plnění kdykoli zastavit.

Pro nasazení vodíkové nákladní dopravy a MHD v České republice i Evropské unii je porozumění této standardizaci podstatné, protože určuje, které stanice jsou kompatibilní, s kterými vozidly, jaké doby plnění lze očekávat a kde leží skutečné limity technického rozvoje. Jedním z výstupů projektu, v jehož rámci příspěvek vznikl, jsou také didaktické podklady pro úroveň středního školství, jejichž cílem je šířit znalost této technologie mezi budoucí odborníky.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl jako součást řešení projektu TN02000007 „Národní centrum vodíkové mobility“, financovaného Technologickou agenturou ČR v rámci Programu Národních center kompetence.

Literatura

- [1] CAPONI, R., FERRARIO, A. M., BOCCI, E., VALENTI, G. Hydrogen refueling process: Theory, modeling, and in-force applications. *Energies*, 2023, roč. 16, č. 6, s. 2890. ISSN 1996-1073.
- [2] MAUS, S., HAPKE, J., RANONG, C. N., WÜCHNER, E., FRIEDLMEIER, G., WENGER, D. Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, roč. 33, č. 17, s. 4612–4621. ISSN 0360-3199.
- [3] SAE International. SAE J2579: Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles. Warrendale (PA): SAE International, 2023.

- [4] ISO. ISO 19880-1: Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.
- [5] SAE International. SAE J2601-2: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles. Warrendale (PA): SAE International, 2023.
- [6] SAE International. SAE J2601: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. Warrendale (PA): SAE International, 2020.
- [7] SAE International. SAE J2601-5: High Flow Hydrogen Fueling Protocol for Medium and Heavy Duty Vehicles. Warrendale (PA): SAE International, 2025.
- [8] SAE International. SAE J2799: Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software. Warrendale (PA): SAE International, 2024.
- [9] SAE International. SAE J2601-3: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks. Warrendale (PA): SAE International, 2022.
- [10] SAE International. SAE J2601-4: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Light Duty Vehicles without Precooling. Warrendale (PA): SAE International, 2024.
- [11] ISO. ISO 17268: Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

Hydrogen Refuelling Station Filling Standards from a Safety Perspective

Roman Smutný, Bronislav Vahalík, Vojtěch Přikryl

Transport Research Centre

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: roman.smutny@cdv.gov.cz

Abstract

Hydrogen is frequently mentioned in connection with the decarbonization of energy and transport. One of its emphasized advantages is the speed of refuelling a vehicle tank, which is expected to be comparable to filling with liquid fuels, unlike battery charging. Fast hydrogen refuelling is, however, not technically straightforward. It faces a physical obstacle in that hydrogen heats up both as it is compressed in the tank and as it is throttled, while the gas temperature must not exceed the design limit of the pressure vessel. The response to this problem is the set of SAE International fuelling protocols, which define binding controlled-filling algorithms so that the process remains within safe limits under all operating conditions. This paper provides an overview of the current state of standardization, focusing on SAE J2601 (light-duty vehicles), SAE J2601-5 (fast refuelling of heavy-duty vehicles, February 2025 revision) and SAE J2799 (vehicle-to-station communication). Emphasis is placed on the safety mechanisms contained in the individual protocols, such as the pressure corridor, temperature limits, dynamic response control, behaviour in the event of communication loss, and the new mechanisms introduced in the J2601-5 revision for heavy-duty vehicles.

Keywords: hydrogen mobility, fuelling protocols, SAE J2601, SAE J2601-5, refuelling safety, low-emission transport

Využití obnovitelných zdrojů energie v dopravě v Česku

Mgr. Jan Mertl

Ministerstvo životního prostředí, Odbor strategií a finančních nástrojů

Vršovická 1442/65, 100 10 Praha 10

e-mail: jan.mertl@mzp.gov.cz

Abstrakt

Obnovitelné zdroje energie v dopravě přispívají k energetické bezpečnosti a ke zmírňování změny klimatu. Doprava je v Česku energeticky náročným sektorem, který je nadále závislý na spalování fosilních paliv, využití OZE v dopravě patří mezi nejnižší v EU27. Plnění cílů pro OZE v dopravě k roku 2030, které jsou stanoveny legislativou EU, je zatím vzdálené a nejisté. Podíl OZE v dopravě v Česku se v současnosti pohybuje okolo 6 %, většina této energie je získávána spalováním biopaliv, z převážné části kapalných biopaliv 1. generace vyrobených z potravinářských a krmných plodin. Na růst využití OZE v dopravě jsou zaměřeny národní strategie, jako je Národní akční plán čisté mobility nebo Akční plán podpory rozvoje využívání biometanu. Oblast obnovitelných zdrojů energie v dopravě má v Česku významný růstový potenciál, který však bude využitelný jen v případě rozsáhlých výdajů do technologií, výzkumu, infrastruktury a do finanční podpory obměny vozového parku.

1. Úvod

Využívání obnovitelných zdrojů energie (OZE) v dopravě omezuje dovozní energetickou závislost a přispívá k ochraně životního prostředí a klimatu. Spotřeba energie v dopravě v Česku v souvislosti s růstem přepravních výkonů osobní i nákladní dopravy roste a většina energie spotřebované v dopravě nadále pochází ze spalování fosilních paliv. Dovozní závislost Česka se u ropy pohybuje okolo 100 % a tato surovina je navíc dovážena ze zemí, které jsou geopoliticky nestabilní, což vede k značné volatilitě cen ropy a ropných produktů s dopady na celou ekonomiku.

I když celkové emise skleníkových plynů v Česku v důsledku odklonu od fosilních paliv v energetickém mixu a poklesu energetické a materiálové náročnosti ekonomiky klesají, emise v dopravě nadále rostou a aktuálně se podílejí téměř čtvrtinou na celkových emisích Česka. Vyšší využití OZE v dopravě je proto významné i z pohledu zmírňování změny klimatu a plnění cílů vyplývajících z energeticko-klimatické politiky EU a navazující evropské legislativy.

Mezi zdroje obnovitelné energie, které jsou využitelné v dopravě, patří kapalná a plynná biopaliva, elektřina z OZE a obnovitelná paliva nebiologického původu (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO). Předkládaný příspěvek se věnuje využití jednotlivých druhů OZE v dopravě v Česku v kontextu plnění cílů vyplývajících z legislativy EU a národních strategických dokumentů.

2. Cíle a závazky v oblasti využití OZE v dopravě

Rámec klimaticko-energetických cílů včetně „zelené transformace“, ochrany biodiverzity a udržitelného nakládání s půdou představuje Zelená dohoda pro Evropu (European Green Deal, EGD). Hlavním cílem EGD je, aby se Evropa stala do roku 2050 klimaticky neutrálním kontinentem, čehož má EU dosahovat postupně a do roku

2030 omezit emise skleníkových plynů o 55 % ve srovnání s referenční úrovní emisí v roce 1990. Cíle EGD se staly právně závaznými přijetím Evropského právního rámce pro klima (nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2021/1119), přijatého v roce 2021. Naplnění emisního cíle EU do roku 2030 podporuje balíček revidovaných i nových legislativních předpisů EU „Fit for 55“.

Součástí tohoto balíčku je i legislativa upravující využívání obnovitelných zdrojů energie a stanovující evropské i národní cíle pro OZE. Konkrétně se jedná o Směrnici Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/2413 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů z roku 2023 (tzv. RED III, Renewable Energy Directive), jejíž přijetím byly novelizovány některé části (zejména byla zvýšena ambicióznost cílů) nadále platné Směrnice Evropského Parlamentu a Rady (EU) 2018/2001, tzv. RED II. První generace legislativy EU pro OZE z roku 2009 (Směrnice 2009/28/ES, tzv. RED I), která byla samostatným legislativním předpisem, obsahovala cíle do roku 2020 a její platnost skončila přijetím směrnice RED II na konci roku 2018.

Z Tab. 1 je zřejmý růst nastavení cílů k roku 2030 v jednotlivých generacích evropské legislativy k OZE. Hlavní cíl je vždy stanoven na úrovni celé EU (podíl OZE na hrubé konečné spotřebě energie). Dílčí cíle, mj. za oblast dopravy, jsou přímo aplikovatelné na úroveň členských zemí.

Tab. 1. Vývoj cílů v oblasti využití OZE dle legislativy EU

Indikátor	RED I (2009)	RED II (2018)		RED III (2023)	
	2020	2025	2030	2025	2030
Podíl OZE na hrubé konečné spotřebě energie v EU	20 %		32 %		42,5 %
Podíl OZE na konečné spotřebě energie v dopravě		-	14 %	-	29 %
NEBO Emisní intenzita paliv		-	-	-	-14,5 %
Podíl pokročilých biopaliv ze surovin dle Přílohy IX a RFNBO na konečné spotřebě energie v dopravě		1 %	3,5 %	1 %	5,5 %
Z toho podíl samotných RFNBO na konečné spotřebě energie v dopravě		-	-	-	1 %

Zdroj: MPO, MŽP[2,3]

Příspěvky členských zemí k plnění unijních cílů v oblasti emisí skleníkových plynů, energetické účinnosti a OZE včetně návrhu opatření k jejich dosažení a projekcí budoucího vývoje, jsou součástí Vnitrostátních plánů v oblasti energetiky a klimatu, které jsou reportovány do Evropské komise. Přípravu těchto plánů v desetileté periodě (a bilančních hodnotících zpráv ve dvouleté periodě) upravuje Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1999 o správě energetické unie a opatření v oblasti klimatu.

Aktuálně platný Vnitrostátní plán Česka v oblasti energetiky a klimatu byl vládou schválen na konci roku 2024. V oblasti OZE Vnitrostátní plán stanoví 30% cíl podílu OZE na konečné spotřebě energie do roku 2030 (cíle EU je 42,5 %). Cíle Směrnice RED III pro OZE v dopravě mají být dle Vnitrostátního plánu plněny emisní cestou, plán dále uvádí návrh opatření pro plnění cílů v oblasti používání pokročilých biopaliv a biometanu (vč. bioCNG a bioLNG).

Nástrojem pro harmonizovaný reporting a monitoring plnění cílů je SHARES¹ (Short Assessment of Renewable Energy Sources), vyvinutý Eurostatem. Nástroj SHARES integruje požadavky Směrnic RED II a RED III pro metodiku výpočtu indikátorů OZE. Konkrétně je dle aktuálně účinné legislativní úpravy elektřina z OZE

¹ Viz <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>

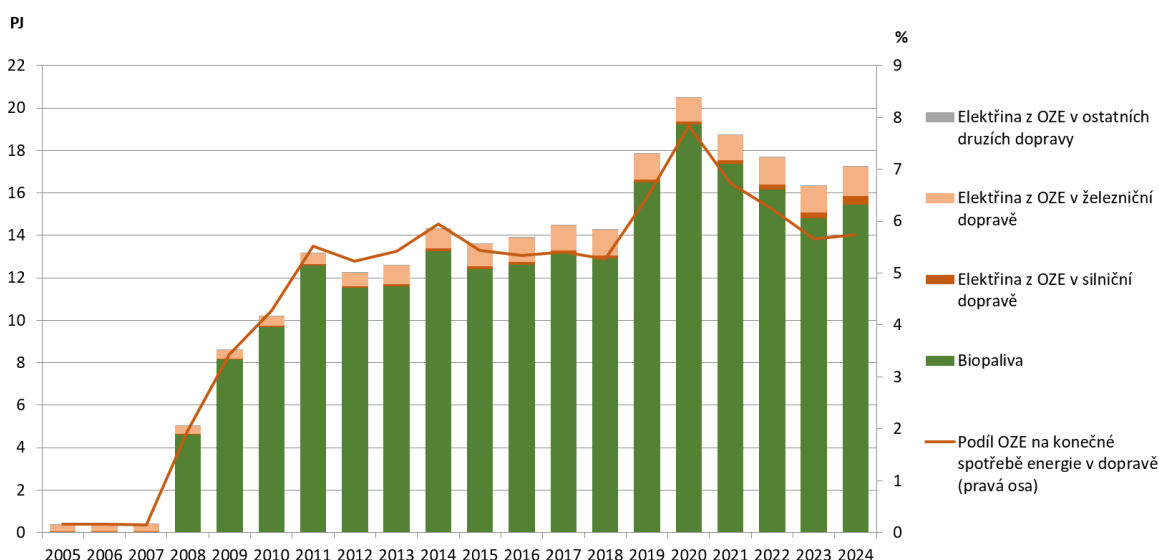
spotřebovaná v silniční dopravě počítána jako čtyřnásobek energetické hodnoty, elektřina z OZE v železniční dopravě jako 1,5násobek a pokročilá biopaliva a bioplyn dle přílohy IX Směrnice včetně RFNBO jako dvojnásobek jejich vykázané energetické hodnoty. Energetický mix pro elektřinu se nově uvažuje národní, a to průměr dva roky zpětně. Metodika též omezuje též započtení biopaliv 1. generace na 7 % spotřeby energie v dopravě.

3. Vývoj využití OZE v dopravě v ČR

Spotřeba energie z OZE v dopravě v Česku v roce 2024² meziročně vzrostla o 5,6 % na 17,3 PJ, což představovalo 5,74 % konečné spotřeby energie v dopravě (Obr. 1). Na spotřebě energie z OZE v dopravě měla v roce 2024 nejvyšší podíl biopaliva (89,5 %), spotřeba elektřiny v železniční dopravě se podílela 8,0 %, v silniční dopravě pak 2,3 %. V kontextu ostatních zemí EU27 byl v roce 2024 podíl OZE v dopravě v Česku zhruba na polovině průměru všech zemí EU27 (11,2 %) a třetí nejnižší po Chorvatsku a Řecku.

V období 2021–2024 spotřeba energie z OZE v dopravě poklesla o 7,9 % a podíl OZE se snížil, i následkem růstu celkové spotřeby energie v dopravě, o 1 p. b. Hodnocení dlouhodobějších trendů spotřeby OZE v dopravě neumožňují změny v legislativě EU, které se promítají do metodických změn ve výpočtu indikátorů. V grafech v tomto příspěvku jsou kvůli metodické homogenizaci data v celé časové řadě vypočtena dle aktuálně účinné legislativy (konkrétně Směrnice RED II a RED III), pro období před rokem 2021 jsou však hodnoty pouze orientační, neboť neodpovídají v té době platné legislativě.

Obr. 1. Spotřeba OZE v dopravě v ČR a podíl OZE na konečné spotřebě energie v dopravě [TJ, %], 2005–2024



Zdroj: Eurostat [6]

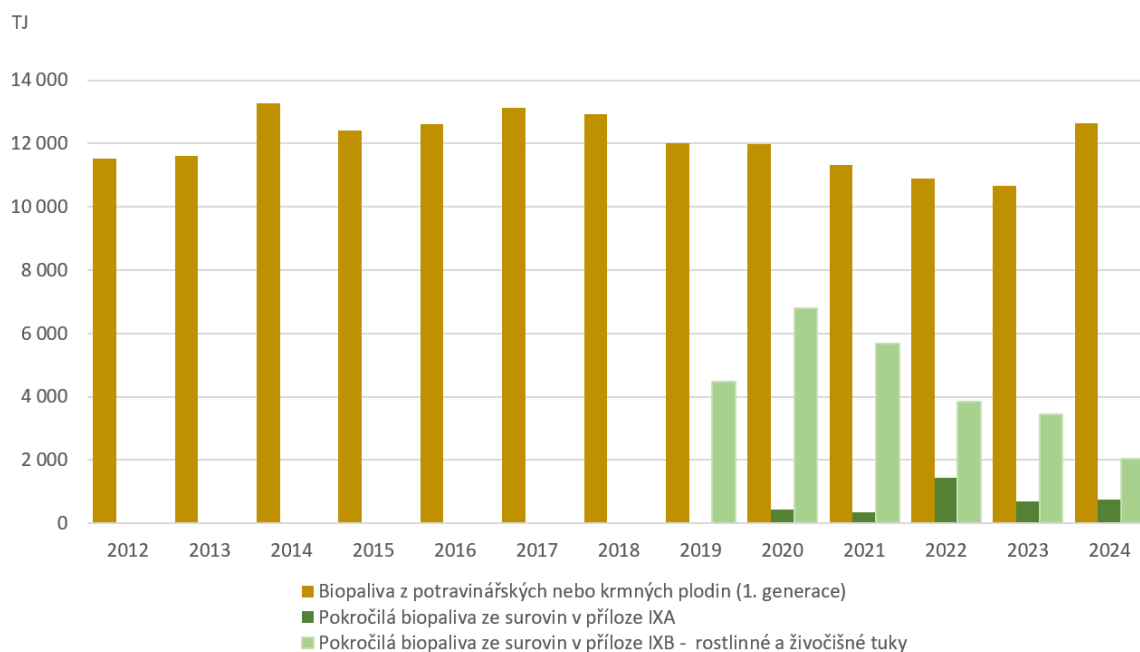
Spotřeba biopaliv v dopravě poklesla v období 2021–2024 o 10,9 %, pro jednotlivé kategorie biopaliv byl vývoj odlišný (Obr. 2). Biopaliva 1. generace, získávaná z potravinářských a krmných plodin, se dlouhodobě nejvíce podílejí na spotřebě OZE v dopravě v Česku (73,2 % v roce 2024). Využívanými produkty v této kategorii

² Data za rok 2025 nejsou v době přípravy sborníku k dispozici.

biopaliv jsou zejména metylestery nenasycených mastných kyselin (FAME), přimíchávané do nafty, a bioetanol, biosložka benzinu případně i samostatné palivo. Spotřeba biopaliv 1. generace po roce 2021 kolísala dle obsahu biosložky v benzinu a naftě (povinný pevný podíl byl zrušen 1. 7. 2022), v roce 2024 byla o 11,6 % vyšší (1,3 PJ) než v roce 2021. I po roce 2022 jsou biosložky do fosilních paliv přimíchávány, a to kvůli plnění emisních cílů pro paliva. Maximální aktuální obsah biosložky je 10 % u benzinu (E10) a 7 % u nafty (B7).

Spotřeba pokročilých biopaliv, vyrobených ze surovin uvedených v příloze IX Směrnice RED II, však v tomto období poklesla o 53,4 % (3,2 PJ). Na tomto poklesu se rozhodujícím způsobem podílel pokles spotřeby biopaliv vyrobených z použitého kuchyňského oleje na méně než třetinu v období 2021–2024). U biopaliv vyrobených z ostatních surovin pro pokročilá biopaliva (např. biosložka v komunálním odpadu) docházelo k stagnaci případně kolísání spotřeby. Ze surovin pro pokročilá biopaliva (rostlinné i živočišné oleje) se hydrogenací vyrábí kapalné palivo HVO (Hydrogenated Vegetable Oil), což je kvalitní bionafta. Z některých surovin lze vyrábět i bioetanol, případně biometan.

Obr. 2. Spotřeba biopaliv dle jednotlivých kategorií původu v dopravě v ČR [TJ], 2012–2024



Zdroj: Eurostat [6]

Spotřeba biometanu, plynného biopaliva, který je obnovitelnou alternativou k CNG, je zatím v Česku zanedbatelná (0,2 % celkové spotřeby OZE v dopravě v roce 2024).

Spotřeba elektřiny z OZE má v Česku rostoucí trend, v období 2021–2024 se zvýšila o 29,7 % (0,4 PJ). Nejvíce stoupla, vzhledem k rozvoji elektromobility, spotřeba elektřiny z OZE v silniční dopravě, a to na více než dvojnásobek během sledovaných 4 let (o 130,5 %), spotřeba elektřiny z OZE v železniční dopravě stoupla o 16,5 %.

Dle aktuálního stavu a dosavadního vývoje využití OZE lze konstatovat, že cíle pro OZE v dopravě vyplývající z legislativy EU jsou momentálně neplněny a vývoj zatím nenaznačuje splnění cílů k roku 2030. Cíl pro pokročilá biopaliva k roku 2025 je na hranici splnění (požadovaný podíl je 1 % na konečné spotřebě, v roce 2024 se jednalo o 0,9 %). Dosažení podílu pokročilých biopaliv 5,5 % do roku 2030 je však kvůli

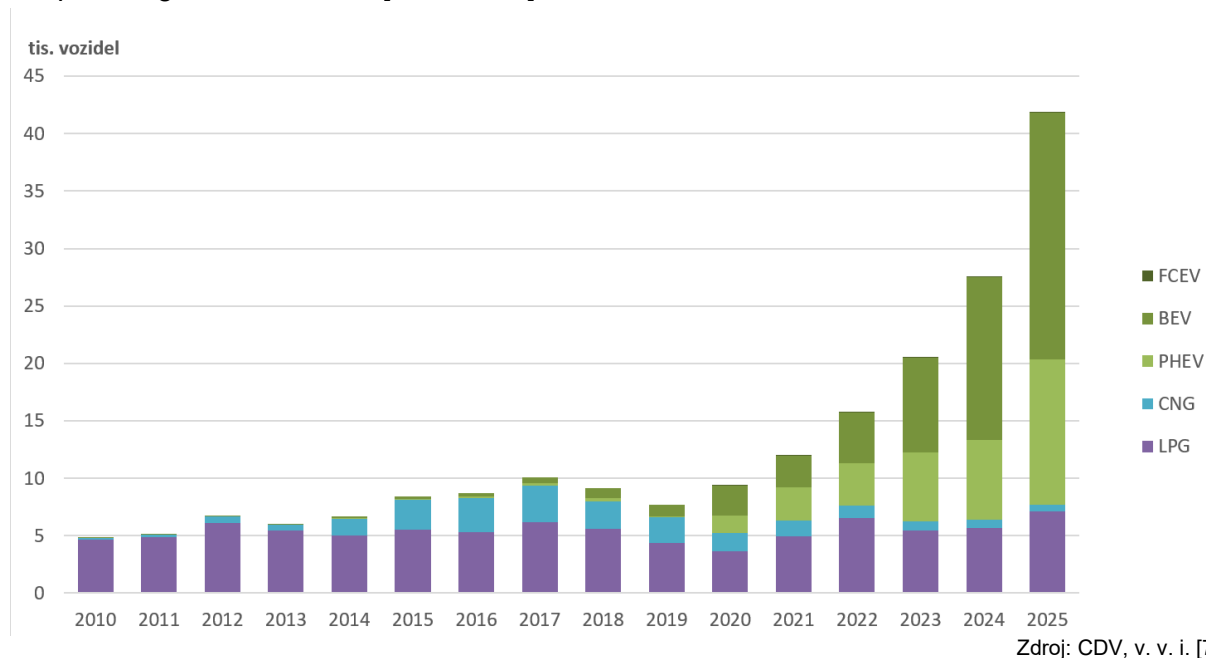
klesajícímu trendu spotřeby momentálně nepravděpodobné. Ještě horší je situace u vodíku a syntetických paliv (RFNBO) kde je spotřeba aktuálně téměř nulová a do roku 2030 má vzrůst na 1 % konečné spotřeby energie v dopravě.

4. Strategie a opatření k podpoře využití OZE v dopravě

Využití OZE v dopravě ovlivňuje stav vozového parku silničních vozidel a celkový rozvoj čisté mobility. Strategickým dokumentem zaměřeným na čistou mobilitu a její infrastrukturu je Národní akční plán čisté mobility (NAP ČM) aktualizovaný v roce 2024, který vzniká ve společné gesci MPO, MD a MŽP dle požadavků Nařízení AFIR³. Akční plán stanovuje cíle pro počty jednotlivých kategorií nízkoemisních a bezemisních vozidel k rokům 2025 a 2030 a pro infrastrukturu těchto pohonů.

Registrace nových i ojetých bateriových elektrických (BEV) a plug-in hybridních (PHEV) vozidel kategorie M1 (osobní automobily) v Česku dynamicky roste, v posledních několika letech má vývoj charakter exponenciálního růstu (Obr. 3). Vzhledem k tomu, že tento růst započal ve srovnání s EU27 zhruba se čtyřletým zpožděním, se však Česko s podílem BEV na celkové velikosti vozového parku vozidel kategorie M1 (osobní automobily) 0,8 % v roce 2025 zařazuje na spodní místa žebříčku zemí EU27, průměr v EU 27 je cca 3 %.

Obr. 3. Registrace nízkoemisních a bezemisních vozidel kategorie M1 (osobní automobily) dle první registrace v Česku [tis. vozidel], 2010–2025



Cíle NAP ČM k roku 2025 (Tab. 2) pro bateriová elektrická vozidla (BEV) byly splněny v případě osobních vozidel, lehkých užitkových vozidel (N1) i těžkých nákladních vozidel; cíl však zatím není splněn pro počty elektrických autobusů. Rozvoj dobíjecí infrastruktury poněkud předbíhá růst počtu elektrických vozidel, na konci Q1 2026 byl poměr 1 veřejný nabíjecí bod na 9 BEV kategorie M1 a N1, což je evropský nadprůměr. Cíle NAP ČM k roku 2025 pro dobíjecí infrastrukturu v jednotlivých kategoriích výkonu byly s výjimkou středně rychlých nabíječek DC 50–149 kW s rezervou splněny.

³ Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1804 ze dne 13. září 2023 o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva a o zrušení směrnice 2014/94/EU.

Tab. 2. Počty elektrických vozidel, počty dobíjecích bodů dle dobíjecího výkonu a cíle NAP ČM [počet], 2026

Vozidla	Minimální cíle NAP ČM			Realita	
	2025	2030	2035	4/2026	vs. 2030
BEV osobní (M1)	50 000	250 000	1 000 000	68 983	28 %
BEV lehká užitková (N1)	4 000	20 000	60 000	4 205	21 %
BEV těžká nákladní (N2, N3)	150	6 000	25 000	247	4 %
Autobusy (M2, M3)	400	1 200	4 200	267	22 %

Počet dobíjecích bodů s dobíjecím výkonem	Minimální cíle NAP ČM			Realita	
	2025	2030	2035	4/2026	vs. 2030
Do 22 kW AC	4 400	16 500	57 500	4 931	30 %
Do 50 kW DC	70	100	110	259	259 %
50-149 kW DC	2000	3 000	4 000	1 441	48 %
150–349 kW DC	400	900	1 400	879	98 %
Nad 350 kW DC	40	300	800	170	57 %
Celkem	6910	20 800	63 810	7 680	37 %

Zdroj: CDV, v.v.i. [7]

Kromě rozvoje elektromobility v individuální i veřejné dopravě lze další růst využití OZE v dopravě dosáhnout rozvojem *výroby a využití biometanu*, který je alternativou k zemnímu plynu (CNG) a je považován za klíčový pro dekarbonizaci těžké nákladní dopravy a městské hromadné dopravy. Strategickým dokumentem v této oblasti, zaměřeným nejen na dopravu, ale i energetiku a teplárenství, je *Akční plán podpory rozvoje využívání biometanu z července 2025*.

Akční plán předpokládá transformaci části bioplynových stanic na biometanové stanice a napojení biometanových stanic na plynárenskou síť. Na biometanové stanice se budou konvertovat zejména ty bioplynové stanice, které mají neefektivní využití v teplárenství a které mají dobrý přístup k plynárenské síti. Celkově to odpovídá 50–60 % z celkového aktuálního počtu 574 bioplynových stanic. Celková kapacita výroby biometanu má tak vzrůst ze 17,7 mil. m³ v roce 2024 (10 biometanových stanic) až na 500 mil. m³ v roce 2030.

Jako formu obnovitelné energie lze v budoucnosti využít i tzv. zelený vodík a syntetická paliva vyrobená ze zeleného vodíku (syntetický e-benzin, e-kerosin, e-metanol a další). Rozvoj výroby a využití vodíku jako komponenty dekarbonizace ekonomiky řeší *Národní vodíková strategie* z roku 2021, kterou připravilo Ministerstvo průmyslu a obchodu. Strategie zahrnuje období do roku 2050 a stojí na čtyřech pilířích: 1/ výroba nízkouhlíkového (zeleného) vodíku, 2/ Využití nízkouhlíkového vodíku. 3/ skladování a doprava vodíku, 4/ rozvoj technologií pro výrobu a využití vodíku.

Syntetická paliva vyrobená ze zeleného vodíku, která splňují požadavky na uhlíkovou neutralitu, jsou využitelná nejen v letecké a námořní dopravě, ale i v dopravě silniční, neboť je mohou spalovat standardní spalovací motory. Jejich limitací je ale obrovská energetická náročnost jejich výroby, odhadovaná na 25-30 kWh elektřiny na litr vyrobeného paliva. Jedná se o elektřinu spotřebovanou na výrobu vodíku elektrolýzou vody, dále na získávání oxidu uhličitého ze vzduchu (tzv. DAC, Direct Air Capture) a na vlastní průmyslovou syntézu obnovitelných uhlovodíkových paliv.

5. Závěr

Aktuální využití OZE v dopravě v Česku je zatím nedostatečné pro splnění ambiciózních cílů k roku 2030, stanovených legislativou EU a národními strategickými dokumenty. Malé využití OZE v dopravě ovlivňuje stav vozového parku v silniční dopravě, kde stále výrazně převažují vozidla na benzin a na naftu. Rozvoj čisté mobility, zejména elektromobility, je však v posledních letech dynamický, u bateriových elektrických vozidel až exponenciální.

Rozvoj využívání OZE nebude možné realizovat jen přes elektřinu. Další potenciál pro OZE v dopravě představují pokročilá kapalná biopaliva vyrobená z nepotravinářských surovin, a biometan, včetně bioLNG. Rostoucí dostupnost těchto paliv, jejich větší ekonomickou konkurenceschopnost a tím i rostoucí využití, zejména ve veřejné osobní a nákladní dopravě, by měla zajistit implementace aktuálně platných národních strategií včetně využití aktuálních i plánovaných dotačních titulů.

Za zajímavou, perspektivní, ovšem energeticky i technologicky náročnou alternativu pro růst využití OZE v dopravě lze považovat využití zeleného vodíku a syntetických paliv (RFNBO) vyrobených z vodíku.

Literatura

- [1] Ministerstvo životního prostředí. *Zpráva o životním prostředí České republiky 2024*. Praha, 2025. ISBN 978-80-7212-678-1.
- [2] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu*. Praha, prosinec 2024.
- [3] MPO, MŽP, MD. *2. aktualizace národního akčního plánu čistá mobilita*. Praha, 2024.
- [4] MŽP ve spolupráci s MPO a MD. *Akční plán rozvoje využívání biometanu*. Praha, 2024
- [5] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Vodíková strategie České republiky*. Praha, 2021.
- [6] Eurostat. *Short Assessment of Renewable Energy Sources (SHARES)*, [online], dostupné z <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data>
- [7] Centrum dopravního výzkumu, v.v.i. *Čistá doprava* [online], dostupné z <https://www.cistadoprava.cz/>

The Use of Renewable Energy Sources in Transport in the Czech Republic

Jan Mertl

Ministry of Environment of the Czech Republic, Department of Strategies and Financial Instruments

Vršovická 1442/65, 100 10 Praha 10

e-mail: jan.mertl@mzp.gov.cz

Abstract

The deployment of renewable energy sources (RES) in transport contributes to both energy security and climate change mitigation. In the Czech Republic, however, transport remains highly dependent on fossil fuels and exhibits one of the lowest shares of renewable energy consumption in transport among EU Member States. Achieving the 2030 renewable energy targets for transport established under EU legislation remains a significant challenge and is currently characterized by considerable uncertainty.

Currently, the share of renewable energy in transport in the Czech Republic is approximately 6%, with the majority being provided by biofuels, particularly first-generation liquid biofuels produced from food and feed crops. To accelerate the transition towards higher use of RES, several national policy frameworks have been adopted, including the National Action Plan for Clean Mobility and the Action Plan for the Development of Biomethane Utilisation.

The Czech transport sector offers considerable potential for increasing the use of renewable energy through the wider deployment of advanced biofuels, biomethane, renewable electricity, and other alternative energy carriers, including hydrogen and synthetic fuels. Realising this potential will require substantial investments in technological innovation, research and development, infrastructure expansion, and support mechanisms facilitating the modernisation of the vehicle fleet.

Aktuální témata z pohledu životního prostředí řešená na ŘSD

Radek Kropelnický a kolektiv

Ředitelství silnic a dálnic s. p.

Čerčanská 2023/12, Krč, 140 00 Praha 4

e-mail: `radek.kropelnicky@rsd.cz`

Abstrakt

Životní prostředí se rok od roku stává atraktivnějším tématem, a to jak u veřejnosti, tak i v rámci vizí budoucího provozování dálniční a silniční sítě. Ředitelství silnic a dálnic s. p. (ŘSD) se průběžně a soustavně ochranou přírody a zdraví zabývá během přípravy nových staveb, ale snaží se orientovat i na ty již provozované. Příspěvek shrnuje i aktuální témata, kterým se podnik poslední dva roky věnuje, jako například využívání obnovitelných zdrojů energie nebo možné nové přístupy v rámci projektové přípravy.

Current environmental topics addressed by the Road and Motorway Directorate

Radek Kropelnický and collective

Road and Motorway Directorate SOE

Čerčanská 2023/12, Krč, 140 00 Praha 4, Czech Republic

e-mail: radek.kropelnicky@rsd.cz

Abstract

The environment is becoming an increasingly important topic year by year, both for the general public and in visions for the future operation of the highway and road network. The Road and Motorway Directorate (ŘSD) consistently addresses nature and health protection during the preparation of new construction projects, while also focusing on existing infrastructure. This article summarizes current topics that have gained focus within the organization over the past two years, such as the use of renewable energy sources and potential new approaches to project planning.

Funkční a pestrá krajina: jiný pohled na stromy

Jiří Jedlička, Miloslav Kaláb, Lenka Foltýnová, Martin Vokřál

ASITIS s.r.o.

Vážného 10, 621 00, Brno

e-mail: jedlicka@asitis.cz

Abstrakt

Stromy jsou jedním z nejdůležitějších prvků městské i volné krajiny. Při plánování adaptačních opatření však nestačí vědět, kolik stromů na území máme. Důležité je také to, kde rostou, zda jsou dostupné obyvatelům, jaké množství stínu a dalších ekosystémových funkcí poskytují a v jakém jsou zdravotním stavu. Článek představuje způsob, jak pomocí prostorových a satelitních dat hodnotit zeleň komplexněji. Využívá princip 3-30-300, který sleduje dostupnost vzrostlých stromů, pokryv korun a dostupnost kvalitní veřejné zeleně, a doplňuje jej o hodnocení stromů v extravilánu. Součástí přístupu je také analýza produktivity, stresu a kapacity přežití stromů. Výsledkem není pouze mapa zeleně, ale podklad pro rozhodování o tom, kde má smysl chránit stávající stromy, kde prioritně pečovat o jejich zdravotní stav a kde zeleň doplnit.

1. Stromy jako součást klimaticky odolné krajiny

Při hodnocení zeleně se často pracuje především s její rozlohou nebo počtem stromů. Takový pohled ale může být mnohdy zavádějící. Dvě části města mohou mít podobnou výměru zeleně, přesto může být jejich přínos pro obyvatele zásadně odlišný. Pro komplexní hodnocení přínosů zeleně je nutné vzít v úvahu například velikost a zdravotní stav stromů, jejich rozmístění, návaznost na obytné území nebo docházkovou vzdálenost. Právě proto je při posuzování klimatické odolnosti vhodné vnímat stromy nejen jako prvek krajinné struktury, ale také jako infrastrukturu, která poskytuje konkrétní ekosystémové služby.

Vzrostlé stromy jsou z pohledu ekosystémových služeb nejen v městském prostředí mimořádně cenné. Poskytují stín, přispívají k ochlazování prostředí, zachytávají část znečišťujících látek, zvyšují estetickou hodnotu prostoru a vytvářejí podmínky pro odpočinek a rekreaci. Jejich význam proto není dán pouze samotnou přítomností stromu, ale také jeho velikostí, vitalitou a umístěním. Prezentovaný přístup k hodnocení stromů společnost ASITIS spoluvytvořila v rámci mezinárodního výzkumného a inovačního projektu VALORADA, zaměřeného na využití dat pro zvyšování klimatické odolnosti měst a regionů. Cílem analýzy je získat co nejúplnější obraz o tom, kde stromy skutečně plní své funkce a kde je jejich přínos omezený nebo ohrožený.

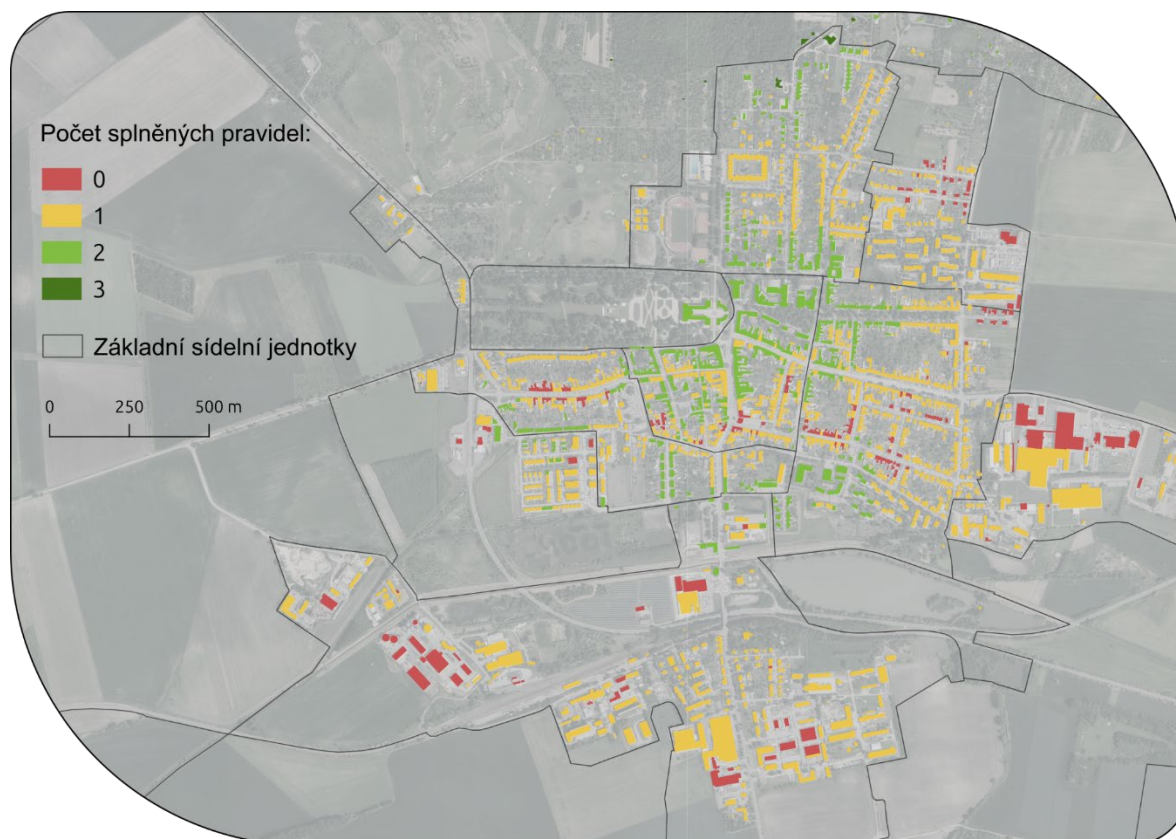
2. Pravidlo 3-30-300 – od počtu stromů k dostupnosti zeleně

Jedním z praktických rámců pro hodnocení zeleně je pravidlo 3-30-300. Jeho podstatou je sledovat zeleň z pohledu člověka, který v daném místě žije. Nejde tedy pouze o celkové množství zeleně v obci, ale o její dostupnost a rovnoměrnost rozložení. To je důležité i z hlediska spravedlivého přístupu k zeleni: kvalitní zeleň by neměla být soustředěna pouze v několika částech města, ale měla by být dostupná obyvatelům bez ohledu na to, kde bydlí.

Pravidlo 3 znamená, že z každé budovy, respektive z oken, by měly být vidět alespoň tři velké stromy. Pravidlo 30 stanovuje požadavek, aby pokrytí korunami stromů v okolí každé budovy dosahovalo přibližně 30 %. Pravidlo 300 pak pracuje s dostupností kvalitní veřejné zeleně: do 300 metrů od domu by měla být pěší chůzí dostupná kvalitní veřejná zeleň, například park.

Výhodou tohoto přístupu je možnost vyhodnotit pravidla pro jednotlivé budovy a následně výsledky zobrazit v mapě. Místo obecného tvrzení, že město má málo nebo hodně zeleně, tak vzniká detailní informace o tom, kde jsou podmínky vyhovující a kde naopak chybí jeden nebo více prvků potřebných pro kvalitní prostředí.

Obr. 1. Počet splněných pravidel 3-30-300 u jednotlivých budov.

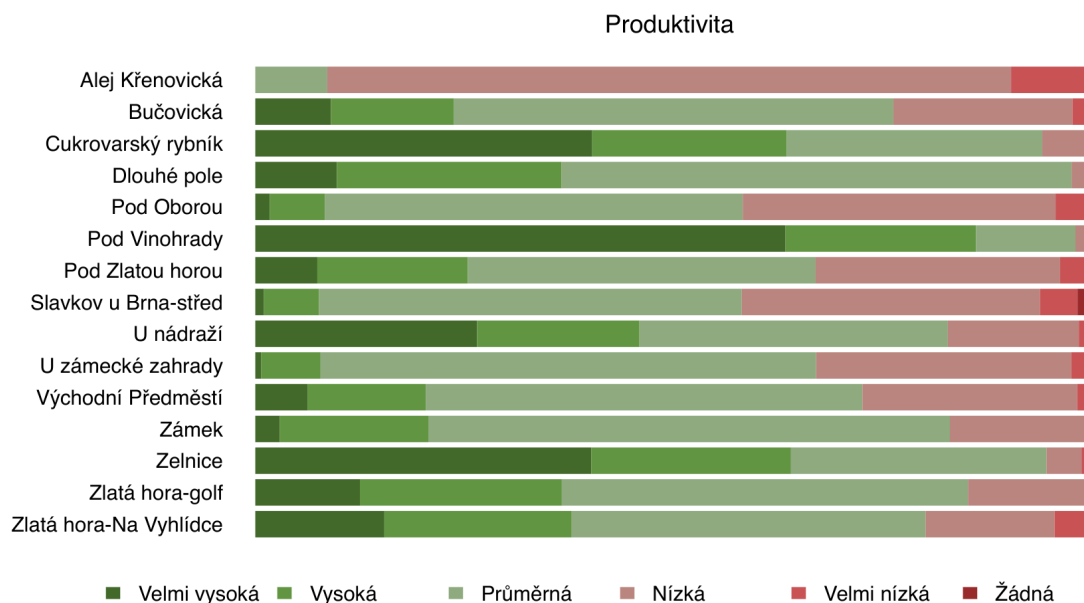


Zdroj: [4]

3. Strom není jen strom – produktivita a funkčnost

Samotný počet stromů však stále nevypovídá o jejich skutečném přínosu. Velký, zdravý a vitální strom má z hlediska stínění, ochlazování nebo zachytávání znečišťujících látek jiný význam než mladý nebo dlouhodobě stresovaný jedinec. Proto hodnotíme také produktivitu stromů, tedy relativní míru jejich růstu a vitality. Výsledky lze agregovat do územních jednotek a sledovat, kde převažují stromy s velmi vysokou, vysokou, průměrnou, nízkou nebo velmi nízkou produktivitou.

Obr. 2. Relativní zastoupení stromů podle územních jednotek a kategorií produktivity ve Slavkově u Brna.



Zdroj: [6]

Graf pro Slavkov u Brna ukazuje, že jednotlivé územní jednotky se ve skladbě produktivity stromů liší. V některých územích je výraznější zastoupení vysoce produktivních stromů, zatímco jinde tvoří podstatnou část stromů kategorie s průměrnou či nízkou produktivitou. Taková informace je důležitá zejména při plánování péče. Prioritou nemusí být automaticky výsadba nových stromů, ale v řadě případů je vhodnější ochrana a podpora těch stávajících, které mají vysoký funkční potenciál.

4. Satelitní data ukazují stres dříve, než je patrný v terénu

Další úrovní hodnocení je sledování stresu stromů. Pro tento účel využíváme satelitní data a jejich časové řady. Výhodou je možnost sledovat průběh celé vegetační sezóny a zachytit i jemné změny v množství listové plochy nebo v koncentraci chlorofylu. Tyto změny mohou upozornit na začínající stres nebo pokles vitality, který nemusí být při běžném pohledu na území na první pohled patrný.

Obr. 3. Úroveň stresu analyzovaných stromů ve vybrané části Slavkova u Brna.



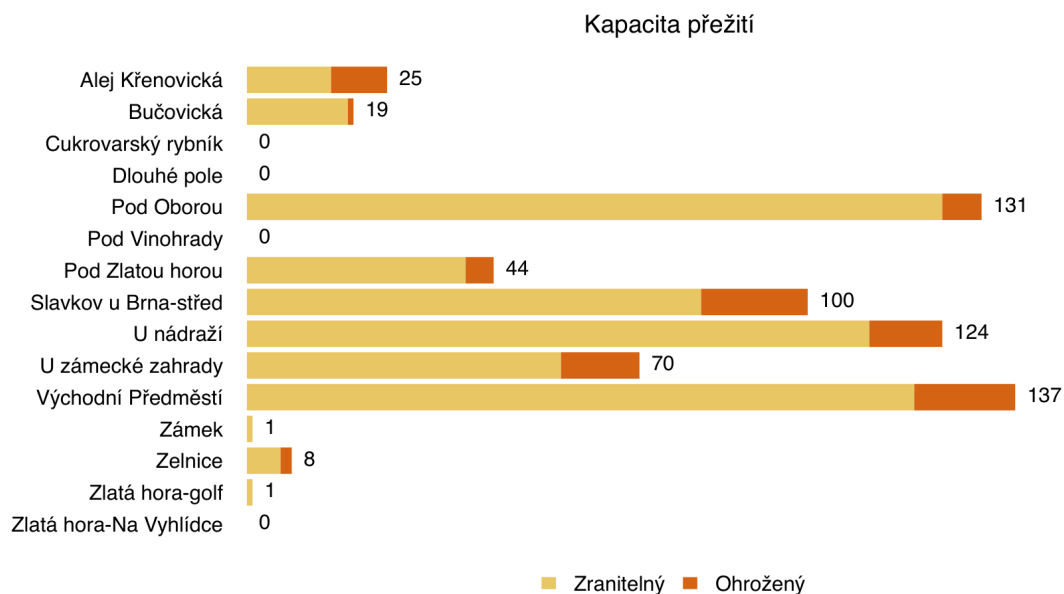
Zdroj: [6]

Výsledná mapa umožňuje lokalizovat stromy podle úrovně stresu a pracovat s nimi jako s konkrétními místy, nikoli pouze s průměrem za celé město. Pro město je tak možné identifikovat oblasti, kde se kumuluje větší množství stresovaných stromů, a zaměřit do těchto míst kontrolu, údržbu nebo obnovu. Satelitní analýza přitom nenahrazuje odborné arboristické posouzení jednotlivého stromu, ale umožňuje lépe určit, kde má smysl podrobné terénní hodnocení provést.

5. Kapacita přežití – kde budou stromy prosperovat i v budoucnu

Pro plánování adaptačních opatření je podstatné nejen to, jak strom vypadá dnes, ale také jeho předpokládaná schopnost dlouhodobě přežívat a prosperovat. Proto sledujeme kapacitu přežití a identifikujeme zranitelné a ohrožené stromy. Takové hodnocení umožňuje propojit informace o současném stavu stromů s rozhodováním o budoucích investicích do jejich péče, případně doplňkových opatření.

Obr. 4. Počet zranitelných a ohrožených stromů podle územních jednotek ve Slavkově u Brna.



Zdroj: [6]

Ve Slavkově u Brna se podle zpracované analýzy nejvyšší počty zranitelných a ohrožených stromů soustřeďují v územních jednotkách Východní Předměstí, Pod Oborou, U nádraží a Slavkov u Brna-střed. Obr. 5. zároveň ukazuje, že kapacita přežití není v území rozložena rovnoměrně. To vytváří prostor pro cílenější přístup, místo plošné péče. Na základě analýzy lze určit území, kde bude mít obnova nebo intenzivnější péče o stromy největší význam.

6. Příklad město Kuřim

6.1. Analýza 3-30-300

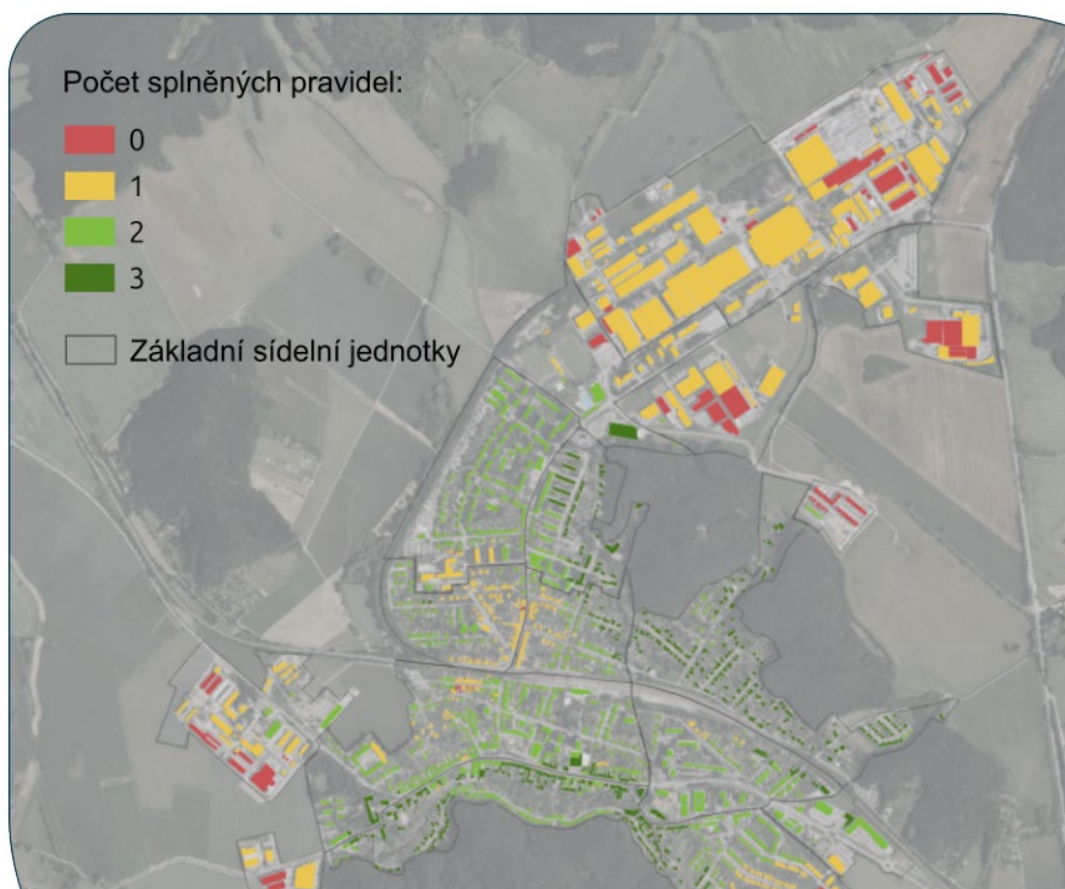
Praktické využití pravidla 3-30-300 ukazuje analýza města Kuřim, která byla provedena pro 2 442 budov využívaných k bydlení, práci nebo vzdělávání. Výsledky ukázaly výrazný rozdíl mezi jednotlivými pravidly:

- pravidlo 3 splnilo 94 % budov,
- pravidlo 30 pouze 32 %
- pravidlo 300 celkem 67 %.

Celkové pravidlo 3-30-300 splnilo 25 % analyzovaných budov. Hlavním omezením tedy není počet míst, odkud je možné vidět vzrostlé stromy, ale především nedostatečný pokryv korunami stromů.

Podrobnější pohled zároveň ukazuje, že výsledky nejsou v území rozloženy rovnoměrně. Zatímco například v základní sídelní jednotce Pod Vinohrady splňuje všechna tři pravidla 92 % budov, v jednotkách Díly za sv. Jánem a Kuřim-střed je podíl budov splňujících pouze jedno nebo žádné pravidlo výrazně vyšší. V Kuřimi-středu splňuje pouze jedno pravidlo 43 budov a dalších 5 budov nesplňuje žádné; v Dílech za sv. Jánem jde o 114, respektive 1 budovu. Problematická území se soustřeďují také v průmyslových areálech a v některých částech nové zástavby.

Obr. 5. Počet splněných pravidel 3-30-300 u jednotlivých budov v Kuřimi.



Zdroj: [4]

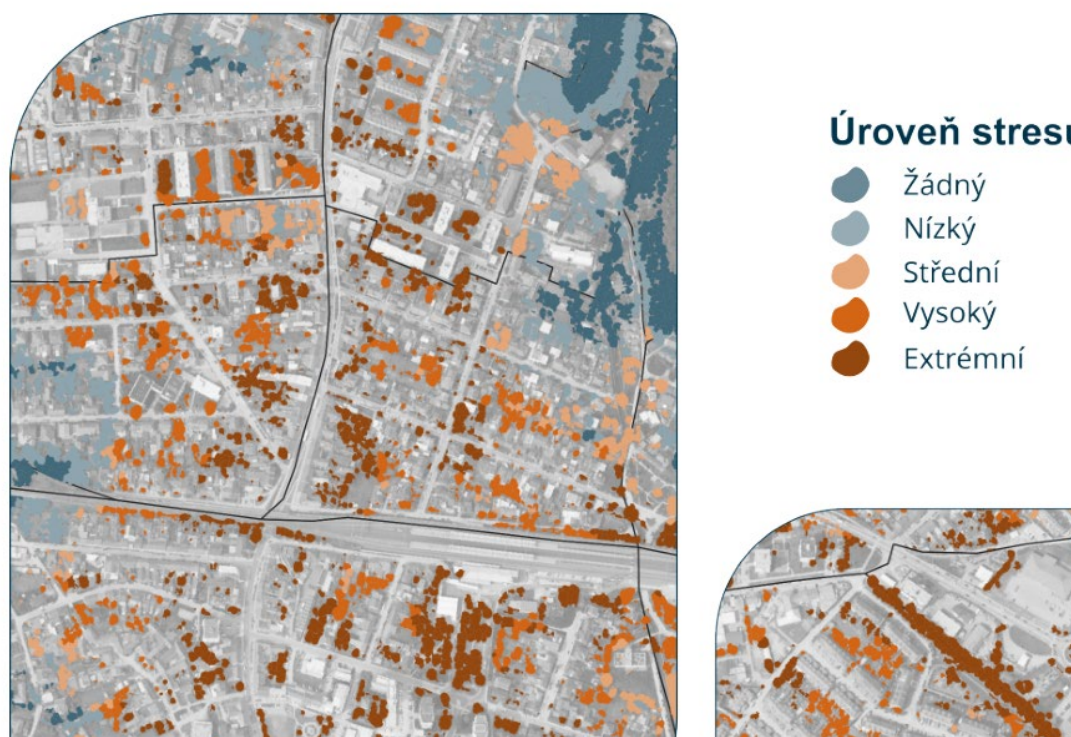
Příklad Kuřim ukazuje, proč samotná informace o množství zeleně nestačí. Detailní prostorové vyhodnocení umožňuje určit části města, kde je vhodné doplnit zeleň, zvýšit pokryv korun nebo zlepšit dostupnost veřejné zeleně. Současně lze odlišit území, kde jsou podmínky již velmi dobré a kde má smysl realizovat další adaptační opatření.

6.2. Up Green pro město Kuřim

Na hodnocení dostupnosti zeleně lze navázat analýzou jejího skutečného stavu. Nástroj UpGreen využívá satelitní data a časové řady k hodnocení jednotlivých stromů podle produktivity, stresu a dlouhodobého trendu produktivity. V Kuřimi bylo v celém analyzovaném území identifikováno 28 178 stromů s korunou větší než 30 m², z toho 16 916 stromů připadalo na analyzované městské území mimo okolní lesy.

Výsledky ukazují, že přítomnost stromů sama o sobě nezaručuje jejich plnou funkčnost. Celkem 46 % analyzovaných stromů mělo podprůměrnou produktivitu a 43 % stromů vykazovalo zvýšenou úroveň stresu. Nejvyšší míra stresu byla zjištěna v centru města a v okolí Mozovského potoka. Právě zde se přitom u většiny stromů v okolí potoka projevovala snížená produktivita i přes dostupnost vody.

Obr. 6. Oblasti s výraznou úrovní stresu v rámci města Kuřim.



Zdroj: [5]

Doplňující ukazatel trendu produktivity pak umožňuje zaměřit pozornost na stromy, u nichž je dlouhodobá schopnost prosperovat nízká. V Kuřimi bylo 4 276 stromů, tedy 15 % celkového počtu, zařazeno do kategorií zranitelný nebo ohrožený. Při omezení pouze na městské území mimo okolní lesy představují tyto stromy 25 %. Výsledkem je podklad pro cílenou péči: místo plošných zásahů lze vyhledat lokality, kde má největší význam zlepšení stanovištních podmínek, údržba nebo plánovaná obnova.

UpGreen tak doplňuje pravidlo 3-30-300 o kvalitativní pohled na samotné stromy. Zatímco 3-30-300 ukazuje, zda je zeleň pro obyvatele dostupná a dostatečně zastoupená, UpGreen pomáhá určit, zda jsou stromy v dobrém stavu, pod stresem a jaký mají předpoklad dlouhodobě plnit své funkce. Kombinace obou přístupů poskytuje přesnější podklad pro rozhodování o ochraně, péči a obnově zeleně.

Smyslem analýz není vytvořit další soubor tematických map, ale převést data do podkladu pro rozhodování. Jednotlivé vrstvy je možné kombinovat: tam, kde je nízké pokrytí korunami a zároveň se vyskytují stresované nebo zranitelné stromy, může být prioritou obnova zeleně a zlepšení podmínek pro stávající vegetaci. Jinde může být naopak vhodnější chránit kvalitní vzrostlé stromy a zajistit jim podmínky pro další růst.

Významnou výhodou je také prostorové měřítko. Analýzu lze provést pro jednotlivé budovy, ulice, územní jednotky nebo celé město a současně ji rozšířit do extravilánu. Město tak získává společný datový základ pro územní plánování, správu zeleně, přípravu adaptačních opatření i plánování investic.

7. Zeleň nekončí na hranici zastavěného území

Klimaticky funkční krajinu nelze hodnotit pouze uvnitř města. Významnou součástí zelené infrastruktury jsou také stromy podél cest v extravilánu. Ty poskytují stín a orientační prvek při pohybu krajinou, podporují její ekologickou propustnost a současně ovlivňují kvalitu prostředí, kterým lidé procházejí nebo projíždějí na kole.

Proto množství zeleně podél cest hodnotíme pomocí modifikovaného pravidla 3. Na každých 30 metrů cesty by měly v součtu po obou stranách připadat tři stromy. Pro praktické vyhodnocení používáme klouzavý průměr a přepočet na 10 metrů cesty. Minimum pro splnění pravidla tak představuje jeden strom na 10 metrů cesty.

Obr. 7 Průměrný počet stromů na 10 m cesty v extravilánu; minimum pro splnění modifikovaného pravidla 3 je 1 strom na 10 m.



Zdroj: ASITIS, vlastní zpracování.

10. Závěr

Funkční krajina není krajina s nejvyšším počtem stromů, ale krajina, v níž stromy skutečně plní své funkce a jejich přínos je dostupný lidem i celému ekosystému. Proto je užitečné posunout hodnocení od jednoduchého počítání stromů k jejich prostorovému rozmístění, velikosti, produktivitě, stresu a předpokládané kapacitě přežití.

Pravidlo 3-30-300 poskytuje srozumitelný rámec pro hodnocení zeleně z pohledu obyvatel. Doplnující satelitní analýzy pak umožňují lépe rozlišit, kde je zeleň pouze přítomná a kde je skutečně funkční. Výsledkem je nástroj, který pomáhá městům rozhodovat, kde stromy chránit, kde jim věnovat zvýšenou péči a kde je naopak potřeba zelenou infrastrukturu doplnit.

Literatura

- [1] KONIJNENDIJK, C. C. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 rule. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34, 821–830. DOI: 10.1007/s11676-022-01523-z.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. *Urban green spaces and health: a review of evidence*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2016. ISBN 978-92-890-5132-0.
- [3] WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. *Urban green spaces: a brief for action*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2017. ISBN 978-92-890-5249-8.
- [4] ASITIS. *Vyhodnocení pravidla 3-30-300 pro město Kuřim*. Brno, 2025.
- [5] ASITIS. *UpGreen Kuřim: Analýza stavu městské zeleně*. Brno, 2025.
- [6] ASITIS. *Vyhodnocení pravidla 3-30-300 pro město Slavkov u Brna*. Brno, 2025.
- [7] EUROPEAN COMMISSION. VALORADA – Validated Local Risk Actionable Data for Adaptation. CORDIS, Project ID 101112837. 2023–2026. DOI: 10.3030/101112837.

Functional and Diverse Landscape: A Different Perspective on Trees

Jiří Jedlička, Miloslav Kaláb, Lenka Foltýnová, Martin Vokřál

ASITIS s.r.o.

Vážného 10, 621 00, Brno

e-mail: jedlicka@asitis.cz

Abstract

Trees are among the most important elements of both urban and rural landscapes. However, when planning adaptation measures, it is not enough to know how many trees are present in an area. It is also important to consider where they grow, whether they are accessible to residents, how much shade and other ecosystem services they provide, and what their health condition is. This paper presents an approach to assessing urban greenery more comprehensively using spatial and satellite data. It applies the 3-30-300 rule, which considers the visibility of mature trees, tree canopy cover, and access to high-quality public green spaces, and complements it with an assessment of trees in the wider countryside. The approach also includes an analysis of tree productivity, stress, and survival capacity. The result is not merely a map of green infrastructure, but a decision-support tool indicating where existing trees should be protected, where their health should be given priority in maintenance, and where additional greenery should be established.

Analýza mikročástic na povrchu ovoce v blízkosti dopravních komunikací v Hradci Králové

Martina Brenčíč¹, Markéta Holíková², Jaroslav Rožnovský¹

¹Mendelova univerzita v Brně,

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

²Český hydrometeorologický ústav,

Kroftova 43, Brno;

e-mail: xbrencic@mendelu.cz

Abstrakt

Městské prostředí má své specifické klima, které je dáno především radiační bilancí umělých povrchů. Tím dochází ve městech k výskytu vyšších teplot vzduchu, tzv. městskému tepelnému ostrovu, s nepříznivými dopady na zdraví obyvatel. Pro snížení výskytu tepelného ostrova je doporučováno zvýšení zastoupení zeleně, jejíž jednou z forem jsou i ovocné dřeviny. Vzhledem ke znečištění městského ovzduší dopravou je však často kladena otázka na zdravotní nezávadnost ovoce vypěstovaného ve městech.

Pro charakterizaci částic deponovaných na povrchu ovoce v blízkosti frekventované komunikace jsme provedli odběr plodů jablek v ulici Pilnáčkova v Hradci Králové. K analýze byla použita metoda skenovací elektronové mikroskopie v kombinaci s energiově disperzní rentgenovou spektroskopií (SEM/EDX), která umožňuje analyzovat jak morfologii částic, tak jejich prvkové složení.

Ve vzorcích byla pozorována široká variabilita morfologie i chemického složení částic. Na povrchu plodů byly identifikovány částice minerálního i antropogenního charakteru a biogenní struktury, u části nálezů morfologie a prvkové složení odpovídaly částicím pocházejícím z dopravních otěrů. Výsledky ukazují, že metoda SEM/EDX i přes své limity představuje cenný nástroj pro identifikaci a charakterizaci částic deponovaných na povrchu ovoce v městském prostředí.

1. Úvod

Městské prostředí se od svého okolí liší tepelnými a radiačními poměry ovlivněnými zástavbou, vysokým podílem nepropustných povrchů a omezeným zastoupením vegetace. Jedním z důsledků je zvýšená tepelná zátěž a vznik městského tepelného ostrova. Městské stromy mohou tuto zátěž zmírňovat především stíněním a evapotranspirací; velikost ochlazovacího účinku však závisí na klimatu, vlastnostech stromů a morfologii městské zástavby [1; 2].

Zvyšování zastoupení stromů ve městech proto představuje významné adaptační opatření, současně však vyvolává otázky spojené s jejich funkcí v prostředí zatíženém znečištěním ovzduší. Vegetace zachycuje částice na povrchu listů a dalších rostlinných orgánů, přičemž depozice, retence, resuspenze a smývání částic závisejí na vlastnostech vegetace i částic a na podmínkách prostředí [3]. V uličním prostoru může koruna stromů vedle zachytu částic ovlivňovat proudění a rozptyl znečišťujících látek; vztah mezi městskou zelení a lokální kvalitou ovzduší proto není vždy jednoznačný [4].

Silniční doprava je v městském prostředí zdrojem částic nejen ze spalovacích procesů, ale také z mechanického opotřebení brzd, pneumatik a povrchu vozovky.

Složení nevyfukových částic je značně proměnlivé. U brzdového otěru se často vyskytuje Fe spolu s Cu, Ba, Zn, Cr, Ti, S a dalšími prvky [5–8]. Na povrchu ovoce se současně mohou akumulovat částice různého původu; jejich množství závisí nejen na blízkosti komunikace, ale také na vlastnostech plodu a přítomnosti dalších emisních zdrojů v okolí a širším znečištění městského prostředí [9].

Částice deponované na vozovce mohou být provozem vozidel a prouděním vzduchu opakovaně resuspendovány. V bezprostředním okolí komunikace proto nelze očekávat pouze přímou depozici čerstvě emitovaných částic, ale směs primárních a již dříve deponovaných částic. Morfochemická analýza jednotlivých částic může pomoci popsat tuto heterogenitu, avšak přiřazení konkrétní částice k jedinému zdroji je zatíženo nejistotou [10].

Skenovací elektronová mikroskopie v kombinaci s energiově disperzní rentgenovou spektroskopií (SEM/EDX) umožňuje současně hodnotit morfologii a prvkové složení jednotlivých částic. Tato práce přímo navazuje na předchozí metodické ověření analýzy částic přenesených z povrchu ovoce na planární polykarbonátový filtr [11] a na následné využití SEM/EDX při charakterizaci částic deponovaných přímo na jabloňových listech v Hradci Králové [12].

Cílem příspěvku je popsat spektrum částic nalezených na povrchu jablek rostoucích u frekventované komunikace v Hradci Králové a posoudit jejich možný původ na základě kombinace morfologie a prvkového složení. Doplnkově byly porovnány nálezy na plodech z přivrácené a odvrácené strany koruny stromu, na omytých a neomytých plodech a při dvou způsobech mechanického přenosu částic na polykarbonátový filtr.

2. Materiál a metody

Vzorky představovaly celkem čtyři plody jabloně odebrané z jednoho stromu v ulici Pilnáčkova v Hradci Králové, situovaného v bezprostřední blízkosti frekventované komunikace. Dva plody pocházely ze strany koruny přivrácené k vozovce a dva ze strany odvrácené. Z obou stran byl vždy jeden plod určen pro přenos částic metodou otisku a druhý metodou otěru. Každý plod byl vzorkován nejprve v neomytém stavu a následně po opláchnutí pod tekoucí vodou (odpovídajícím běžnému omytí před konzumací) a oschnutí.

Při metodě otisku byly částice přenášeny na polykarbonátový filtr Isopore™ (Merck) valivým kontaktem plodu s filtrem. Při metodě otěru byl filtr upevněn na SEM terčík (stub) a opakovaně přejížděn po povrchu plodu. Celkem bylo připraveno osm preparátů: z přivrácené strany otisk před (vzorek 2) a po omytí (vzorek 4) a otěr před (vzorek 3) a po omytí (vzorek 5); z odvrácené strany otisk před (vzorek 14) a po omytí (vzorek 16) a otěr před (vzorek 15) a po omytí (vzorek 17). Vzhledem k omezenému počtu plodů je experiment koncipován jako explorativní případová studie s popisným hodnocením bez statistické interpretace.

Příprava vzorků a SEM/EDX analýza navazovaly na dříve ověřenou metodiku [11]. Z filtru byla vyříznuta plocha o průměru 12 mm, upevněna vodivou uhlíkovou páskou na terčík a pokovena nanovrstvou zlata. Metoda otisku, dříve vyhodnocená jako nejvhodnější [11], byla doplněna otěrem pro kvalitativní srovnání přenosu materiálu. Vzorky byly analyzovány mikroskopem MIRA3 (TESCAN GROUP, a.s.) v režimech SE a BSE. Prvkové složení bylo stanoveno bodovou EDX analýzou v softwaru AZtec (Oxford Instruments).

Výskyt jediného prvku nebyl považován za důkaz konkrétního zdroje; přiřazení bylo formulováno pouze při odpovídající kombinaci morfologie a prvkového složení popsané v literatuře a předchozích pozorováních [12]. Zvláštní opatrnost byla věnována uhlíkatým částicím z důvodu vysokého uhlíkového pozadí a nízkého kontrastu na polykarbonátovém podkladu [13; 14].

3. Výsledky a diskuse

3.1. Celková charakteristika a heterogenita částic

Na povrchu všech čtyř plodů byl pozorován morfologicky i chemicky heterogenní soubor částic. Nálezy zahrnovaly minerální částice nepravidelného tvaru, vláknité struktury pravděpodobně biogenního původu, Fe-bohaté a další kovové částice, směsné částice městského prachu, Ca-bohaté částice i jednotlivé útvary neobvyklé morfologie. Vzhledem k tomu, že vzorky před a po omytí pocházejí vždy z jednoho konkrétního plodu, nelze je považovat za nezávislé replikáty. Otisk a otěr byly naopak provedeny na různých plodech, a jejich výsledky proto nelze interpretovat jako přímé párové porovnání obou způsobů přenosu.

Minerální složku představovaly zejména hlinitokřemičitany a částice s dominantním zastoupením Si, Al, Ca, K, Mg a proměnlivým obsahem Fe. Toto složení odpovídá půdnímu materiálu i minerální frakci silničního prachu [8]. V řadě případů měly minerální částice směsný charakter a obsahovaly lokální Fe-bohaté inkluze. Tyto nálezy jsou plně slučitelné s městským silničním prachem, v němž se geogenní složky mísí s částicemi pocházejícími z dopravních otěrů.

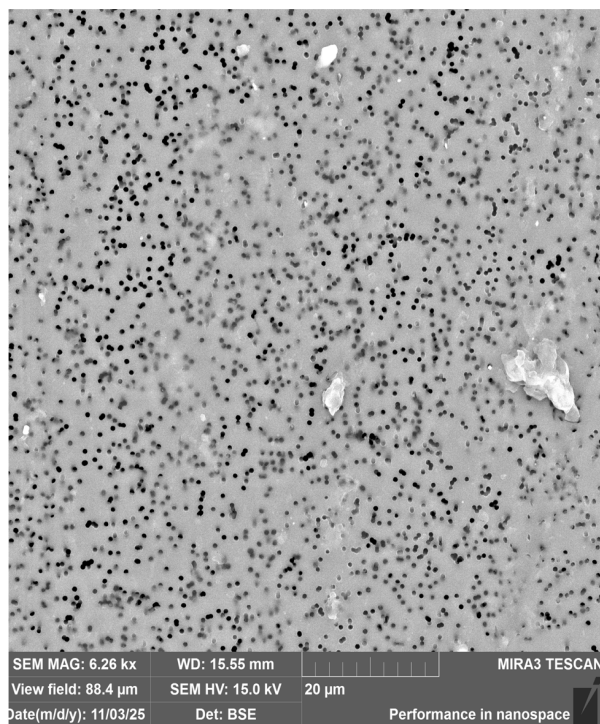
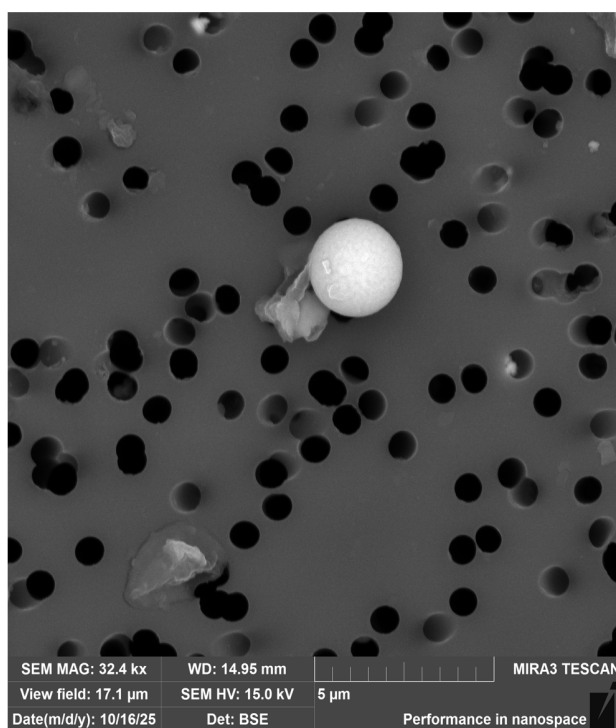
Tab. 1. Přehled hlavních typů částic identifikovaných na povrchu jablek přenesených na polykarbonátový filtr

Typ nálezu	Příklady (označení snímku)	Charakteristika SEM/EDX	Možná interpretace
Minerální částice	14d, 15a, 15c, 16f, 17b	Al–Si, Ca, K, Mg, proměnlivé Fe	minerální materiál; součást městského/silničního prachu
Fe/kovové částice	2d–2f, 14b–c, 16c, 16e	Fe; místy Cr, Ti, Cu	dopravní otěr (antropogenní původ)
Ba/S bohaté částice	15b	koexistence Ba a S	složení slučitelné s brzdovým otěrem
Směsné částice	5a, 14b, 15a/c, 17a	minerální/organická matrice + kovové inkluze	městský/silniční prach (heterogenní směs)
Ca-bohaté částice	16a	výrazná převaha Ca	Ca-bohatý minerální materiál; přesná fáze neurčena
Biogenní částice	15a	uhlíkaté (C/O) vláknité struktury	biogenní materiál (např. rostlinná vlákna, spory)
Částice specifické morfologie	2g, 5b	sférické částice; dendritické krystaly (F, K, Cl, Mg, Si)	sférická morfologie slučitelná s vysokoteplotním vznikem/krystalické částice neurčeného původu
Uhlíkaté (C/O) plošné útvary	4, 5, 16, 17	organická (C/O) matrice s anorganickými inkluzemi	pozorováno u omytých plodů; pravděpodobně redistribuovaná kutikula

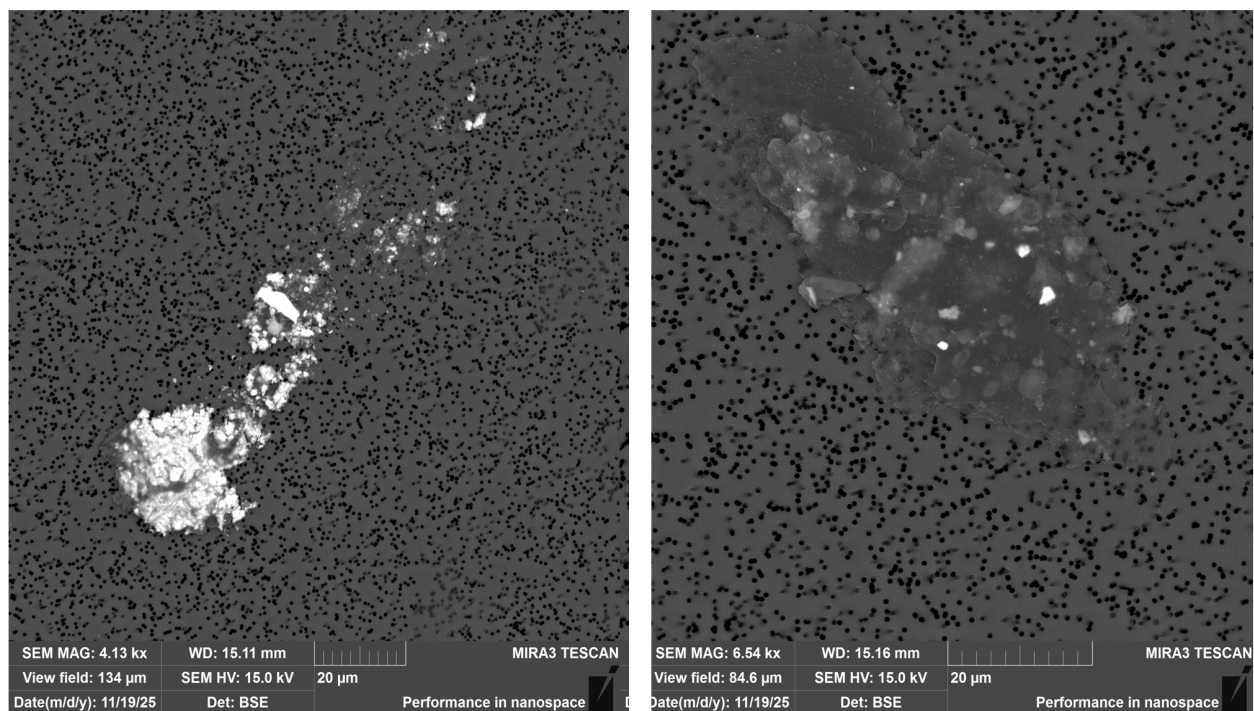
3.2. Částice potenciálně související s dopravními otěry

Opakovaně byly pozorovány Fe-bohaté částice. Samotná přítomnost Fe však není diagnostická, neboť železo se běžně vyskytuje i v geogenním minerálním materiálu. Významnější indicii představují kombinace Fe s Cr, Ti, Cu, Ba nebo S spojené s odpovídající morfologií. Literatura uvádí Fe a řadu dalších prvků včetně Cr, Ti, Cu a Ba mezi běžnými složkami brzdových částic [5–8]. U vzorku 16e byla zaznamenána Fe/Cr-bohatá částice, jejíž složení je slučitelné s dopravním otěrem, není však pro brzdový původ plně specifické. Ve vzorku 15b byla nalezena Ba/S-bohatá částice. Barium bývá uváděno jako významný tracer brzdového otěru [6] a částice složené z Ba a S byly popsány přímo v souvislosti s otěrem brzdových systémů [15]. Proto je zejména nález 15b považován za částice se složením velmi dobře slučitelným s brzdovým otěrem, nikoli však za jednoznačný důkaz konkrétního zdroje.

Obr. 1. Reprezentativní mikročástice přenesené z povrchu jablek na polykarbonátový filtr. Vlevo: sférická částice (vzorek 2g); vpravo: Ba/S-bohaté částice (vzorek 15b)



Obr. 2. Reprezentativní mikročástice přenesené z povrchu jablek na polykarbonátový filtr. Vlevo: Fe/Cr-bohaté částice (vzorek 16e); vpravo: anorganické částice v uhlíkaté matrici (vzorek 17a).



Sférická částice (vzorek 2g) představovala morfologicky odlišný typ nálezu. V literatuře jsou u brzdových částic popsány i téměř sférické útvary, jejichž vznik souvisí s tavením či odpařováním materiálu při vysokoteplotních fázích brzdění a následným rychlým tuhnutím [7]. Sférická morfologie je tedy slučitelná s procesy probíhajícími za vysokých teplot; na základě samotné SEM/EDX analýzy však u tohoto nálezu nelze bez doplňující mikrostrukturní analýzy jednoznačně určit jeho konkrétní zdroj.

3.3. Směsný silniční prach a možná role resuspenze

Na obou stranách koruny stromu byly na povrchu plodů nalezeny směsné částice kombinující minerální složku s lokálně zvýšeným obsahem Fe a dalších kovů. Částice s morfologií a prvkovým složením slučitelným s dopravním prostředím byly zachyceny i na plodech z odvrácené strany koruny. Vzhledem k omezenému rozsahu vzorkování však nelze kvantitativně hodnotit, zda je depozice na jednotlivých stranách koruny odlišná.

Klíčovým mechanismem redistribuce částic v uličním prostoru je resuspenze silničního prachu. Reálný silniční prach představuje směs geogenního materiálu a částic z otěrů brzd, pneumatik, povrchu vozovky i dalších zdrojů [8; 10]. Provoz vozidel a turbulentní proudění vzduchu mohou již deponovaný materiál opakovaně uvádět do ovzduší [10]. Nálezy v této práci jsou s tímto mechanismem plně slučitelné, samotnou resuspenzi však použitý design studie přímo neprokazuje.

3.4. Omytí plodů a způsob přenosu na filtr

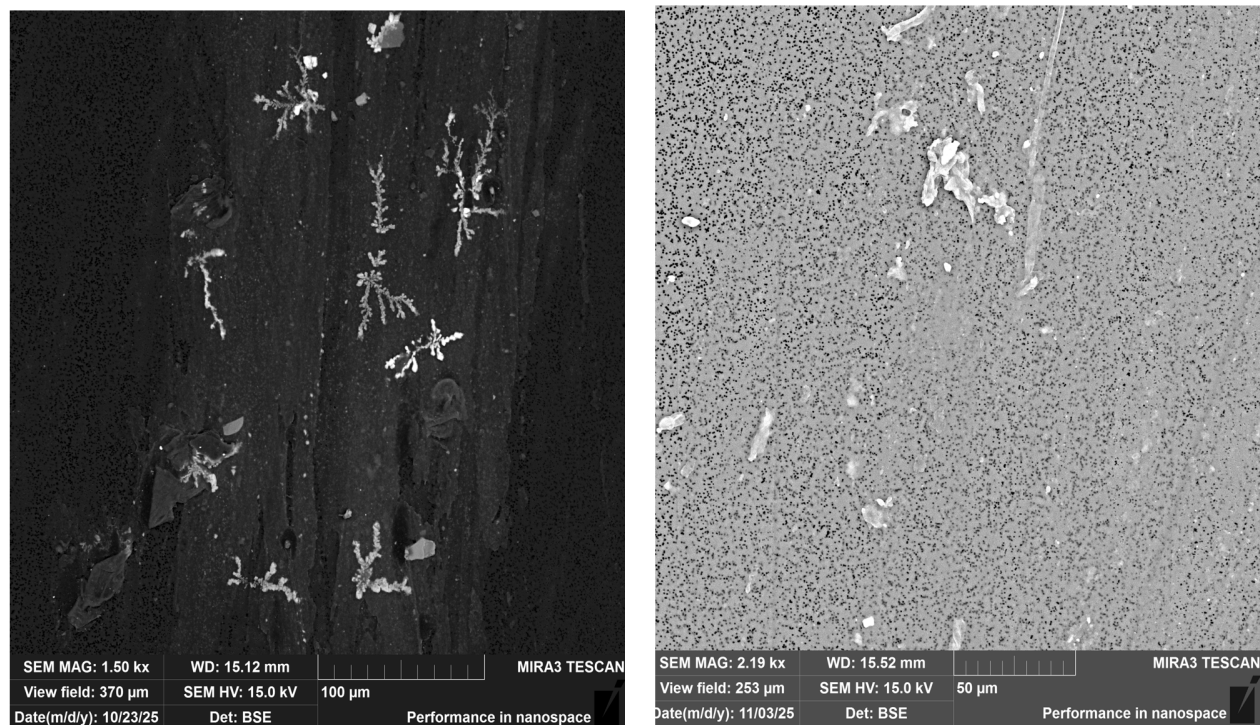
Ve vzorcích připravených po omytí plodů se opakovaně objevovaly plošné uhlíkaté útvary (s převahou C a O), v nichž byly lokálně zachyceny anorganické částice různého

složení. Ve vzorku 17a byla například v organické matici přítomna Fe-bohatá částice. Protože obdobné struktury byly pozorovány v preparátech po omytí plodů z obou stran koruny, mohou souviset s procesem omytí a následným vysycháním či redistribucí povrchového materiálu. Dostupná data však neumožňují určit přesný mechanismus jejich vzniku ani je s jistotou označit za produkt chemické reakce s vodou.

Omytí v tomto experimentu nebylo koncipováno jako standardizovaný laboratorní postup, ale mělo odpovídat běžnému spotřebitelskému omytí ovoce před konzumací. Cílem proto nebylo stanovit účinnost odstranění částic za přesně definovaných podmínek, ale kvalitativně posoudit, jaké typy částic lze na povrchu plodů nalézt i po běžném opláchnutí vodou. Přítomnost částic i na omytých plodech není překvapivá: Przybysz a kol. [9] při studiu jablek a švestek zjistili, že omytí vodou odstranilo přibližně polovinu akumulovaných částic, nikoli veškerý deponovaný materiál. V našem experimentu nebylo množství částic před a po omytí kvantifikováno, a proto nelze účinnost omytí přímo porovnávat s touto studií.

Vzorky získané otiskem a otěrem vykazovaly kvalitativně odlišný obraz částic. Při otěru byla na některých snímcích patrná mechanická deformace polykarbonátového filtru a pravděpodobně i některých částic. Vzhledem k tomu, že oba způsoby přenosu byly použity na různých plodech, nelze pozorované rozdíly přičítat pouze metodě přenosu. Oba postupy je proto vhodné chápat jako doplňkové způsoby odběru, nikoli jako analytické replikace.

Obr. 3. Další typy nálezů přenesených z povrchu plodů na polykarbonátový filtr (zleva): krystalické útvary ve vzorku 5b s proměnlivým zastoupením F, K, Cl, Mg, Si a Al; směsný minerální materiál a vláknité struktury pravděpodobně biogenního původu ve vzorku 15a.



Útvary dendritického krystalického vzhledu ve vzorku 5b obsahovaly v různých analyzovaných bodech prvky F, K, Cl, Mg, Si a Al. Vzhledem k jejich morfologii a chemickému složení představují pravděpodobně krystalické srážky (např. soli z agrotechnických postřiků, hnojiv či přirozených rostlinných výměšků) a jemného minerálního prachu, které vykristalizovaly při odpařování kapek vody. Jejich přesný původ však nelze na základě dostupné SEM/EDX analýzy jednoznačně určit, a nález je proto hodnocen jako částice blíže neurčeného původu.

3.5. Omezení identifikace uhlíkatých částic

V žádném vzorku nebyly jednoznačně identifikovány typické agregáty sazí. Toto pozorování však nelze vykládat jako jejich skutečnou absenci na povrchu plodů. Záchyt ultrajemných uhlíkatých částic mohl být limitován jak účinností použité mechanické metody přenosu (otisk a otěr) na filtr, tak fyzikálně-chemickými vlastnostmi samotného povrchu jablek (struktura epikutikulární voskové vrstvy), na níž se různé typy částic mohou zachytávat a uvolňovat odlišně.

Analýza malých uhlíkatých částic pomocí SEM/EDX je navíc na polykarbonátových filtrech metodicky problematická, jelikož signál uhlíku z částice se překrývá s vysokým uhlíkovým pozadím samotného podkladu a submikrometrové částice vykazují nízký kontrast [13; 14]. Použitá kombinace metod je proto vhodnější pro morfochemickou charakterizaci anorganických a kovových částic než pro spolehlivou identifikaci jemných organických částic. Ověření přítomnosti a míry akumulace sazí na plodech s využitím odlišných analytických podkladů či separačních postupů tak představuje vhodný námět pro navazující výzkum.

4. Závěr

SEM/EDX analýza vzorků získaných ze čtyř plodů jablek odebraných z jednoho stromu u frekventované komunikace v Hradci Králové ukázala značnou morfologickou a chemickou rozmanitost částic na povrchu plodů. Vedle minerálního materiálu a vláknitých struktur pravděpodobně biogenního původu byly nalezeny Fe-bohaté a směsné částice. U některých částic byly zjištěny kombinace Fe–Cr nebo Ba–S; jejich prvkové složení je slučitelné s částicemi popisovanými v souvislosti s dopravními otěry, přičemž zejména Ba–S představuje kombinaci uváděnou v souvislosti s brzdovými materiály. Samotná SEM/EDX analýza však neumožňuje zcela jednoznačně určit konkrétní zdroj jednotlivých částic.

Výskyt obdobných typů částic i na plodech z odvrácené strany koruny stromu ukazuje, že jejich depozice není omezena pouze na stranu přímo orientovanou ke komunikaci. Mezi možné mechanismy jejich transportu patří turbulentní proudění a resuspenze silničního prachu; jejich význam však nebylo možné daným experimentem určit. Vzhledem k omezenému počtu biologických vzorků nelze rozdíly mezi stranami koruny stromu ani efekt omytí plodů kvantifikovat nebo zobecňovat.

Omyté plody vykazovaly plošné uhlíkaté útvary (s převahou C a O) s inkorporovanými anorganickými částicemi. Jejich vznik s vysokou pravděpodobností souvisí s fyzikální redistribucí a částečným přenosem přirozené organické kutikuly (epikutikulární voskové vrstvy) jablek, nikoli s vlastní chemickou reakcí – toto tvrzení by však vyžadovalo další ověření. Otisk a otěr se ukázaly jako doplňkové způsoby přenosu povrchového materiálu, přičemž otěr může ovlivnit morfologii filtru i samotných částic. Zda byly saze na povrchu

plodů reálně přítomny, nelze na základě zvolené metodiky jednoznačně posoudit; nelze totiž spolehlivě rozlišit, zda k jejich přenosu z plodů zvolenými postupy vůbec došlo, či zda se na hladké voskové kutikule jablka dokážou dlouhodobě udržet (např. vlivem smytí či povětrnostních vlivů).

Výsledky ukazují potenciál SEM/EDX pro detailní charakterizaci částic deponovaných na ovoci v městském prostředí, zároveň však ukazují potřebu většího počtu vzorků a doplnění dalších analytických metod pro spolehlivější přiřazení emisních zdrojů těchto částic.

Literatura

- [1] ALONZO, M.; IBSEN, P. C.; LOCKE, D. H. Urban Trees and Cooling: A Review of the Recent Literature (2018 to 2024). *Arboriculture & Urban Forestry*. 2025, 51(4), jauf.2025.023. DOI 10.48044/jauf.2025.023.
- [2] LI, H.; ZHAO, Y.; WANG, C.; ÜRGE-VORSATZ, D.; CARMELIET, J.; BARDHAN, R. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait. *Communications Earth & Environment*. 2024, 5, 754. DOI 10.1038/s43247-024-01908-4.
- [3] LINDÉN, J.; GUSTAFSSON, M.; UDDLING, J.; WATNE, Å.; PLEIJEL, H. Air pollution removal through deposition on urban vegetation: The importance of vegetation characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2023, 81, 127843. DOI 10.1016/j.ufug.2023.127843.
- [4] WANG, X.; ZHOU, Z.; XIANG, Y.; PENG, C.; PENG, C. H. Effects of street plants on atmospheric particulate dispersion in urban streets: A review. *Environmental Reviews*. 2024, 32(1), 114–130. DOI 10.1139/er-2023-0103.
- [5] GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015, 22(24), 2491–2504. DOI 10.1007/s11356-014-3696-8.
- [6] GIETL, J. K.; LAWRENCE, R.; THORPE, A. J.; HARRISON, R. M. Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road. *Atmospheric Environment*. 2010, 44(2), 141–146. DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.10.016.
- [7] LIATI, A.; SCHREIBER, D.; LUGOVYY, D.; GRAMSTAT, S.; EGGENSCHWILER, P. D. Airborne particulate matter emissions from vehicle brakes in micro- and nano-scales: Morphology and chemistry by electron microscopy. *Atmospheric Environment*. 2019, 212, 281–289. DOI 10.1016/j.atmosenv.2019.05.037.
- [8] ADACHI, K.; TAINOSHO, Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International*. 2004, 30(8), 1009–1017. DOI 10.1016/j.envint.2004.04.004.
- [9] PRZYBYSZ, A.; STĘPNIAK, A.; MAŁECKA-PRZYBYSZ, M.; ZHU, C.; WIŃSKA-KRYSIAK, M. Particulate Matter Accumulation on Apples and Plums: Roads Do Not Represent the Greatest Threat. *Agronomy*. 2020, 10(11), 1709. DOI 10.3390/agronomy10111709.
- [10] CASOTTI RIENDA, I.; ALVES, C. A. Road dust resuspension: A review. *Atmospheric Research*. 2021, 261, 105740. DOI 10.1016/j.atmosres.2021.105740.
- [11] BRENČIČ, M.; HOLÍKOVÁ, M. Potenciál metody SEM/EDX z hlediska analýzy znečišťujících látek na povrchu plodů ovoce z městských aglomerací. *Acta Facultatis Ecologiae*. 2025, 49, 7–14.

- [12] HOLÍKOVÁ, M.; BRENČIČ, M.; ROŽNOVSKÝ, J. Air Quality in the City of Hradec Králové. In: *Public Recreation and Landscape Protection – With Environment Hand in Hand?* 2026, 29–33. DOI 10.11118/978-80-7701-087-0-0029.
- [13] WILLIS, R. D.; BLANCHARD, F. T.; CONNER, T. L. *Guidelines for the Application of SEM/EDX Analytical Techniques to Particulate Matter Samples*. Report No. EPA/600/R-02/070. Research Triangle Park: U.S. Environmental Protection Agency, 2002.
- [14] LASKIN, A.; COWIN, J. P. Automated Single-Particle SEM/EDX Analysis of Submicrometer Particles down to 0.1 μm . *Analytical Chemistry*. 2001, 73(5), 1023–1029. DOI 10.1021/ac0009604.
- [15] INGO, G. M.; RICCUCCI, C.; PISANI, G.; DI CARLO, G.; SVALDO, A.; BIANCHI, G. The vehicle braking systems as main source of inhalable airborne magnetite particles in trafficked areas. *Environment International*. 2022, 158, 106991. DOI 10.1016/j.envint.2021.106991.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu QL26010355 Inovace rajonizace ovocných dřevin vzhledem ke globální změně klimatu.

Analysis of Microparticles on the Surface of Fruit Near Traffic Routes in Hradec Králové

Martina Brenčíč¹, Markéta Holíková², Jaroslav Rožnovský^{1,2}

¹ *Mendel University in Brno,*

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

² *Czech Hydrometeorological Institute,
Kroftova 43, Brno;*

e-mail: xbrencic@mendelu.cz

Abstract

The urban environment has a specific climate determined primarily by the radiation balance of artificial surfaces. This leads to higher air temperatures in cities—the so-called urban heat island effect—with adverse impacts on human health. To mitigate the urban heat island, increasing greenery is recommended, with fruit trees representing one of its forms. However, given urban air pollution caused by traffic, questions are frequently raised regarding the health safety of fruit grown in cities.

To characterize particles deposited on the surface of fruit near a busy road, apple samples were collected on Pilnáčková Street in Hradec Králové. Scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX) was used for the analysis, allowing the examination of both particle morphology and elemental composition.

A wide variability in particle morphology and chemical composition was observed in the samples. Mineral and anthropogenic particles, as well as biogenic structures, were identified on the fruit surface, with some findings exhibiting morphology and elemental composition consistent with traffic-related wear particles. The results demonstrate that the SEM/EDX method is a suitable tool for the identification and characterization of particles deposited on fruit surfaces in an urban environment.

Světelné znečištění – norma ČSN 36 0459

Vladislava Primas

EKOLA group, spol. s r.o.

Mistrovská 4, 108 00 Praha 10

e-mail: vladislava.primas@ekolagroup.cz

Abstrakt

Světelné znečištění se stává stále více předmětem zájmu jak odborné veřejnosti, tak široké populace, a to nejen v České republice, ale globálně. Termín světelné znečištění je často synonymně používán s výrazy jako světelný smog či rušivé světlo. Tato terminologická variabilita odráží i subjektivní vnímání toho, co jednotlivci považují za obtěžující.

Z hlediska environmentálních dopadů se však rušivé účinky světla neomezují pouze na člověka, ale významně ovlivňují také faunu a flóru. Celá problematika vyžaduje komplexní přístup, neboť všechny tyto aspekty jsou vzájemně provázané.

V tomto příspěvku se zaměřím na současně platnou legislativu a relevantní normy, které se zabývají problematikou světelného smogu a rušivého světla.

1. Úvod

S účinností od 1. června 2024 vstoupil v platnost nový stavební zákon a související prováděcí vyhlášky. Součástí této legislativní změny je i přijetí normy a jejího částečného zezávaznění. Jedná se o normu ČSN 36 0459 - Omezování nežádoucích účinků elektrického osvětlení ve venkovním prostředí.

V přednášce (prezentaci) se budeme podrobněji věnovat jednotlivým parametrům, které norma definuje a kvantifikuje. Dále se zaměříme na jejich aplikaci v projektové přípravě veřejného osvětlení komunikací, a to jak z hlediska návrhu, tak i ověření prostřednictvím měření po realizaci. Zmíněny budou rovněž požadavky Ministerstva životního prostředí týkající se sledování metrik pro hodnocení rušivého světla.

Světelné znečištění představuje významný faktor životního prostředí, které globálně ovlivňuje faunu, flóru. S rozvojem elektrického osvětlení (od 18. století n.l.) došlo k narušení přirozeného cyklu noci, což má dopady nejen na člověka, ale na celé životní prostředí. Ačkoliv se jedná o relativně mladou disciplínu, tak se světelnému znečištění dostává na úrovni evropské i celosvětové velké pozornosti. Je proto klíčové být v projektové přípravě o krok napřed a průběžně přizpůsobovat stávající soustavy elektrického osvětlení.

V následujících kapitolách je uveden styčný přehled legislativy a norem, kde můžete najít požadavky na elektrické osvětlení včetně oslnění a rušivého světla.

2. Legislativní a normativní požadavky

Zákon č. 283/2021 Sb., stavební zákon

§ 150 – Požadavky na úsporu energie

Vyhláška č. 131/2024 Sb., o dokumentaci staveb

Vyhláška o dokumentaci staveb obsahuje náležitosti jednotlivých dokumentací. Omezení nežádoucích účinků venkovního osvětlení je uvedeno jako součást popisu

vlivu na životní prostředí a jeho ochrany v příloze č. 1, Obsah dokumentace pro povolení stavby, dále v příloze č. 2 Obsah dokumentace pro povolení stavby vodního díla včetně souvisejících technologických objektů, příloze č. 3 Obsah dokumentace pro povolení stavby sítě technické infrastruktury včetně souvisejících technologických objektů, v příloze č. 4 Obsah dokumentace pro povolení stavby v případě souboru staveb, příloze č. 5 Obsah dokumentace pro rámcové povolení, nejde-li o záměry v působnosti jiného stavebního úřadu, jež slouží nebo mají sloužit k zajišťování obrany a bezpečnosti státu, které se nenachází v areálech dokončených staveb, příloze č. 7 Obsah dokumentace pro povolení změny využití území, příloze č. 8 Obsah dokumentace pro provádění stavby, nejde-li o stavbu rodinného domu nebo stavbu pro rodinnou rekreaci a v příloze č. 9 Obsah dokumentace pro provádění stavby rodinného domu a stavby pro rodinnou rekreaci.

Vyhláška č. 146/2024 Sb., vyhláška o požadavcích na výstavbu

§ 24 – Omezování nežádoucích účinků venkovního osvětlení

Nařízení hl. m. Prahy č. 12/2024 Sb., o požadavcích na výstavu v hlavním městě Praze (pražské stavební předpisy)

§ 8 – Obecné požadavky na veřejná prostranství

§ 9 – Umisťování staveb ve veřejných prostranstvích

§ 12 – Výsadbové pásy a stromořadí v uličních prostranstvích

Poznámka: Brno a Ostrava mají vlastní stavební předpisy. Pokud budete řešit světlené znečištění v těchto místech, je vhodné se s těmito předpisy seznámit, zda v nich není lokální požadavky.

ČSN 36 0459 - Omezování nežádoucích účinků elektrického osvětlení ve venkovním prostředí

Kapitola 5.2. – zónování.

Tato kapitola se zabývá tím, že se dané území má z hlediska požadavků na citlivost prostředí zařadit do zón světelného prostředí. Celkem je stanoveno pět zón označované Z0 až Z4.

- Z0 – Velmi tmavé
- Z1 – Tmavé
- Z2 – Málo světlé
- Z3 – Středně světlé
- Z4 – Velmi světlé

Kapitola 5.3. uvádí Kritéria pro hodnocení nežádoucích účinků venkovního osvětlení.

Oblasti, které jsou dočteny světlenými podmínkami/prostředí:

- Ochrana zdraví
- Ochrana životního prostředí
- Bezpečnost při užívání prostoru, provozu a údržbě
- Úspora energie
- Ochrana krajinného rázu
- Kvalita prostředí sídel

Kritéria, která se používají pro hodnocení omezování nežádoucích účinků venkovního osvětlení:

- Tolerance návrhu osvětlení
- Jas fasády budovy
- Jas znaku
- Svislá osvětlenost na objektech
- Provozní třída svítivosti
- Podíl horního světla
- Prahový přírůstek
- Spektrální vlastnosti
- Regulovatelnost osvětlovací soustavy

3. Závěr

Pokud potřebujeme omezit nežádoucí účinky venkovního osvětlení, nejjednodušším řešením je vypínání/stmívání soustav, pokud je nepotřebujeme. Zohledněte však všechny aspekty, proč daná soustava vzniká, co je jejím primárním účelem. Programovatelnost osvětlovacích soustav, stmívání, optika atd. to vše má smysl včetně vhodného umístění sloupů/stožárů. Nezapomeňte na jednu vlastnost, kterou máme (jak lidé, tak fauna) – a to je adaptace zraku. Řešení nemusí být složitá. V jednoduchosti je krása.

Literatura

- [1] Zákon č. 283/2021 Sb., stavební zákon
- [2] Vyhláška č. 131/2024 Sb., o dokumentaci staveb
- [3] Vyhláška č. 146/2024 Sb., vyhláška o požadavcích na výstavbu
- [4] Nařízení hl. m. Prahy č. 12/2024 Sb., o požadavcích na výstavu v hlavním městě Praze (pražské stavební předpisy)
- [5] ČSN 36 0459 - Omezování nežádoucích účinků elektrického osvětlení ve venkovním prostředí

Light Pollution – Standard – ČSN 36 0459

Vladislava Primas

EKOLA group, spol. s r.o.

Mistrovská 4, 108 00 Praha 10

e-mail: vladislava.primas@ekolagroup.cz

Abstract

Light pollution is increasingly becoming a topic of interest for both experts and the public, not only in the Czech Republic but globally. The term “light pollution” is often used interchangeably with terms such as “light smog” or “glare.” This variability in terminology also reflects the subjective perception of what individuals consider to be a nuisance.

From the perspective of environmental impacts, however, the disruptive effects of light are not limited to humans but also significantly affect flora and fauna. The entire issue requires a comprehensive approach, as all these aspects are interrelated.

In this article, I will focus on currently applicable legislation and relevant standards that address the issues of light pollution and light disturbance.

Motivy a bariéry využívání VHD v JMK

Petr David, Břetislav Andrlík, Michal Pšurný, Stanislav Mokřý

Provozně ekonomická fakulta, Mendelova univerzita v Brně

Zemědělská 1, 613 00 Brno

e-mail: petr.david@mendelu.cz

Abstrakt

Článek se zaměřuje na identifikaci motivů a bariér využívání veřejné hromadné dopravy (VHD) v podmínkách Jihomoravského kraje a na možnosti efektivní komunikace změn a benefitů veřejné dopravy vůči různým skupinám obyvatel. Výzkum kombinuje kvantitativní dotazníkové šetření realizované mezi obyvateli regionu s následně navrženým eye-trackingovým experimentem zaměřeným na testování informačních kampaní. Dotazníkové šetření analyzovalo vnímanou informovanost respondentů, preferované komunikační kanály, motivace a bariéry využívání VHD i segmentaci uživatelů podle jejich postojů a dopravního chování.

Výsledky ukazují, že klíčovým faktorem ovlivňujícím dopravní volby je časová efektivita dopravy, především rychlost dosažení cíle. Významnou roli hraje rovněž komfort cestování, dostupnost parkování, environmentální aspekty a vnímaná bezpečnost. Naopak náklady dopravy nebyly identifikovány jako rozhodující motiv u většiny respondentů. Výzkum současně potvrzuje význam digitalizace komunikace – respondenti preferují zejména mobilní aplikace, internetové vyhledávače, sociální sítě a e-mailovou komunikaci, zatímco tradiční tištěná média vykazují nízkou efektivitu.

Pomocí faktorové a shlukové analýzy byly identifikovány odlišné segmenty uživatelů, například environmentálně orientovaní respondenti, časově citliví řidiči nebo skupiny preferující individuální automobilovou dopravu z důvodu pohodlí či flexibility. Zjištění naznačují, že jednotná komunikační strategie není dostatečně efektivní a informační kampaně by měly být cíleny na specifické segmenty obyvatel s ohledem na jejich motivace, bariéry a preferované informační kanály. Výsledky výzkumu budou dále využity při realizaci eye-trackingového experimentu zaměřeného na optimalizaci vizuální a obsahové podoby komunikačních kampaní podporujících využívání veřejné dopravy.

1. Úvod

Veřejná hromadná doprava představuje významnou součást politiky udržitelné mobility. Její význam nespočívá pouze v dopravní obslužnosti území, ale také v potenciálu omezovat energetickou spotřebu, emise skleníkových plynů a další negativní externality individuální automobilové dopravy. Současně plní sociální funkci, protože zpřístupňuje zaměstnání, vzdělávání, služby a volnočasové aktivity i osobám bez automobilu. Dostupnost veřejné dopravy tak souvisí s environmentálními cíli, sociálním začleňováním i fungováním měst a regionů [4, 16, 19].

Přechod od individuální automobilové dopravy k veřejné dopravě nelze redukovat na reakci na cenu jízdného. Volba dopravního prostředku je výsledkem působení objektivních charakteristik dopravní nabídky i subjektivního hodnocení cestujících. Význam mohou mít cestovní čas, spolehlivost, počet přestupů, cena, dostupnost zastávek, komfort, bezpečnost i možnost využít čas strávený cestováním jiným způsobem. Do rozhodování zároveň vstupují sociodemografické charakteristiky,

pracovní a rodinné povinnosti, dostupnost automobilu a dlouhodobě ustálené cestovní návyky [6, 8, 10, 12].

Vedle kvality dopravní služby je důležitá také schopnost dopravních koordinátorů informovat obyvatele o jejích parametrech a přínosech. Aktuální, srozumitelné a relevantní informace mohou zmírnit informační bariéry a usnadnit vyzkoušení veřejné dopravy osobám, které ji pravidelně nevyužívají. Digitální technologie rozšiřují možnosti cílené komunikace prostřednictvím mobilních aplikací, internetových zdrojů a sociálních sítí [18, 22].

Výzkum byl uskutečněn v území obsluhovaném Integrovaným dopravním systémem Jihomoravského kraje (IDS JMK). Dotazníkové šetření bylo součástí projektu zaměřeného na návrh opatření zvyšujících atraktivitu veřejné hromadné dopravy oproti individuální automobilové dopravě. Výsledky mají sloužit také jako podklad pro přípravu informační kampaně podporující změnu dopravního chování.

Cílem článku je identifikovat vybrané motivy a bariéry související s využíváním veřejné dopravy v Jihomoravském kraji, vyhodnotit informační chování respondentů a určit komunikační kanály a formy sdělení vhodné pro komunikaci přínosů veřejné dopravy. Výzkum se soustředí na čtyři otázky: které motivy a bariéry získaly nejvyšší a nejnižší hodnocení; jak souvisí dostupnost automobilu s vlastnictvím předplatní jízdenky; zda se vnímaná informovanost liší podle vybraných charakteristik respondentů; a které informační kanály a formy sdělení respondenti preferují.

2. Přehled současného stavu a východisek

Doprava patří mezi významné zdroje emisí skleníkových plynů a lokálního znečištění ovzduší. Individuální automobilová doprava se na této zátěži podílí přímými emisemi, dopravní kongescí, prostorovými nároky a dalšími externalitami. Přesun části cest k veřejné dopravě proto může přispět ke snížení environmentální zátěže mobility, zejména pokud je doprovázen modernizací vozidel a využíváním nízkoemisních a bezemisních pohonů [2, 5, 19].

Environmentální přínos není jediným důvodem podpory veřejné dopravy. Dostupnost dopravních služeb ovlivňuje možnost obyvatel účastnit se ekonomického a společenského života. Nedostatečná dopravní dostupnost může omezovat přístup k zaměstnání, vzdělávání, zdravotní péči a dalším službám. Vnímaná dostupnost veřejné dopravy proto může být chápána také jako ukazatel sociálního začlenění [4, 8, 15].

Rozhodování mezi veřejnou a individuální automobilovou dopravou ovlivňuje soubor ekonomických i neekonomických faktorů. Mezi opakovaně uváděné determinanty patří cestovní čas, cena, spolehlivost, komfort, bezpečnost a dostupnost dopravní služby. Jejich význam se může lišit podle účelu cesty a individuální situace cestujícího [6, 7, 10].

Významnou roli má rozdíl mezi objektivní dostupností služby a její subjektivně vnímanou dostupností. I kvalitní nabídka může být hodnocena nepříznivě, pokud cestující považuje cestu za složitou, nespolehlivou nebo málo flexibilní. Subjektivní zkušenost tak může bezprostředněji ovlivňovat volbu dopravního prostředku než samotná existence spoje nebo vzdálenost zastávky [8, 15].

Cenová opatření mohou snížit finanční bariéru, zejména u cenově citlivých skupin. Jejich účinek však nemusí být dostatečný, pokud potenciální cestující považují automobil za výrazně rychlejší, pohodlnější nebo praktičtější. Finanční pobídky je proto vhodné spojovat s necenovými opatřeními zaměřenými na spolehlivost, komfort, dostupnost a jednoduchost používání systému [1, 3, 11, 17].

Environmentální postoje představují další potenciální motivaci. Samotné vědomí negativních dopadů automobilové dopravy však nemusí vést k využívání veřejné dopravy. Finanční pobídka může krátkodobě posílit záměr cestovat veřejnou dopravou, dlouhodobá změna však závisí také na dalších motivech a zkušenosti s dopravní službou [21].

Obyvatelé netvoří z hlediska dopravního chování homogenní skupinu. Věk, ekonomická aktivita, příjem, vlastnictví řidičského oprávnění, dostupnost automobilu a rodinná situace mohou ovlivňovat nejen skutečné využívání dopravních módů, ale také způsob hodnocení jejich výhod a nevýhod [9, 12, 13].

Segmentace umožňuje rozlišit skupiny s odlišnými potřebami a předpoklady ke změně dopravního chování. Jiný přístup lze očekávat u pravidelných cestujících s předplatní jízdenkou, jiný u příležitostných uživatelů a jiný u osob dlouhodobě orientovaných na automobil. Segmentace může být založena na sociodemografických znacích, současném dopravním chování, postojích nebo kombinaci těchto charakteristik [14, 20].

Digitalizace mění nejen plánování a odbavení cest, ale také komunikaci s cestujícími. Mobilní aplikace, internetové vyhledávače a sociální sítě umožňují poskytovat aktuální informace a přizpůsobovat obsah různým skupinám uživatelů. Digitální kanály mohou snižovat informační náklady, jejich účinnost však závisí na propojení vhodného kanálu s konkrétním obsahem sdělení [18, 22].

3. Materiál a metody

Primární data byla získána kvantitativním dotazníkovým šetřením v oblasti IDS JMK. Sběr dat uskutečnila agentura FOCUS od května do září 2025. Použit byl smíšený způsob sběru kombinující internetové dotazování CAWI a telefonické dotazování CATI. Celkem bylo získáno 3 086 vyplněných dotazníků.

Respondenti byli vybíráni pomocí nepropojeného kvótního výběru. Kvóty se vztahovaly k pohlaví, věkové skupině v kombinaci s ekonomickou aktivitou a místu bydliště podle poštovního směrovacího čísla. Minimální zastoupení bylo stanoveno na 40 % pro každé pohlaví, 30 % pro osoby mladší 30 let, 45 % pro střední věkovou kategorii a 15 % pro seniory. Z hlediska bydliště mělo nejméně 30 % souboru připadat na Brno a nejméně 65 % na ostatní části Jihomoravského kraje.

Výzkumný soubor zahrnoval 1 460 mužů (47,3 %) a 1 626 žen (52,7 %). Osoby mladší 30 let představovaly 32,5 % souboru, střední věková skupina 52,5 % a senioři 15,0 %. Ekonomicky aktivní osoby tvořily 60,3 %, studenti 15,6 % a ekonomicky neaktivní osoby 24,0 %. Řidičské oprávnění vlastnilo 77,8 % respondentů, automobil mělo k dispozici 72,6 % a předplatní jízdenku IDS JMK vlastnilo 34,2 % respondentů.

Pro tento článek byly využity pouze části dotazníku související s jeho cílem: postojové položky zaměřené na motivy a bariéry využívání veřejné a individuální automobilové dopravy; údaje o dostupnosti automobilu a vlastnictví předplatní jízdenky; hodnocení vlastní informovanosti; preference komunikačních kanálů; frekvence obecného využívání informačních zdrojů; a preference způsobu prezentace výhod a změn ve veřejné dopravě. Experimenty diskrétní volby, modelování cenové citlivosti a dopravní modelování nebyly zahrnuty.

Motivy a bariéry byly zjišťovány prostřednictvím 35 postojových výroků hodnocených na pětibodové Likertově škále. Pro prezentaci výsledků byly hodnoty orientovány tak, aby vyšší průměr vyjadřoval vyšší míru souhlasu. Využívání informačních zdrojů bylo hodnoceno na pětibodové frekvenční škále od hodnoty 1 „nikdy“ po hodnotu 5 „denně“. U otázek zaměřených na preferované kanály a formy komunikace mohli respondenti vybírat více možností.

Preference komunikačních kanálů a forem komunikace byly vyhodnoceny pomocí absolutních a relativních četností. Vztahy mezi kategoriálními proměnnými byly testovány Pearsonovým testem nezávislosti χ^2 . Původní čtyřstupňová škála informovanosti byla pro testování převedena do dvou kategorií: dostatečně informovaní a nedostatečně informovaní. Vedle statistické významnosti byla sledována také síla zjištěných vztahů. Ta byla vyhodnocena pomocí koeficientu ϕ a prostřednictvím Cramérova V.

4. Hlavní výsledky

4.1 Dostupnost automobilu a předplatní jízdenka

Většina respondentů s řidičským oprávněním měla současně k dispozici automobil. Z 2 400 držitelů řidičského oprávnění uvedlo 2 069 dostupnost automobilu, zatímco 331 automobil k dispozici nemělo. Mezi 686 respondenty bez řidičského oprávnění mělo automobil k dispozici 171 osob. Vztah mezi vlastnictvím řidičského oprávnění a dostupností automobilu byl statisticky významný ($\chi^2 = 1\,006,857$; $df = 1$; $p < 0,001$; $\phi = 0,571$).

Statisticky významný byl také vztah mezi dostupností automobilu a vlastnictvím předplatní jízdenky ($\chi^2 = 136,791$; $df = 1$; $p < 0,001$; $\phi = -0,211$). Z 2 240 respondentů s dostupným automobilem vlastnilo předplatní jízdenku 629 osob, zatímco 1 611 ji nevlastnilo. Současná dostupnost automobilu a vlastnictví předplatní jízdenky u 629 respondentů ukazuje, že oba dopravní módy nemusí být v praxi zcela oddělené.

4.2 Hlavní motivy a bariéry

Nejvyšší celkové hodnocení získal výrok, podle něhož je při výběru dopravního prostředku nejdůležitější rychlost dosažení cíle (průměr 3,60). Následovaly praktické důvody používání automobilu: nákupy do domácnosti (3,59) a volnočasové aktivity (3,53). Vyšší míru souhlasu získalo také povědomí, že používání automobilu zhoršuje kvalitu životního prostředí (3,50).

Mezi nejnižše hodnocené položky patřily vzdálenost zastávky od bydliště nebo zaměstnání (2,22), používání automobilu k přepravě dětí (2,25), obavy z verbálního nebo fyzického napadení ve veřejné dopravě (2,30), obavy z přenosu nemocí (2,33) a nepřesnost provozu podle jízdního řádu (2,33). Za méně významné byly označeny také nákladné parkování v dosahu veřejné dopravy (2,43), riziko dopravní nehody (2,44) a omezená dostupnost parkování (2,45).

Celkové průměry je nutné interpretovat s ohledem na složení souboru. Například význam automobilu pro přepravu dětí se netýká respondentů bez dětí. Agregovaný průměr proto nemusí vystihnout význam daného faktoru v relevantní dílčí skupině.

4.3 Komunikační preference a vnímaná informovanost

Respondenti při informování o významnějších změnách cen veřejné dopravy obecně preferovali digitální kanály před tradičními formami komunikace. Digitální média byla také využívána častěji než tištěné letáky, plakáty a billboardy. Denní využívání internetových vyhledávačů uvedlo 2 014 respondentů, mobilní aplikace denně používalo 1 386 respondentů a sociální sítě 1 079 respondentů.

Při prezentaci výhod nebo změn ve veřejné dopravě respondenti upřednostňovali konkrétní a prakticky využitelné informace, zejména přesné údaje o cenách a konkrétní příklady přínosů. Menší preferenci získaly odborné články a příběhy

osob, které začaly využívat veřejnou dopravu. Výsledky proto podporují používání stručných, jasně strukturovaných a fakticky konkrétních sdělení.

Za nedostatečně informované se považovalo 1 578 respondentů, zatímco 1 508 hodnotilo svou informovanost jako dostatečnou. Nebyla prokázána souvislost mezi informovaností a ekonomickou aktivitou ($\chi^2 = 0,517$; $df = 2$; $p = 0,772$; $V = 0,013$) ani věkovou skupinou ($\chi^2 = 5,419$; $df = 2$; $p = 0,067$; $V = 0,041$). Statisticky významné, avšak slabé vztahy byly zjištěny u vlastnictví řidičského oprávnění ($\chi^2 = 8,560$; $p = 0,003$; $\phi = 0,053$), dostupnosti automobilu ($\chi^2 = 18,028$; $p < 0,001$; $\phi = 0,076$) a vlastnictví předplatní jízdenky ($\chi^2 = 49,804$; $p < 0,001$; $\phi = -0,127$).

Mezi respondenty bez předplatní jízdenky se za nedostatečně informované považovalo 1 131 osob a za dostatečně informované 899 osob. U držitelů předplatní jízdenky byl poměr opačný: 447 osob se považovalo za nedostatečně informované a 609 za dostatečně informované. Ze skupiny s dostupným automobilem hodnotilo svou informovanost jako nedostatečnou 1 198 respondentů.

5. Diskuse

Výsledky potvrzují, že dopravní chování nelze vysvětlit jediným faktorem. Nejvyšší hodnocení rychlosti dosažení cíle odpovídá poznatkům, podle nichž patří cestovní čas mezi základní determinanty volby dopravního prostředku [6, 7, 10]. V podmínkách IDS JMK se však význam automobilu neomezuje na rychlost. Vysoké hodnocení jeho využití pro nákupy a volnočasové aktivity ukazuje také na univerzálnost a schopnost propojit různé účely cest.

Kampaň založená pouze na tvrzení, že veřejná doprava je levnější nebo ekologičtější, proto nemusí reagovat na hlavní důvody používání automobilu. Veřejná doprava musí být prezentována jako použitelná alternativa pro konkrétní cesty. Komunikace by měla pracovat s přesnými informacemi o cestovním čase, přestupech, návaznosti spojů, dostupnosti cíle a celkových nákladech. Takové zaměření odpovídá literatuře zdůrazňující společné působení časových, cenových, komfortních a provozních charakteristik služby [8, 11, 15].

Relativně vysoké environmentální povědomí nevylučuje převahu praktických motivů. Respondenti mohou uznávat negativní dopady automobilové dopravy a současně považovat automobil za nejrychlejší nebo nejpraktičtější variantu. Zjištění je v souladu se závěrem, že environmentální postoje a skutečný záměr změnit dopravní chování nejsou totožné a že účinek pobídek závisí na širším motivačním kontextu [21].

Vztah mezi dostupností automobilu a vlastnictvím předplatní jízdenky byl významný, ale oba způsoby dopravy nelze chápat jako striktně oddělené. Skutečnost, že 629 respondentů mělo automobil i předplatní jízdenku, ukazuje prostor pro kombinování dopravních módů. Pro segmentaci je proto vhodnější využívat skutečné chování, účel cest a postoje než pouze vlastnictví automobilu [14, 20].

Držitelé předplatní jízdenky se častěji považovali za informované, směr kauzality však z průřezových dat nelze určit. Osoby bez předplatní jízdenky, které mají k dispozici osobní automobil a současně pociťují informační deficit, představují důležitou cílovou skupinu. Preference digitálních zdrojů je v souladu s rostoucím významem digitálních technologií ve veřejné dopravě [18, 22]. Samotná přítomnost kampaně v digitálním prostředí však nestačí. Výsledky vyžadují spojení vhodného kanálu se stručným, konkrétním a prakticky využitelným obsahem.

Studie vychází ze sebehodnocení a může být ovlivněna sociální žádoucností nebo rozdílem mezi deklarovanými postoji a skutečným chováním. Celkové průměry

mohou zakrývat rozdíly mezi dílčími skupinami. Průřezový charakter dat neumožňuje určit kauzální vztahy mezi informovaností, vlastnictvím předplatní jízdenky a využíváním veřejné dopravy. Preference komunikačního kanálu navíc samy o sobě neprokazují skutečný účinek konkrétního sdělení na změnu chování.

6. Závěr

Cílem článku bylo identifikovat vybrané motivy a bariéry využívání veřejné dopravy v Jihomoravském kraji a posoudit informační a komunikační preference obyvatel. Klíčovým kritériem volby dopravního prostředku je rychlost dosažení cíle. Tento výsledek odpovídá závěrům studií [6, 7, 10], které řadí cestovní čas mezi základní determinanty dopravní volby.

Význam automobilu pro nákupy a volnočasové aktivity ukazuje, že automobil je vnímán jako univerzální prostředek umožňující spojování různých účelů cest. Výsledky proto podporují širší pojetí vnímané dostupnosti veřejné dopravy, které nehodnotí pouze existenci spojení, ale také jeho praktickou použitelnost v každodenním životě [8, 15].

Respondenti si uvědomují negativní environmentální dopady automobilové dopravy, toto povědomí však existuje současně se silnou preferencí praktických výhod automobilu. Výsledek je v souladu se studií [21], podle níž je nutné rozlišovat mezi obecnými postoji, motivy a skutečným záměrem změnit způsob cestování. Environmentální argument proto nemá být používán izolovaně, ale ve spojení s konkrétním časovým, finančním nebo uživatelským přínosem veřejné dopravy.

Významným zjištěním je početná skupina respondentů, kteří mají k dispozici automobil, ale nevlastní předplatní jízdenku. Současná existence osob s automobilem i předplatní jízdenkou zároveň potvrzuje, že používání automobilu a veřejné dopravy nelze chápat jako neslučitelné volby. To podporuje segmentační přístupy [14, 20], podle nichž má být dopravní politika přizpůsobena rozdílným potřebám a návykům skupin uživatelů.

Digitální informační kanály mají při komunikaci veřejné dopravy největší potenciál, což odpovídá poznatkům studií [18, 22]. Respondenti současně upřednostňují stručné a konkrétní informace před odbornými texty a příběhovými sděleními. Účinná kampaň by proto měla kombinovat digitální distribuci s jasnými údaji o ceně, času, dostupnosti a praktických přínosech konkrétní cesty.

Za prioritní cílovou skupinu lze považovat obyvatele s dostupným automobilem, bez předplatní jízdenky a se subjektivně nedostatečnou informovaností. Oslovení této skupiny by nemělo být založeno pouze na obecném apelu k udržitelnosti. Vhodnější je nabídnout snadno ověřitelné informace, které snižují nejistotu spojenou s vyzkoušením veřejné dopravy a reagují na časové, finanční a praktické aspekty konkrétních cest.

Celkově výsledky potvrzují, že trvalejší změna dopravního chování vyžaduje kombinaci kvalitní dopravní nabídky, vhodně zvolených pobídek a cílené komunikace. Cenová opatření popisovaná ve studiích [3, 17] mohou oslabit finanční bariéru, zatímco zlepšování spolehlivosti a komfortu zdůrazňované ve studii [11] může reagovat na necenové požadavky cestujících. Komunikace musí tyto přínosy převést do konkrétního a srozumitelného sdělení určeného jasně vymezenému segmentu obyvatel.

Literatura

- [1] BARROS, V. et al. 2021. Is taxation being effectively used to promote public transport in Europe? *Transport Policy*.
- [2] CARROLL, P., CAULFIELD, B., AHERN, A. 2019. Measuring the potential emission reductions from a shift towards public transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 338-351.
- [3] CONCAS, S., WINTERS, P. L., WAMBALABA, F. 2005. Fare pricing elasticity, subsidies, and demand for vanpool services. *Transportation Research Record*, 1924, 215-223.
- [4] CURRIE, G., STANLEY, J. 2008. Investigating links between social capital and public transport. *Transport Reviews*, 28, 529-547.
- [5] FIORITO, G. 2017. Carbon taxes to reduce CO₂ emissions from road transport in Italy: Estimating and simulating province-level fuel demand. *International Journal of Transport Economics*, 44(1), 137-152.
- [6] FLODÉN, J., BÄRTHÉL, F., SORKINA, E. 2010. Factors influencing transport buyer's choice of transport service: A European literature review.
- [7] KELELA, S., EMAGNU, Y. M., BERTA, K. K. 2025. Assessing the determinant factors influencing transport mode choice: A case of Debre Berhan City. *Journal of Advanced Transportation*.
- [8] LÄTTMAN, K., FRIMAN, M., OLSSON, L. E. 2016. Perceived accessibility of public transport as a potential indicator of social inclusion. *Social Inclusion*, 4, 36-45.
- [9] MACIOSZEK, E. et al. 2024. Application of a logit model to identify sociodemographic factors influencing the choice of public transport for daily trips: A case study based on the example of the Górnośląska-Zagłębiowska Metropolis. *Transport Problems*, 19(3), 183-192.
- [10] MAYO, F. L., TABOADA, E. B. 2020. Ranking factors affecting public transport mode choice of commuters in an urban city of a developing country using analytic hierarchy process: The case of Metro Cebu, Philippines.
- [11] MUÑOZ, J. C., SOZA-PARRA, J., RAVEAU, S. 2020. A comprehensive perspective of unreliable public transport services' costs. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(3), 734-748.
- [12] MWALE, M., LUKE, R., PISA, N. 2022. Factors that affect travel behaviour in developing cities: A methodological review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 16.
- [13] NGAH, R. et al. 2021. The influence of socio-economics on travel behavior of public transportation in Malaysia. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 6(17), 269-275.
- [14] NICOLAIDIS, G. C., WACHS, M., GOLOB, T. F. 1976. Evaluation of alternative market segmentations for transportation planning. *Transportation Research Record*.
- [15] OLSSON, L. E., FRIMAN, M., LÄTTMAN, K. 2021. Accessibility barriers and perceived accessibility: Implications for public transport. *Urban Science*, 5(63).
- [16] SAIFF, M. A., ZEFREH, M. M., TOROK, A. 2019. Public transport accessibility: A literature review. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(1), 36-43.
- [17] SAPHORES, J.-D. M., SHAH, D. N., KHATUN, F. 2020. A Review of Reduced and Free Transit Fare Programs in California. *University of California Institute of Transportation Studies*.
- [18] TÓTH, S., BITTNER, B., KOVÁCS, T. Z., NAGY, A. S. 2022. Digital transformation possibilities in public transportation in Debrecen. *Issues in Information Systems*, 22(3), 305-319.

- [19] VAN ESSEN, H. et al. 2019. Handbook on the External Costs of Transport. Version 2019-1.1. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [20] VAN LIEROP, D., EL-GENEIDY, A. 2017. A new market segmentation approach: Evidence from two Canadian cities. *Journal of Public Transportation*, 20(1), 20-43.
- [21] ZEISKE, N., VAN DER WERFF, E., STEG, L. 2021. The effects of a financial incentive on motives and intentions to commute to work with public transport in the short and long term. *Journal of Environmental Psychology*, 78.
- [22] ZHANG, X. et al. 2016. Incentives for mobile crowd sensing: A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18, 54-67.

Drivers and Barriers of Public Transport Use among Residents of the South Moravian Region

Petr David, Břetislav Andrlík, Michal Pšurný, Stanislav Mokřý

Faculty of Business and Economics, Mendel University in Brno

Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic

e-mail: petr.david@mendelu.cz

Abstract

This paper focuses on identifying the drivers and barriers of public transport use in the South Moravian Region and on exploring opportunities for effective communication of public transport changes and benefits to different population groups. The research combines a quantitative survey conducted among regional residents with a subsequently designed eye-tracking experiment aimed at testing communication campaigns. The survey examined respondents' perceived level of information, preferred communication channels, motivations and barriers related to public transport use, as well as user segmentation based on attitudes and travel behaviour.

The results indicate that the key factor influencing transport mode choice is travel time efficiency, particularly the speed of reaching the destination. Other important factors include travel comfort, parking availability, environmental considerations, and perceived safety. In contrast, transport costs were not identified as a primary determinant for the majority of respondents. The study also confirms the growing importance of digital communication, with respondents showing a clear preference for mobile applications, internet search engines, social media, and e-mail communication, while traditional printed media were perceived as relatively ineffective.

Using factor and cluster analysis, several distinct user segments were identified, including environmentally oriented respondents, time-sensitive drivers, and groups preferring private car use because of convenience or flexibility. The findings suggest that a uniform communication strategy is unlikely to be effective and that communication campaigns should be tailored to specific population segments according to their motivations, barriers, and preferred information channels. The research outcomes will be further utilised in an eye-tracking experiment designed to optimise the visual and content-related characteristics of communication campaigns promoting public transport use.

Tramvajová kolejiště v České republice: od biodiverzity k enviromentálním rizikům

Eva Navrátilová

Mendelova univerzita, ústav biologie rostlin

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

e-mail: xnavra15@mendelu.cz

Abstrakt

Na první pohled jsou tramvajová kolejiště především součástí městské dopravní infrastruktury. Jejich prostředí je však charakteristické kombinací pravidelného narušování, specifických mikroklimatických podmínek, technického provedení a vlivů spojených s tramvajovým provozem, které vytvářejí podmínky pro výskyt rozmanitých společenstev organismů. Přesto zůstává ekologický význam těchto stanovišť dosud relativně málo prozkoumán. Příspěvek představuje probíhající doktorský výzkum zaměřený na komplexní ekologii tramvajových kolejišť v České republice. Výzkum je rozdělen do tří vzájemně propojených částí. První část se zabývá celorepublikovým průzkumem flóry tramvajových kolejišť, v jehož rámci bylo sledováno 384 tramvajových zastávek a zaznamenáno 265 taxonů cévnatých rostlin. Druhá část se zaměřuje na roční dynamiku společenstev a sleduje změny vegetace cévnatých rostlin, mechorostů a výskytu bezobratlých živočichů v průběhu vegetační sezóny. Třetí část se věnuje akumulaci vybraných těžkých kovů v prostředí tramvajových kolejišť a jejich možnému přenosu do biologické složky ekosystému. Příspěvek má sloužit jako stručné představení tohoto komplexního výzkumu a současně prezentovat vybrané dosavadní výsledky jednotlivých částí. Přestože jde o výrazně antropogenně ovlivněná stanoviště, dosavadní výsledky naznačují jejich významný potenciál z hlediska městské biodiverzity. Výzkum zároveň ukazuje potřebu vnímat tramvajová kolejiště nejen jako součást dopravní infrastruktury, ale také jako specifická stanoviště s vlastní ekologickou funkcí, dynamikou a potenciálními environmentálními dopady.

1. Tramvajová kolejiště jako přehlížený městský ekosystém

Tramvajová kolejiště mohou působit jako čistě technický prvek dopravní infrastruktury, jehož hlavním účelem je zajištění provozu tramvajové dopravy. Ve skutečnosti však kolejiště vytvářejí komplexní antropogenní ekosystémy, ve kterých se propojuje intenzivní působení člověka s přirozenými ekologickými procesy. Přesto existuje velmi málo publikací o provázanosti tramvajů s biodiverzitou. Do roku 2022 jich nebylo ani deset [1], [2].

Přestože jsou kolejiště pravidelně narušována a jejich prostředí je výrazně ovlivněno lidskou činností, některé druhy zde mohou vytvářet stabilní populace (viz obr. 1-3). Výzkumy přímo na tramvajových tratích například prokázaly vysokou druhovou bohatost cévnatých rostlin a využívání tramvajové infrastruktury různými druhy ptáků [4], [5]. Kolejiště navíc nepředstavují jednotné prostředí, ale mozaiku různých typů povrchů a mikrostanovišť, které se liší svými fyzikálními vlastnostmi a dalšími ekologickými podmínkami. Rozdíly v půdních charakteristikách byly přímo spojeny s rozdíly ve floristickém složení tramvajových tratí [2].

Zajímavé proto není pouze to, které organismy se v tomto prostředí vyskytují, ale také jak se jejich výskyt a společenstva liší v závislosti na charakteru jednotlivých částí kolejiště a jejich okolí a jak jsou ovlivňovány specifickými podmínkami spojenými s tramvajovou infrastrukturou. Prostorová heterogenita a fragmentace vegetace

v tramvajových tratích mohou ovlivňovat druhové složení a biodiverzitu městské vegetace. Tramvajová kolejiště tak představují dynamické prvky městské krajiny, jejichž ekologický význam může přesahovat jejich primární dopravní funkci a které mohou přispívat k celkové biodiverzitě městského prostředí [1], [6].

Obr. 1. Točna Královo pole nádraží s dominantou čekanky, Obr. 2. Kolejový žlábek se zástupci bezobratlých živočichů, Obr. 3. Vegetace mezi kostkami



Autorka fotografií: Eva Navrátilová

Tento příspěvek slouží k představení probíhajícího doktorského výzkumu zaměřeného na ekologii tramvajových kolejišť v České republice. Výzkum je v současnosti rozdělen do tří vzájemně propojených částí. První část se zaměřuje na *flóru tramvajových kolejišť* a na charakteristiku jejich druhového složení v různých městech a podmínkách. Druhá část sleduje *dynamiku těchto stanovišť* v čase, a to prostřednictvím dlouhodobějšího sledování změn vegetace a současně výskytu fauny. Třetí část se zabývá *úniky a akumulací těžkých kovů* v prostředí tramvajových točen a jejich možným přenosem do organismů. Jednotlivé části tak umožňují nahlížet na kolejiště z různých ekologických perspektiv – od samotné biodiverzity přes její časovou dynamiku až po vliv potenciálního znečištění.

2. Floristický výzkum tramvajových kolejišť v České republice

2.1. Představení výzkumu

Jednou z hlavních částí doktorského výzkumu je celorepublikový průzkum flóry tramvajových kolejišť. Hlavním cílem je dosáhnout komplexního porozumění výskytu druhů a jejich vlastnostem v tramvajových kolejištích.

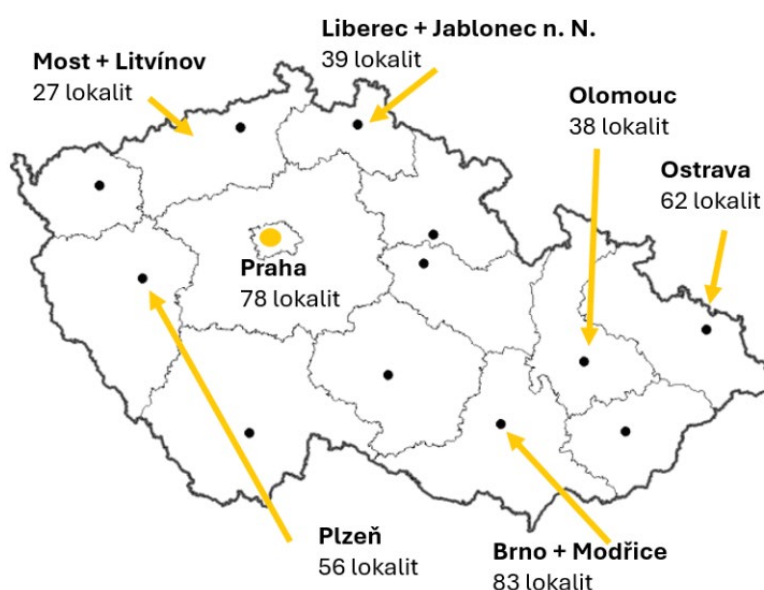
Díličmi cíli a hypotézami pak jsou:

1. Zhodnotit rozdíly ve druhovém složení a druhové bohatosti mezi jednotlivými městy a různými typy povrchů. Předpokládáme, že nezpevněné substráty, jako je písek nebo štěrk, poskytují více prostoru pro kolonizaci rostlin než asfalt nebo beton. Dále se zaměříme na rozdíly v druhové bohatosti související s urbanistickým kontextem, kterým tramvajové tratě procházejí (centrum města

- vs. periferie, tramvajové smyčky vs. standardní zastávky a doba uplynulá od poslední obnovy tramvajového svršku).
2. Vyhodnotit, zda tramvajové sítě fungují jako migrační koridory pro rostlinné druhy.
 3. Na základě získaných výsledků navrhnout druhy s potenciální vhodností pro založení vegetace prostřednictvím opatření zaměřených na ozelenění.

Výzkum zahrnuje tramvajová kolejiště ve všech českých městech s tramvajovou dopravou. Celkem bylo sledováno 384 tramvajových zastávek (viz obr. 4), přičemž pozornost byla věnována vegetaci přímo v prostoru kolejiště; různým typům povrchů, které zde vytvářejí odlišné podmínky pro uchycení a přežívání rostlin. Výsledky ukazují, že i přes výrazný antropogenní tlak se jedná o stanoviště schopná podporovat poměrně pestrá rostlinná společenstva.

Obr. 4. Mapa se sledovanými městy s počty zastávek



Autorka obrázku: Eva Navrátilová

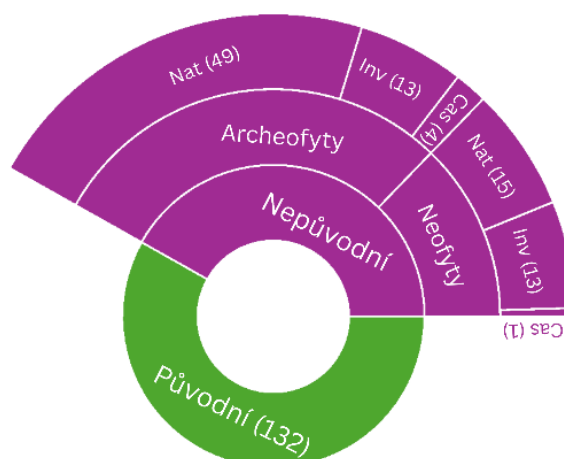
2.2. Hlavní výsledky

V rámci průzkumu bylo zaznamenáno celkem 265 taxonů cévnatých rostlin (230 určených do druhu, 10 nejčastějších v tab. 1). Zjištěné druhové složení odráží specifický charakter tramvajových kolejišť jako silně disturbovaných městských stanovišť. Významnou část tvoří druhy typické pro ruderalní a antropogenní prostředí, zároveň se zde však objevují i druhy, jejichž výskyt může být v tomto typu stanoviště méně očekávaný. Zajímavým aspektem je také vysoké zastoupení nepůvodních druhů. Z celkového počtu zaznamenaných taxonů bylo 98 nepůvodních, přičemž se mezi nimi nacházely archeofyty i neofyty s různým stupněm naturalizace a invazního statusu (viz obr. 5). Tramvajová infrastruktura tak může představovat nejen prostředí pro běžnou městskou ruderalní vegetaci, ale zároveň potenciální prostor pro šíření a udržování nepůvodních druhů.

Tab. 1. Deset nejčastějších druhů

Taxon	Počet výskytů (zastávek)
<i>Polygonum aviculare</i> agg.	140
<i>Taraxacum</i> sect. <i>Taraxacum</i>	130
<i>Plantago lanceolata</i>	79
<i>Poa annua</i>	77
<i>Plantago major</i>	73
<i>Conyza canadensis</i>	72
<i>Senecio vulgaris</i>	68
<i>Sonchus oleraceus</i>	68
<i>Medicago lupulina</i>	61
<i>Erigeron annuus</i>	59

Obr. 5. Podíl původních a nepůvodních druhů



Zdroj tabulky a grafu: vlastní výzkum (Eva Navrátilová)

2.3. Ekologické charakteristiky druhů a rozdíly mezi městy a povrchy

Nejčastěji zastoupenými životními formami byly terofyty a hemikryptofyty, což odpovídá dynamickému prostředí s opakovaným narušováním vegetace [7], [8]. Z hlediska CSR strategií převládaly ruderální a kombinované ruderálně orientované strategie. Druhy sem spadající mají vlastnosti vhodné pro kolonizaci antropogenně degradovaných stanovišť [9]. Většina zaznamenaných druhů zároveň vykazovala nízké hodnoty salinity, zatímco index disturbance poukazoval na významný vliv pravidelného narušování stanoviště. Výsledky tak podporují předpoklad, že druhové složení tramvajových kolejišť je do značné míry výsledkem selekce druhů schopných tolerovat kombinaci mechanického narušování, městského prostředí a specifických mikroklimatických podmínek [2], [7].

Výrazné rozdíly byly zjištěny mezi jednotlivými městy a typy povrchů kolejišť. Statistické analýzy prokázaly významné rozdíly v druhové bohatosti mezi městy, přičemž Liberec vykazoval výrazně nižší druhovou bohatost než ostatní sledovaná města. Ještě výraznější rozdíly souvisely s charakterem povrchu kolejišť. Nejnížší počet druhů byl zaznamenan na asfaltových površích, zatímco šterkové povrchy poskytovaly podstatně vhodnější podmínky pro uchycení rostlin. To ukazuje, že samotné technické řešení tramvajové trati může významně ovlivňovat její ekologický potenciál [4].

2.4. Využitelnost pro ozelenování kolejišť

Výsledky ukazují, že pro ozelenění tramvajových tratí jsou nejvhodnější druhy schopné tolerovat sucho, nízkou dostupnost živin a opakované mechanické narušování [10]. Často se vyskytující taxony, jako *Polygonum aviculare* agg., *Taraxacum* sect. *Taraxacum*, *Poa annua*, *Plantago lanceolata* nebo pak *Portulaca oleracea*, vykazují vysokou ekologickou plasticitu a schopnost spontánně kolonizovat tramvajová kolejiště, jejich využití v cílených výsadbách je však omezeno jejich ruderálním charakterem a v některých případech invazním statusem [4], [9]. Vhodnějšími kandidáty jsou druhy asociované zejména se šterkovými a již vegetací pokrytými povrchy, které jsou schopné prosperovat v suchých, propustných a méně intenzivně narušovaných podmínkách a mohou přispívat k vytvoření stabilnějšího vegetačního pokryvu. Při výběru druhů je vhodné upřednostňovat původní nebo neinvazní druhy s podobnými ekologickými strategiemi, zejména terofyty a hemikryptofyty s ruderálními či přechodnými CSR strategiemi [4], [8]. Na základě

získaných dat tak lze v budoucnu vytipovat a ověřit druhy vhodné pro cílené zakládání zelených vegetačních pásů na tramvajových tratích, a to s ohledem na jejich schopnost přirozené regenerace, odolnost vůči podmínkám tramvajových kolejí a potenciál podporovat městskou biodiverzitu a opylovače.

Obr. 6. Ukázka rostlinné diverzity v kolejišti (A. juvenilní ostropestřec mariánský, B. diverzita v železobetonovém podloží, C. jitrocel vraní nožka – v současnosti šířící se slanomilný druh, D. juvenilní rostlina javoru)



Autorka fotografií: Eva Navrátilová

2.5. Závěr

Celorepublikový průzkum ukazuje, že tramvajová kolejiště nejsou z hlediska biodiverzity pouze homogenními a silně degradovanými plochami, ale představují pestré mozaiku stanovišť s rozdílnými podmínkami a značným potenciálem pro výskyt rostlin. Zjištěná druhová rozmanitost zároveň otevírá otázku, jakou úlohu mohou tramvajová kolejiště plnit v rámci městské zelené infrastruktury a jak lze jejich ekologickou funkci podporovat prostřednictvím vhodného způsobu konstrukce a údržby. Výzkum flóry je již prakticky dokončen a v současnosti probíhá finalizace vědecké publikace shrnující jeho výsledky.

3. Roční dynamika vegetace a bezobratlých na tramvajových kolejištích města Prahy

3.1. Představení výzkumu

Další část výzkumu se zaměřuje na roční dynamiku společenstev tramvajových kolejišť a sleduje, jak se v průběhu vegetační sezóny mění jejich biologické složení. Na rozdíl od celorepublikového floristického průzkumu, který poskytuje především prostorový pohled na druhovou rozmanitost, tato část výzkumu umožňuje zachytit časovou proměnlivost tohoto specifického městského ekosystému. Sledována není pouze vegetace cévnatých rostlin, ale také mechorosty a bezobratlí živočichové, kteří

společně vytvářejí komplexní společenstvo reagující na sezónní změny podmínek i na pravidelnou údržbu tramvajových tratí.

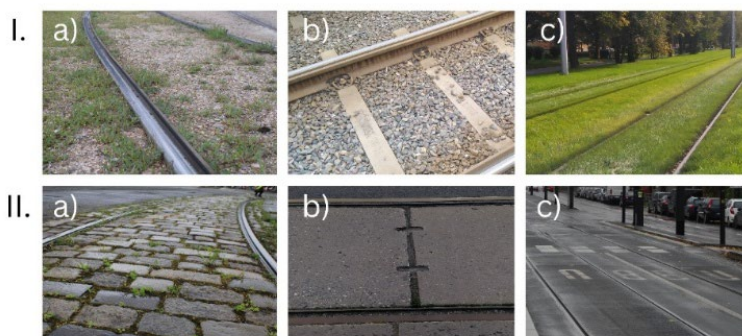
Dílčí cíle a hypotézy:

1. Zhodnotit strukturu společenstev cévnatých rostlin, mechorostů a bezobratlých v prostoru a čase.
2. U rostlin i bezobratlých se očekává, že zastoupení druhů bude během sukcese narůstat v závislosti na době, která uplynula od poslední rekonstrukce tramvajové trati a jejího okolí.
3. Na základě biologie rostlin a mechanismů jejich šíření se očekává, že volné (nezpevněné) povrchy budou podporovat vyšší počet taxonů a větší pokryvnost cévnatých rostlin než mechorostů, zatímco na hladkých površích s prasklinami budou ve srovnání s cévnatými rostlinami výrazněji zastoupeny mechorosty.
4. Očekává se, že tramvajová kolejiště budou hostit taxony z různých skupin bezobratlých (např. koryši, pavouci, mravenci, blanokřídlí, brouci, mšice a ploštice), přičemž budou zastoupeny zejména běžné synantropní druhy a generalističtí škůdci.

3.2. Vybrané dosavadní výsledky

Výzkum probíhal na vybraných 30 tramvajových zastávkách v Praze, kde byla společenstva sledována opakovaně v průběhu sezóny. Jednalo se o 15 zastávek se sypkými povrchy a 15 s pevnými povrchy (viz obr. 7). V rámci dosavadního průzkumu bylo zaznamenáno více než 80 taxonů cévnatých rostlin, 20 druhů mechorostů (viz obr. 8) a více než 50 taxonů bezobratlých. Z mechorostů byl nejčastěji zaznamenáván *Ceratodon purpureus*, mezi nejčastější živočichy patřily svinka obecná (*Armadillidium vulgare*) a oblanka sídelní (*Cylindroiulus caeruleocinctus*). Mezi zajímavé nálezy patřila například skákavka stužkovitá *Phlegra fasciata* využívající kolejový žlábek při lovu hmyzu, roháček kozlík (*Dorcus parallelipedus*) (viz obr. 9 a 10), mandelinka bramborová (*Leptinotarsa decemlineata*) či samotářské včely. Mimo vlastní dataset byla zaznamenána také přítomnost obratlovců, například veverky obecné (*Sciurus vulgaris*) a kosa černého (*Turdus merula*). Využívání tramvajových kolejišť ptáky bylo popsáno také v odborné literatuře; v Poznani bylo na tramvajových tratích zaznamenáno 11 druhů ptáků, kteří infrastrukturu využívali především k získávání potravy [5]. Výsledky tak opět ukazují, že i velmi silně antropogenně ovlivněné prostředí může poskytovat vhodné podmínky pro překvapivě rozmanitá společenstva.

Obr. 7. Sledované povrchy (I. sypké: a) písek, b) štěrk, c) vegetační pás; II. pevné: a) kostky, b) železobeton, c) asfalt)



Autorka obrázku: Eva Navrátilová

Obr. 8. Seznam nalezených mechorostů (vlevo), Obr. 9. a 10. Zajímavé nálezy (roháček kozlík – nahoře; skákavka stužkovitá při lovu – dole)

<i>Amblystegium serpens</i>
<i>Barbula convoluta</i>
<i>Barbula unguiculata</i>
<i>Brachythecium albicans</i>
<i>Brachythecium rutabulum</i>
<i>Bryum argenteum</i>
<i>Bryum caespitium</i>
<i>Bryum capillare</i>
<i>Bryum dichotomum</i>
<i>Bryum rubens</i>
<i>Calliergonella cuspidata</i>
<i>Ceratodon purpureus</i>
<i>Drepanocladus aduncus</i>
<i>Eurhynchium hians</i>
<i>Funaria hygrometrica</i>
<i>Hypnum cupressiforme</i>
<i>Pohlia nutans</i>
<i>Rhytidiadelphus squarrosus</i>
<i>Schistidium dupretii</i>
<i>Syntrichia ruralis</i>



Autorka obrázku a fotografií: Eva Navrátilová

3.3. Závěr

Opakované sledování umožňuje zachytit rozdíly mezi jednotlivými obdobími roku a sledovat, jak se mění zastoupení jednotlivých skupin organismů v závislosti na sezóně, charakteru stanoviště a způsobu jeho údržby. Tato část výzkumu tak doplňuje floristický průzkum o dynamický pohled na fungování tramvajového kolejiště jako ekosystému, v němž se jednotlivé skupiny organismů vzájemně prolínají a reagují na proměnlivé podmínky městského prostředí. V rámci této části jsou získaná data stále vyhodnocována a detailní výsledky budou předmětem připravovaných odborných publikací.

4. Těžké kovy v prostředí tramvajových kolejišť

Třetí část doktorského výzkumu se zaměřuje na další dosud jen omezeně prozkoumaný aspekt tramvajových kolejišť – akumulaci těžkých kovů a jejich možný přenos mezi jednotlivými složkami tohoto antropogenního ekosystému. Tramvajová infrastruktura představuje specifické prostředí, kde mohou unikat a následně se kumulovat částice pocházející z provozu a údržby tratí. Zdrojem potenciální kontaminace mohou být například otěry kolejnic, kovových součástí tramvajové

infrastruktury nebo dalších materiálů spojených s dopravním provozem [11], [12]. Významnou roli přitom může hrát také okolní městské prostředí a další zdroje znečištění. Těžké kovy se následně mohou dostávat do půdy, sedimentu a organického materiálu a být zachycovány organismy, které v kolejištích žijí [2], [13], [14].

Dílčí cíle výzkumu:

1. Změřit obsah vybraných těžkých kovů v odumřelé rostlinné hmotě a vybraných organismech (mechorosty, terestriční korýši).
2. Zjistit dopad proměnných na organismy vyskytující se v tramvajových kolejištích.
3. Porovnat koncentraci těžkých kovů v tramvajovém kolejišti a v okolním městském prostředí, pak mezi sledovanými městy a mezi odebíranými vzorky.

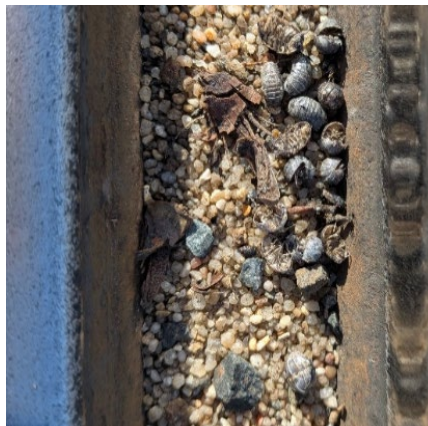
Výzkum je zaměřen na měď, zinek, kadmium, olovo a nikl. Jako jedny z hlavních bioindikačních materiálů pro jejich detekci jsou využívány mechy (hlavně *Ceratodon purpureus*, který se v prostředí kolejiště vyskytoval nejčastěji). Schopnost mechu akumulovat potenciálně toxické prvky a reagovat na jejich atmosférickou depozici je dobře dokumentována i v dalších městských a dopravně zatížených prostředích [11], [12].

Vedle mechu je sledován také detrit a živočišná složka, konkrétně terestrický korýš svinka obecná (*Armadillidium vulgare*). Toto propojení umožňuje posunout výzkum od pouhého stanovení koncentrací kovů v prostředí k otázce jejich bioakumulace a možného přenosu do vyšších trofických úrovní. Jako lokality byly vybrány 3 česká města, tedy Praha, Brno a Ostrava. V nich pak 5 tramvajových točen a pět analogických městských stanovišť.

Tab. 2. Zastávky vybrané pro odběry

Zastávka/Město	Praha	Brno	Ostrava
1.	Výstaviště	Čertova rokle	Hlavní nádraží
2.	Dlabačov	Královo pole nádraží	Martinov
3.	Nádraží Braník	Vozovna Medlánky	Budišovice, zátiší
4.	Sídlíště Ďáblice	Modřice smyčka	Poruba, Vřesinská
5.	Nádraží Hostivař	Novolišeňská (točna)	Nová huť, jižní brána

Obr. 11. a 12. Ukázka biologického materiálu z kolejiště (vlevo terestriční korýši, vpravo odumřelá rostlinná hmota)



Autorka fotografií: Eva Navrátilová

Výzkum zaměřený na akumulaci vybraných těžkých kovů v organismech obývajících tramvajová kolejiště v současnosti stále probíhá. Odebraný biologický materiál je analyzován metodou atomové absorpční spektrofotometrie, která slouží ke stanovení koncentrací sledovaných kovů.

Po dokončení analýz bude možné vyhodnotit úroveň akumulace sledovaných kovů v jednotlivých skupinách organismů a posoudit případné rozdíly mezi studovanými lokalitami. Získaná data budou dále využita v rámci doktorského výzkumu a jejich výsledky budou zpracovány pro účely odborné publikace v recenzovaném vědeckém časopise.

Na základě dosavadních poznatků a charakteru sledovaného prostředí byly stanoveny následující hypotézy:

- H1: Koncentrace vybraných těžkých kovů v biologickém materiálu z tramvajových kolejišť budou vyšší než koncentrace v biologickém materiálu z analogického městského prostředí.
- H2: Mechorosty, svinka obecná a odumřelá rostlinná hmota se budou lišit v koncentracích akumulovaných vybraných těžkých kovů.
- H3: Koncentrace vybraných těžkých kovů v biologickém materiálu budou souviset s charakterem jednotlivých lokalit.
- H4: Koncentrace vybraných těžkých kovů v biologickém materiálu se budou mezi jednotlivými městy (Brnem, Ostravou a Prahou) lišit.

5. Závěr

Výzkum tramvajových kolejišť ukazuje, že tato na první pohled čistě technická součást městské dopravní infrastruktury představuje ve skutečnosti komplexní antropogenní ekosystém s vlastní biologickou rozmanitostí a dynamikou. Dosavadní výsledky floristického průzkumu potvrzují, že kolejiště mohou hostit překvapivě pestrout vegetaci, včetně řady nepůvodních druhů, a že jejich druhové složení významně ovlivňuje jak charakter jednotlivých měst, tak technické řešení a povrch kolejiště. Současné sledování roční dynamiky dále ukazuje význam časového pohledu a umožňuje zachytit proměny nejen cévnaté vegetace, ale také mechorostů a bezobratlých živočichů. Výzkum těžkých kovů pak přináší další rozměr a zaměřuje se na možné působení antropogenního znečištění a jeho akumulaci a přenos mezi jednotlivými složkami ekosystému.

Jednotlivé části výzkumu tak společně umožňují nahlížet na tramvajová kolejiště z několika vzájemně propojených perspektiv – od druhové rozmanitosti přes její proměnlivost v čase až po chemické charakteristiky prostředí a možné přenosy látek do živých organismů. Přestože jde o stanoviště výrazně ovlivněná člověkem, výsledky naznačují, že mohou mít z hlediska městské biodiverzity význam, který dosud nebyl dostatečně doceněn [1]. Cílem dalšího výzkumu proto není pouze popsat, jaké organismy na tramvajových kolejištích žijí, ale také lépe porozumět tomu, jak tento specifický ekosystém funguje, jak se v čase mění a jakým způsobem na něj působí intenzivní městské prostředí.

Vzhledem k tomu, že se jedná o probíhající doktorský výzkum, představují dosud získané výsledky pouze část rozsáhlejšího projektu. Následující analýzy a připravované publikace by měly přinést podrobnější pohled na jednotlivé složky kolejištních ekosystémů a jejich vzájemné vztahy. Výzkum tak může přispět nejen k poznání dosud opomíjených městských stanovišť, ale také k diskusi o tom, zda a jak lze při plánování, konstrukci a údržbě tramvajové infrastruktury lépe využít její potenciál pro podporu biodiverzity a ekologických funkcí města.

Literatura

- [1] MOROŇ, D., BEIM, M., GUDOWSKA, A. et al. Evaluating tramway infrastructure on biodiversity and ecosystem services. *Scientific Reports*, 2024, 14, 9394. DOI: 10.1038/s41598-024-59460-2.
- [2] WOŹNICA P., URBISZ A., FRANIEL I. & URBISZ A. (2016): Tram tracks as specific anthropogenic habitats for the growth of plants. *PeerJ*. Dostupné na: 10.7287/PEERJ.PREPRINTS.2606V1
- [3] KOWARIK, I. Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8–9), 1974–1983. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.02.022.
- [4] RENDEKOVÁ, A., MIČIETA, K., RANDÁKOVÁ, Z. et al. Flora of the tram tracks of Bratislava. *Urban Ecosystems*, 2020, 23(4), 875–891. DOI: 10.1007/s11252-020-00952-0.
- [5] SZALA, K., KUBICKA, A. M., SPARKS, T. H., TRYJANOWSKI, P. Birds using tram tracks in Poznań (Poland): Species, infrastructure use and behaviour. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 81, 102282. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102282.
- [6] WINKLER, J., KODA, E., ČERVENOVÁ, J. et al. Fragmentation and biodiversity change in urban vegetation: A case study of tram lines. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(5), 1734–1747. DOI: 10.1002/ldr.5017.
- [7] DI GIULIO, M., LOSOSOVÁ, Z., CARBONI, M. & RICOTTA, C. Measuring plant functional specialization in urban environments with Grime's CSR strategies. *Applied Vegetation Science*, 2024, 27, e12803. DOI: 10.1111/avsc.12803.
- [8] RENDEKOVÁ, A., MIČIETA, K., HRABOVSKÝ, M. et al. Comparison of the differences in the composition of ruderal flora between conventional tram tracks and managed green tram tracks in the urban ecosystem of the city of Bratislava. *Hacquetia*, 2022, 21(1). DOI: 10.2478/hacq-2021-0020.
- [9] RANDELOVIĆ, D., JAKOVLJEVIĆ, K., ŠINŽAR-SEKULIĆ, J., KUZMIČ, F. & ŠILC, U. Recognising the role of ruderal species in restoration of degraded lands. *Science of the Total Environment*, 2024, 938, 173104. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173104.
- [10] KISVARGA, S., HOROTÁN, K., NEMÉNYI, A., TÁBORSKÁ, J., ISTVÁNFI, Z. & ORLÓCI, L. The ecology of urban vegetation: Trade-offs, stressors, and adaptive strategies. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025, 28, 100887. DOI: 10.1016/j.indic.2025.100887.
- [11] FRUHWIRT, D., NÖST, T., LEONHARDT, P., LEITNER, M., BRUNNHOFER, P., BODE, G., MICHAEL, S. & RODLER, J. Characterization of emissions from axle-mounted rail disc brakes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 130, 104181. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104181.
- [12] SAFADOUST, A., KHALEGHI, S. & KOLAHCHI, Z. Environmental risks of heavy metals in railway soils: Challenges to ecosystem management. *Science of the Total Environment*, 2025, 974, 179217. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179217.
- [13] SCHREITER, H. & KAPPIS, C. Effect and Function of Green Tracks. *Grüngleisnetzwerk*, 2013. Dostupné na: <http://www.gruengleisnetzwerk.de/images/downloads/effects.pdf>
- [14] GHEMARI, C., WATERLOT, C., AYARI, A., LECLERCQ, J., DOUAY, F. & NASRI-AMMAR, K. Assessment of heavy metals in soil and terrestrial isopod *Porcellio laevis* in Tunisian industrialized areas. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76. DOI: 10.1007/s12665-017-6946-5.

Poděkování

Část výzkumu věnovaná těžkým kovům byla realizována za podpory projektu IGA26-AF-IP-042 s názvem Těžké kovy v kolejistích tramvají a jejich možný přenos do biomasy rostlin a živočichů.

Tram Tracks in the Czech Republic: From Biodiversity to Environmental Risks

Eva Navrátilová

Mendel University in Brno, Department of Plant Biology

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno, Czech Republic

e-mail: evkanavr@mendelu.cz

Abstract

At first glance, tram tracks are primarily perceived as part of urban transport infrastructure. However, their environment is characterised by a combination of regular disturbance, specific microclimatic conditions, differences in technical design, and influences associated with tram operation, creating conditions that can support diverse biological communities. Despite this, the ecological significance of these habitats remains relatively poorly understood. This contribution presents ongoing doctoral research focused on the comprehensive ecology of tram tracks in the Czech Republic. The research is divided into three interconnected parts. The first part focuses on a nationwide survey of the flora of tram tracks, covering 384 tram stops and recording 265 vascular plant taxa. The second part examines the seasonal dynamics of biological communities, focusing on changes in vascular plant and bryophyte vegetation and the occurrence of invertebrates throughout the growing season. The third part addresses the accumulation of selected heavy metals in tram track environments and their potential transfer into the biotic component of the ecosystem. The contribution provides a brief overview of this comprehensive research and presents selected results obtained so far from its individual components. Although tram tracks are highly anthropogenically influenced habitats, the results to date indicate their considerable potential for supporting urban biodiversity. The research also highlights the need to perceive tram tracks not only as part of transport infrastructure, but also as specific habitats with their own ecological functions, dynamics, and potential environmental impacts.

Přínos zelených tramvajových tratí pro snižování tepelného ostrova města a podporu biodiverzity

Jan Szturc^{1,3}, Jaroslav Rožnovský^{2,3}, Eva Navrátilová³

¹Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: jan.szturc@cdv.gov.cz

²Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Kroftova 2578/43, 616 67 Brno

e-mail: jaroslav.roznovsky@chmi.cz

³Mendelova univerzita v Brně

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

e-mail: xnavra15@mendelu.cz

Abstrakt

Zelené tramvajové tratě představují specifický prvek městské zelené infrastruktury, který propojuje dopravní funkci s environmentálními přínosy. Příspěvek se zaměřuje na jejich význam z hlediska zmírňování efektu městského tepelného ostrova a podpory biodiverzity v podmínkách městského prostředí. První část studie je věnována stanovení teoretického potenciálu ozelenění tramvajových tratí na území města Brna na základě prostorového hodnocení tramvajové infrastruktury a typu povrchového řešení kolejiště. Druhá část příspěvku je zaměřena na hodnocení teplotních charakteristik různých typů povrchu přímo v tramvajových tratích, zejména na úsecích s vegetačním krytem, asfaltovým povrchem, kamenivem a panely. Třetí část se věnuje biologickému průzkumu vybraných tramvajových kolejišť a jejich významu z hlediska výskytu rostlin a dalších organismů. Dosavadní výsledky z města Brna ukazují, že vegetační tramvajové pásy dosahují v letních podmínkách nižších povrchových teplot v průměru 10–15 °C ve srovnání s nezatravněnými úseky a že v rámci tramvajové sítě existují další úseky s potenciálem pro ozelenění. Příspěvek tak představuje zelené tramvajové tratě jako multifunkční součást městské infrastruktury, která může přispívat ke zlepšování mikroklimatu i ekologické kvality městského prostředí.

1. Úvod

Tramvajová doprava patří mezi důležité součásti udržitelné městské mobility a v posledních letech je stále častěji vnímána nejen jako dopravní systém, ale také jako součást širší městské infrastruktury s environmentálním významem. Typ povrchu tramvajového kolejiště totiž neovlivňuje pouze provozní a technické parametry tratě, ale také tepelný režim povrchu, vsakování a retenci srážkové vody i celkové mikroklimatické působení dopravního koridoru v městském prostředí [2], [3], [8]. Vegetační kryty v tramvajových tratích proto lze chápat jako specifický prvek zelené infrastruktury, který propojuje dopravní funkci s funkcí ekologickou a adaptační [2], [8].

V souvislosti s oteplováním měst a zesilováním efektu tepelného ostrova nabývá význam otázka, jakým způsobem lze stávající dopravní infrastrukturu využít pro zlepšování městského mikroklimatu. Tvrdé povrchy, jako jsou asfalt, beton nebo panely, akumulují teplo a v letních dnech dosahují výrazně vyšších povrchových teplot než plochy vegetační. Naopak vegetační kryty snižují teplotu povrchu díky vyšší vlhkosti a evapotranspiraci [2], [3]. Z tohoto pohledu mohou zelené tramvajové tratě

představovat relativně jednoduché a prostorově úsporné opatření, které využívá již existující dopravní koridory bez nároku na nové plochy [1], [2].

Pro hodnocení teplotního režimu urbanizovaného prostředí je současně podstatné, že město nepředstavuje klimaticky homogenní celek. Měření uskutečněná v různých typech prostředí na území Brna např. ukazují, že teplotní poměry se v rámci města významně liší v závislosti na charakteru aktivního povrchu, intenzitě zástavby a podílu vegetace. V roce 2025 bylo například v centrálně zastavěné lokalitě Mendlova náměstí zaznamenáno 47 tropických dnů, zatímco v parkovém prostředí Lužánek 26 a ve Starém Lískovci 29, výsledky současně potvrzují, že význam souvislé zeleně pro zmírnění tepelné zátěže je zřetelný a že městský tepelný ostrov vykazuje vnitřní prostorovou diferenciaci [15]. Tyto poznatky podporují potřebu provádět měření přímo v konkrétních typech městského prostředí, mezi něž patří i tramvajové tratě s rozdílným povrchovým řešením.

Vedle mikroklimatického efektu se v posledních letech do popředí dostává i otázka biologické rozmanitosti vázané na dopravní infrastrukturu. Moroň a kol. (2024) upozorňuje, že výzkum vztahu tramvajových tratí a biodiverzity je dosud poměrně omezený, přestože tramvajové koridory mohou v urbanizovaném prostředí fungovat jako specifické liniové biotopy a ekologické spojnice mezi různými typy městské zeleně [4]. Rendeková a kol. (2020, 2022) poukazuje, že tramvajové tratě představují specifická městská stanoviště, jejichž floristické složení i ekologický význam se mění v závislosti na typu povrchu, charakteru substrátu a způsobu údržby [5], [17]. Podobně Sikorski a kol. (2018) zdůrazňuje, že význam zelených tramvajových tratí je úzce spojen také s intenzitou managementu vegetace a s tím, jak je takové řešení přijímáno v městském prostředí [7]. Z tohoto hlediska nelze zelené tramvajové tratě chápat pouze jako estetický doplněk veřejného prostoru, ale jako potenciálně multifunkční součást městské infrastruktury s dopravní, mikroklimatickou i ekologickou funkcí [2], [4], [7], [8].

Předkládaný příspěvek se zaměřuje na podmínky města Brna, kde již byly, na základě termálních map povrchu, zjištěny výrazné rozdíly mezi zatravněnými a nezatravněnými úseky tramvajových tratí. Dosavadní výsledky ukazují, že vegetační tramvajové pásy vykazují v letních podmínkách nižší povrchové teploty přibližně o 10–15 °C oproti úsekům nezatravněným [1]. Předkládaný příspěvek dosavadní poznatky dále rozšiřuje o hodnocení teplotních charakteristik různých typů povrchu přímo v tramvajových tratích a o stručnou část věnovanou biodiverzitnímu významu tramvajových kolejišť.

Cílem příspěvku je zhodnotit význam zelených tramvajových tratí z hlediska teplotního režimu různých typů tramvajového kolejiště a současně upozornit na jejich možný význam pro podporu biodiverzity v městském prostředí.

2. Materiál a metodika

Jako výchozí materiály byla pro zpracování studie využita především volně dostupná geoprostorová a obrazová data vztahující se k tramvajové infrastruktuře města Brna a k teplotnímu režimu jeho povrchu. Základním zdrojem byla data a mapové aplikace publikované prostřednictvím portálů „*data.brno a GIS města Brna*“ spravovaných Magistrátem města Brna, zejména digitální podklady tramvajové sítě a termální mapa města založená na leteckém snímkování povrchu [11], [12], [13].

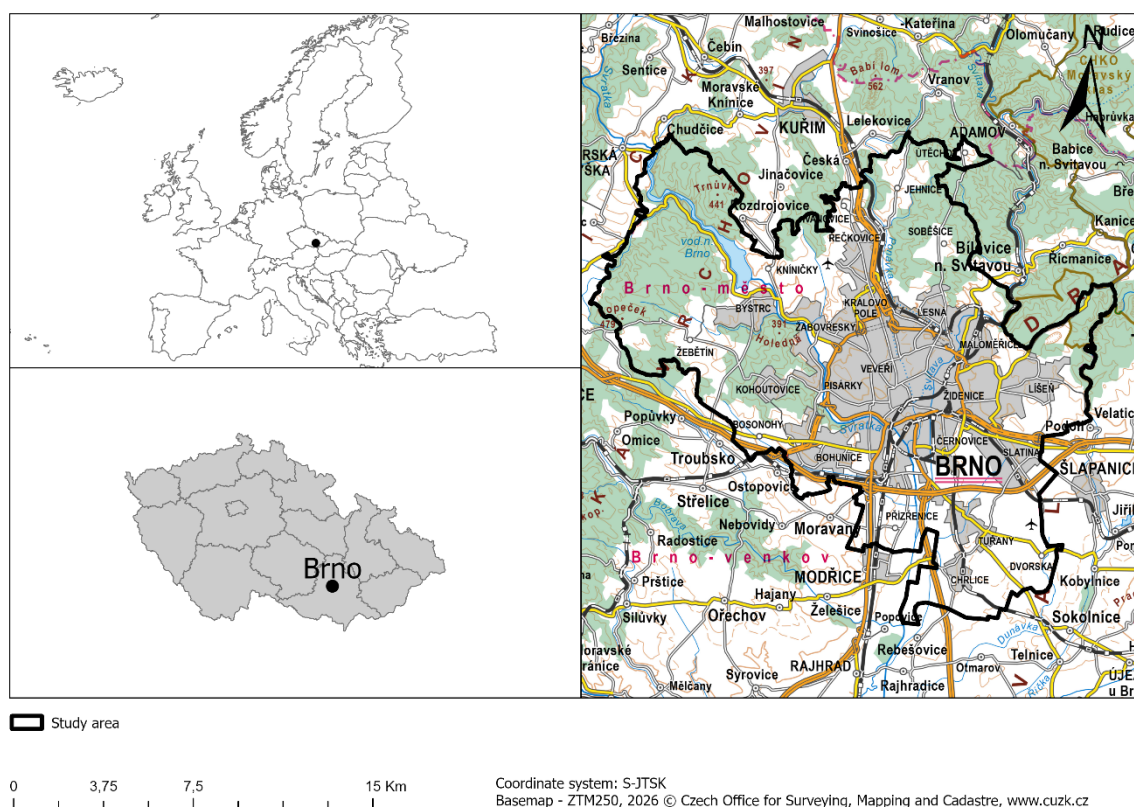
Jako referenční rastrový podklad byla dále využita veřejně dostupná prohlížečská služba WMS Ortofoto poskytovaná Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním prostřednictvím Geoportálu ČÚZK [14].

Prostorové analýzy a tvorba mapových výstupů byly zpracovány s využitím metod a nástrojů dostupných v prostředí ArcGIS Pro 3.7, který podporuje práci s vektorovými i rastrovými daty, mapovými službami a analytickými geoprocessingovými postupy.

2.1. Vymezení zájmového území

Zájmovým územím studie je statutární město Brno, které se nachází v centrální části Jihomoravského kraje a s rozlohou přibližně 230 km² představuje druhé největší město České republiky (obr. 1). Reliéf města je výrazně diferencovaný: severní a severozápadní část přechází do členitějšího terénu okraje Českomoravské vrchoviny, zatímco jižní a jihovýchodní část navazuje na plošší krajinu Dyjsko-svrateckého úvalu; nadmořská výška se pohybuje přibližně od 190 m do více než 400 m n. m. Klimatické podmínky Brna lze označit za relativně teplé a sušší, což je z hlediska sledování teplotních rozdílů mezi povrchy v letním období metodicky vhodné [9].

Obr. 1. Přehledová mapa zájmového území



Brno bylo pro účely této studie zvoleno především díky rozsáhlé a morfologicky pestré tramvajové síti, která prochází různými typy městského prostředí, od kompaktní zástavby centra po samostatně vedené úseky v širších uličních profilech. V rámci města se současně vyskytují odlišné typy povrchového řešení tramvajového kolejiště, což vytváří vhodné předpoklady, jak pro stanovení potenciálu jejího zatravnění, tak pro srovnání teplotních charakteristik přímo v rámci tramvajové infrastruktury. Brno tak představuje vhodnou případovou studii pro hodnocení mikroklimatického významu zelených tramvajových tratí i pro posouzení jejich ekologického potenciálu.

2.2. Stanovení teoretického potenciálu zatravnění tramvajových tratí

Tato část studie je zaměřena na identifikaci úseků tramvajové sítě města Brna, které jsou z hlediska prostorových, technických a provozních podmínek teoreticky vhodné pro ozelenění (zatravnění). Hodnocení bylo založeno na kombinaci digitální vrstvy tramvajové sítě, ortofotomapy a teplotní mapy města, které umožňují posoudit jak charakter tramvajového tělesa, tak typ povrchového řešení kolejiště a jeho vztah k okolnímu městskému prostředí.

Vlastní hodnocení bylo založeno na screeningové analýze tramvajové sítě, jejímž cílem bylo vymezit úseky, kde lze z hlediska prostorových a provozních podmínek teoreticky uvažovat o vegetační úpravě kolejiště. Posuzováno bylo zejména vedení tratí v samostatném tramvajovém tělese, šířkové uspořádání uličního profilu, míra integrace kolejiště do vozovky a charakter okolního prostředí. Zohledněna byla také možnost náhrady stávajícího zpevněného nebo jinak aktuálně nevegetačního povrchu vegetačním krytem, zejména v případech, kdy by ke změně povrchového řešení mohlo dojít v rámci rekonstrukce nebo modernizace tratě, aniž by došlo k zásadnímu omezení její dopravní funkce.

Na základě těchto kritérií byly vymezeny reprezentativní segmenty tramvajové infrastruktury s teoretickým potenciálem pro ozelenění. Cílem této části nebylo navrhnout konkrétní realizační řešení, ale vytipovat úseky, kde by z hlediska uspořádání tramvajové tratě a charakteru městského prostoru bylo možné ozelenění uvažovat. Výstupem je proto přehled segmentů, které lze považovat za potenciálně vhodné pro další zvažování v rámci městské praxe a plánování. Tato analýza tak vytváří vstupní rámec pro úvahy o dalším rozvoji zelených tramvajových tratí ve městě. Navazující hodnocení teplotních charakteristik různých typů povrchu v tramvajových tratích a biologický průzkum vybraných lokalit doplňují tento rámec o poznatky, které obecně podporují význam vegetačních úprav kolejiště z hlediska mikroklimatu i ekologické kvality městského prostředí.

2.3. Stanovení teplotních charakteristik různých typů povrchů v tramvajových tratích

Teplota povrchu vybraných povrchů byla měřena termometrem za jasného dne 31. 7. 2026. Šlo o tzv. radiační den, tedy den, kdy byla nulová oblačnost, takže povrchy byly plně ozářeny slunečním zářením. Naměřené teploty byly dány fyzikálními vlastnostmi povrchů, mezi kterými výraznou roli hraje barva povrchu, u rostlin potom transpirace. Měření byla prováděna od 6:30 do 21:30, kdy postupná objížďka byla v závislosti na dopravě kolem 40 min. Časy měření byly společně s teplotami povrchů zapisovány a následně přepočítány na hodnoty v celých hodinách. Tyto byly statisticky a graficky zpracovány.

2.4. Biodiverzitní význam tramvajových kolejišť

Floristický průzkum tramvajových kolejišť byl proveden v rámci celorepublikového výzkumu vegetace tramvajové infrastruktury ve městech České republiky s tramvajovou dopravou, tedy v Praze, Brně, Ostravě, Plzni, Mostě a Litvínově a Liberci a Jablonci nad Nisou.

Celkem bylo sledováno 384 tramvajových zastávek. V rámci Brna, kterou se tato studie zabývá, bylo sledováno 83 zastávek.

U jednotlivých lokalit, tedy tramvajových zastávek, byl zaznamenán výskyt rostlinných druhů a jejich abundance. Ta byla hodnocena na rychle a snadno

hodnotitelné škále: jednotky, desítky a stovky, a to hlavně kvůli dynamice prostředí a častému pojezdu tramvají.

Následně byly jednotlivé taxony charakterizovány z hlediska jejich původnosti, případně invazního statusu, a dalších ekologických a funkčních vlastností relevantních pro hodnocení biodiverzity městských stanovišť. Zvláštní pozornost byla věnována rozdílům mezi jednotlivými typy povrchů, pak i vegetačních pásů, zejména mezi travnatými porosty a pásy tvořenými suchomilnými sukulenty či rozchodníky. Hodnocení umožňuje posoudit nejen druhovou bohatost vegetace zelených tramvajových pásů, ale také potenciální ekologickou hodnotu spontánně se vyvíjející vegetace a její význam z hlediska dalšího managementu těchto ploch.

3. Výsledky a diskuse

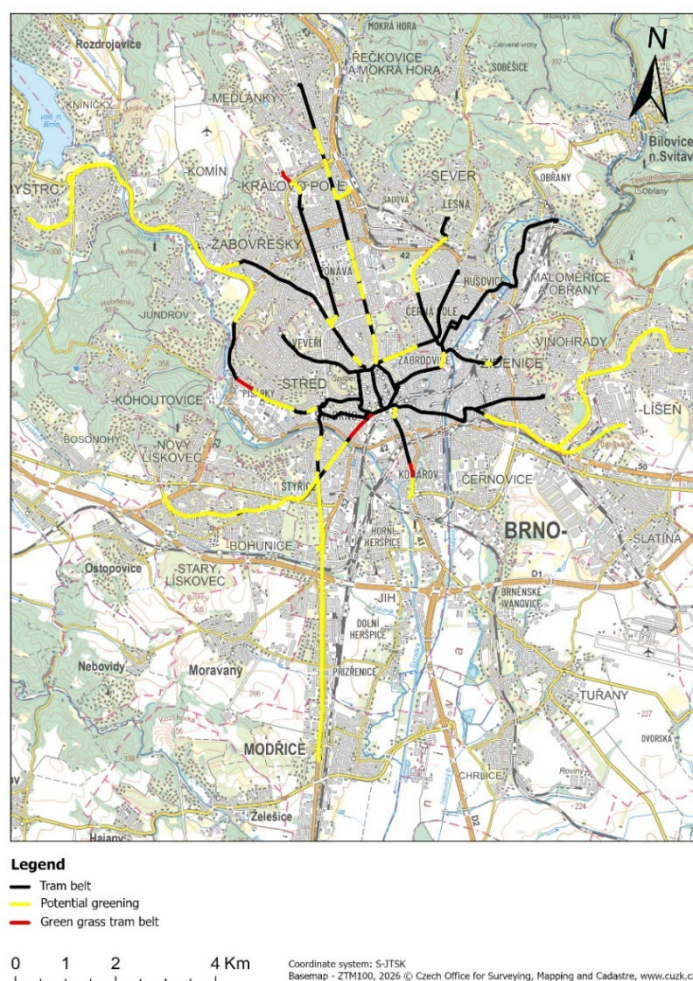
3.1. Vyhodnocení teoretického potenciál zatravnění tramvajových tratí

V první části hodnocení byl na území města Brna posouzen teoretický potenciál dalšího rozšíření zelených tramvajových tratí. Analýza vycházela z prostorového hodnocení tramvajové infrastruktury, při němž byla digitální vrstva tramvajové sítě doplněna vizuální interpretací typu kolejového svršku, charakteru tramvajového tělesa a prostorového uspořádání uličního profilu. Jako potenciálně vhodné byly určeny především úseky vedené v samostatném tramvajovém pásu nebo v širších uličních profilech, kde není kolejiště přímo integrováno do vozovky.

Výsledky ukazují, že současný rozsah realizovaných zatravněných tramvajových tratí v Brně zůstává poměrně omezený. Celková délka stávajících vegetačních úseků činí přibližně 1,24 km, zatímco prostorová analýza identifikovala až 33,98 km tratí, které by z hlediska prostorových a technických podmínek mohly být považovány za teoreticky vhodné pro ozelenění (obr. 2). Tento rozdíl naznačuje, že v rámci stávající tramvajové sítě existuje významný rozvojový prostor pro širší uplatnění vegetačních úprav kolejiště. Do identifikovaného teoretického potenciálu jsou přitom zahrnuty také úseky, které jsou v současnosti vedeny na šterkovém či jinak nevegetačním povrchu, avšak z hlediska uspořádání tramvajového tělesa by u nich bylo možné o vegetační úpravě uvažovat zejména v návaznosti na budoucí rekonstrukci nebo modernizaci tratě.

Zjištěný rozsah teoreticky vhodných úseků odpovídá závěrům Jakubcové a Horváthové (2020), podle nichž představuje prostor mezi kolejnicemi ve městech cennou rezervu pro rozšíření zeleně, a současně navazuje na tvrzení Major a kol. (2023) a Radácsiho a kol. (2026), kteří zelené tramvajové tratě interpretují jako součást zelené infrastruktury a opatření podporujících klimatickou odolnost městského prostředí [2], [8], [16].

Obr. 2. Potenciální zatravnění tramvajových tratí na území města Brna



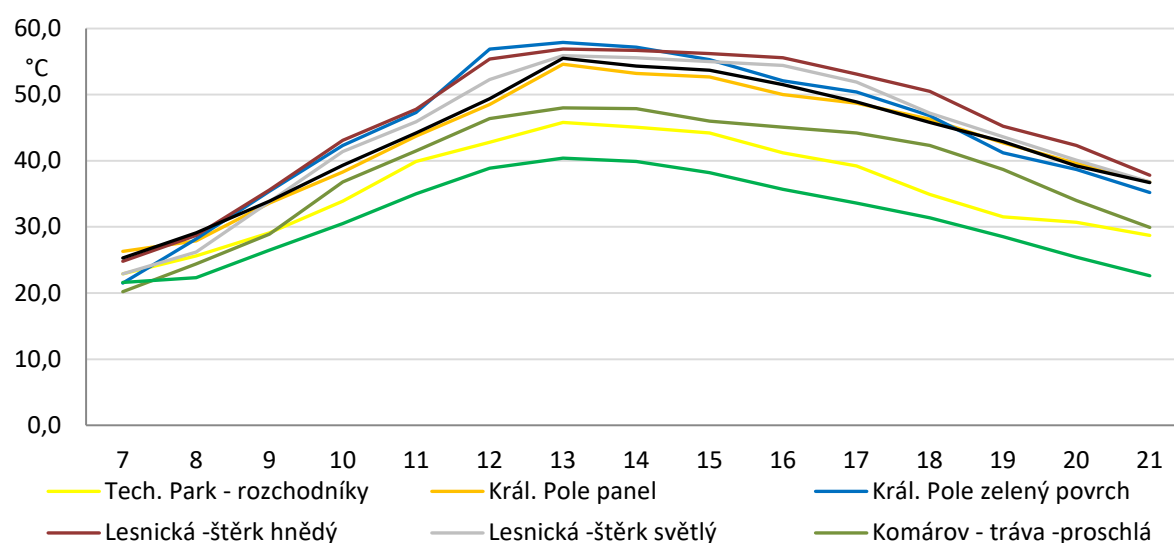
Prostorové rozmístění vytipovaných úseků zároveň ukazuje, že vegetační úpravy kolejí by bylo možné uplatnit na více navazujících segmentech tramvajové sítě. V městské struktuře by tak mohly vznikat souvislejší liniové prvky zelené infrastruktury, které by vedle dopravní funkce plnily i funkci mikroklimatickou a ekologickou. Z tohoto pohledu lze potenciál ozelenění chápat nejen jako technicko-prostorový parametr tramvajové infrastruktury, ale také jako podklad pro úvahy o opatřeních, která mohou přispívat ke zmírnění tepelné zátěže v dopravních koridorech a ke zlepšení environmentálních podmínek městského prostředí.

Současně je však vhodné dodat, že identifikovaný potenciál nelze automaticky ztotožnit s jednoduchou realizovatelností všech vytipovaných úseků. Jak ukazuje např. Jakubcová a Horváthová (2020), praktické uplatnění zelených tramvajových tratí je ovlivněno nejen prostorovými a technickými podmínkami, ale také volbou vegetačního typu, nároky na údržbu a ekonomickou přijatelností jednotlivých variant řešení [2]. V podobném duchu Moroň a kol. (2024) upozorňuje, že zelené tramvajové tratě je vhodné chápat jako součást širšího konceptu zeleného městského plánování, v němž dopravní infrastruktura může vedle své primární funkce plnit i funkce ekologické a ekosystémové [4]. Výsledky prezentované v této kapitole je proto vhodné vnímat především jako podklad pro strategické úvahy o dalším rozvoji zelených tramvajových tratí v podmínkách města Brna, nikoli jako přímý realizační návrh všech identifikovaných segmentů.

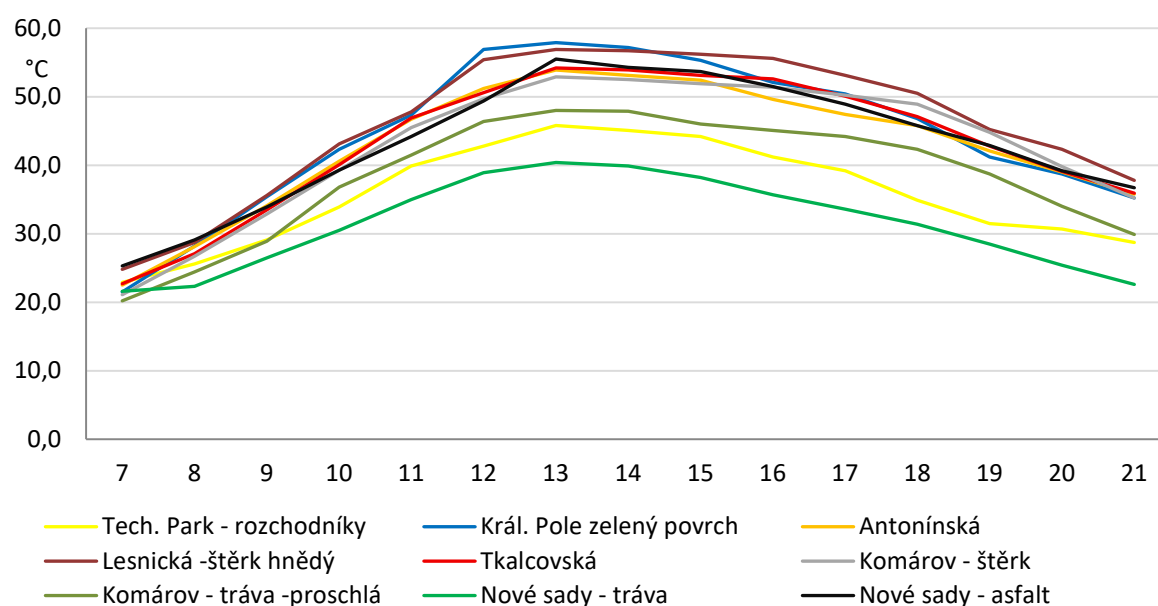
3.2. Vyhodnocení teplotních charakteristik vybraných povrchů

Průběh teploty vybraných povrchů dne 31. 7. 2026 mezi 7. až 21. hodinou jsou zobrazeny ve dvou grafech (Obr. 3 a Obr. 4), protože povrchy panelů a šterku na několika lokalitách měly velmi podobný průběh. Na obou grafech vidíme, že v ranním termínu jsou hodnoty teploty hodnocených povrchu velmi blízké v rozpětí 20,2 °C na proschlém travnatém povrchu až 25,3 °C na povrchu asfaltu na Nových sadech. Naopak v posledním termínu, tedy ve 21 hodin je rozpětí teplot výrazně vyšší měření. Nejnížší teplota 22,6 °C je na povrchu trávy, následuje tramvajový pás s rozchodníky v Technologickém parku s teplotou 28,7 °C. Nejvyšší teplotu, a to 37,8 °C vykazuje povrch hnědého šterku v otevřené části ulice Lesnická. Vysoké vyhřátí tohoto tramvajového pásu dokládá i teplota povrchu světlého šterku (36,8 °C), která je o jednu desetinu vyšší než teplota povrchu asfaltu na Nových sadech (36,7 °C).

Obr. 3. Průběh teploty vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



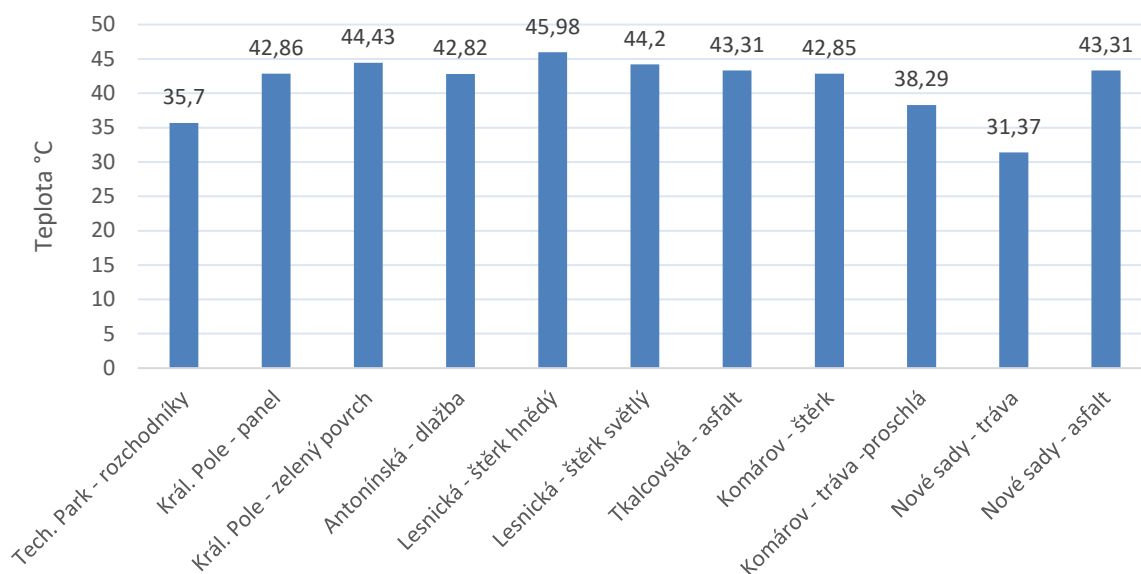
Obr. 4. Průběh teploty vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



S ohledem na velkou blízkost průběhu povrchových teplot jsou samostatně uváděny grafy denních průměrů, maxim, minim a amplitudy. Na Obr. 5 je formou sloupcových grafů vyjádřena průměrná teplota za denní období měření. Teplota 46 °C je nejvyšší denní průměr, platící pro hnědý štěrk na ulici Lesnická. Svým způsobem to překvapivě není teplota povrchu asfaltu (43,3 °C), kdy vyšší má světlý štěrk na ulici Lesnické, ale také umělý zelený povrch tramvajového pásu v Králově Poli. Nejnižší teplotu měl povrch trávy, a to 31,4 °C, následovaný pásem s rozchodníky (35,7 °C).

Jak již bylo uvedeno, hodnocený den byl jasný, takže povrchy byly plně ohřáty slunečním zářením. Proto vidíme, že na většině povrchů teploty překročily 40 °C.

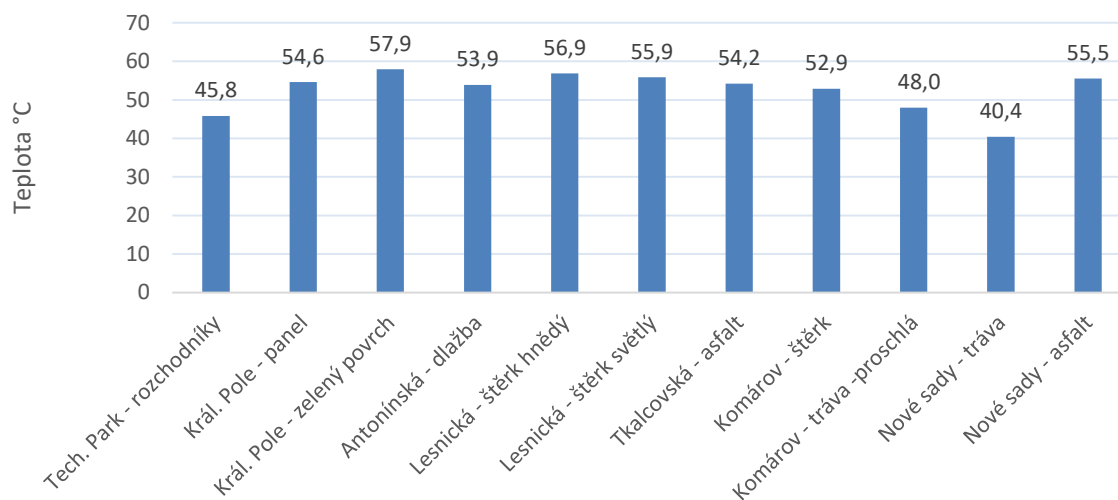
Obr.5. Průměrné teploty vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



S ohledem na teplotní poměry ve městech a výskyt tepelného ostrova hrají významnou roli maximální hodnoty teploty povrchů, protože při nich dochází k nejvyšším hodnotám vyzařování, a tím ohřívání městského prostředí včetně vzduchu. Hodnoty teplotních maxim hodnocených povrchu vidíme na Obr. 6.

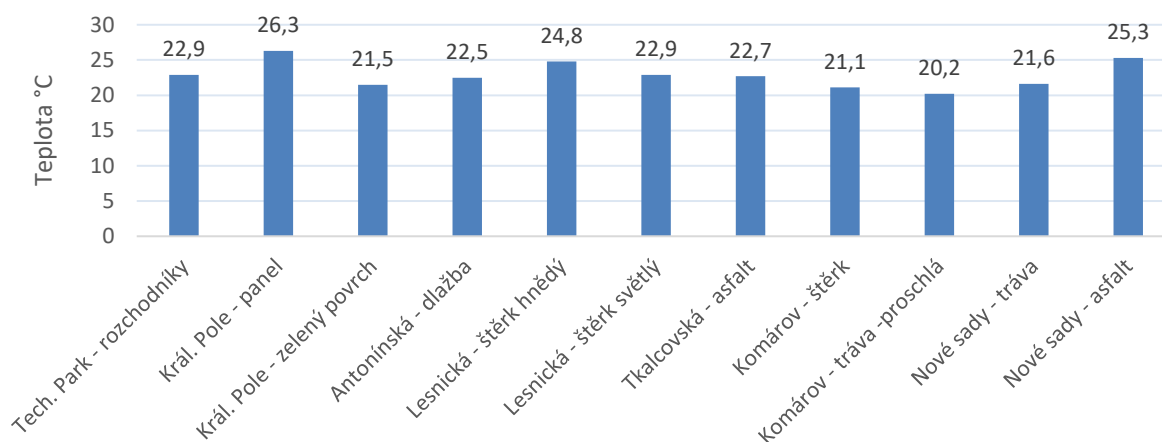
Nejvyšší naměřená hodnota (57,9 °C) není, jak bychom očekávali na asfaltu, ale na umělém zeleném povrchu. Následují, podobně jako u průměrných teplot povrchy štěrků na ulici Lesnické (hnědý 56,9 °C a světlý 55,9 °C), na povrchu asfaltu (Nové Sady) bylo maximum 55,5 °C. Nejnižší maximum má podle očekávání povrch trávy, a to 40,4 °C. Zde je nutné zdůraznit, že u všech povrchů jsou maxima přes 40 °C, ale také, že rozdíl mezi umělým zeleným povrchem, povrchy štěrků a asfaltu a povrchem trávy je přes 15,5 °C.

Obr. 6. Maximální teploty vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



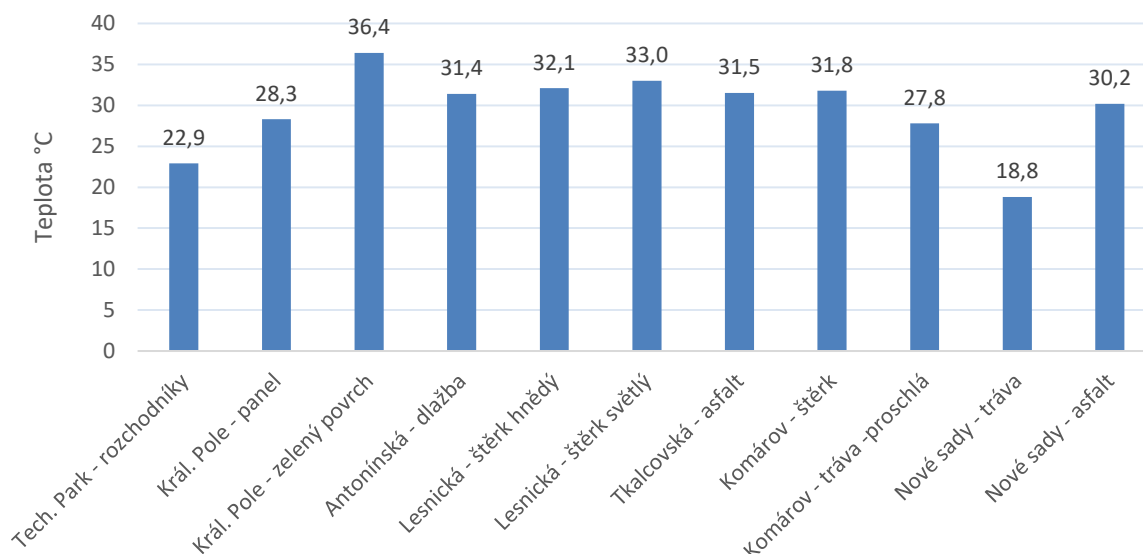
Z hlediska minimálních teplot povrchu je nutné zdůraznit, že v době měření nebyly zaznamenány nejnižší teploty, dané vyzařováním během noci. Uváděná minima jsou dána teplotou v 7 hodin, tedy na počátku měření. Popis je uveden v úvodu výsledkové části a Obr. 7 je zařazen pro názornost i vzhledem k následujícímu vyjádření teplotních amplitud jednotlivých povrchů, Obr. 8.

Obr. 7. Minimální teploty vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



Hodnoty amplitud teploty vybraných povrchů se pohybují od nejvyšší, a to 36,4 °C u umělého zeleného povrchu po nejnižší u travního povrchu, a to 18,8 °C. U povrchu asfaltu je amplituda (30,2 °C) menší než u většiny štěrťových či panelových povrchů.

Obr. 8. Amplituda teplot vybraných povrchů od 7 do 21 hodin 31. 7. 2026 na území města Brna



Uvedené výsledky z měření hodnocených povrchů dokládají nejen rozdílné hodnoty teploty jejich povrchů, ale také její rozdílnou dynamiku. Zde si musíme uvědomit, že povrchové teploty jsou dány dalšími vlastnostmi materiálů, jejichž povrchová teplota byla měřena. Jde o albedo povrchů, ale také o tepelnou kapacitu a vodivost jednotlivých materiálů. Významnou roli sehrává vlhkost materiálů, ale také vlivy okolí, zvláště v ulicích stín okolních budov. Pochopitelně rozhodující je průběh počasí, ale ještě v závislosti na ročním období. Jak již bylo uvedeno, byl vybrán den jasný, tedy den, kdy se projevují v létě nejvyšší hodnoty teplot povrchů. Je logické, že naše výsledky potvrdily teplotní rozdíly mezi povrchy. Obdobně jako v podobných studiích, nejnižší maximální a průměrná teplota byla na povrchu travního porostu. Je ale nutné uvést, že tento porost byl kvalitně udržován, zavlažován, takže na nižších teplotách se podílela transpirace. Zde je velmi potřebné zdůraznit, že v rámci teplotních poměrů ve městech nehraje roli jen barva povrchu. Dokladem je zelený umělý povrch a zelený přirozený travní povrch. Uváděné výsledky jsou dílčí, pro kvalifikované hodnocení vlivu povrchů tramvajových pásů je potřebné měření i ve dnech s oblačností, a nejen v létě, ale v průběhu celého roku.

3.3. Vyhodnocení biodiverzitního významu zatravněných tramvajových tratí

V rámci sledovaných tramvajových zastávek bylo zaznamenáno celkem 265 taxonů cévnatých rostlin. V Brně se nacházelo nejvíce taxonů – celkem 159. Jednalo se také o město s druhým nejvyšším počtem taxonů na zastávku, a to s počtem 50 druhů (na točně Novolíšeňská, obr.9). První byla Plzeň s počtem 63. Největší množství taxonů bylo nacházeno na zastávkách se štěrkovým a železobetonovým podložím. Nejčastějším druhem bylo rdesno ptačí (*Polygonum aviculare*), které velice dobře snáší sešlap a často roste na teplých stanovištích s plným sluncem. Další časté druhy jsou uvedeny v Tabulce č. 1.

Tabulka č. 1: Pět nejčastějších druhů nalézáných v Brně s počty výskytů

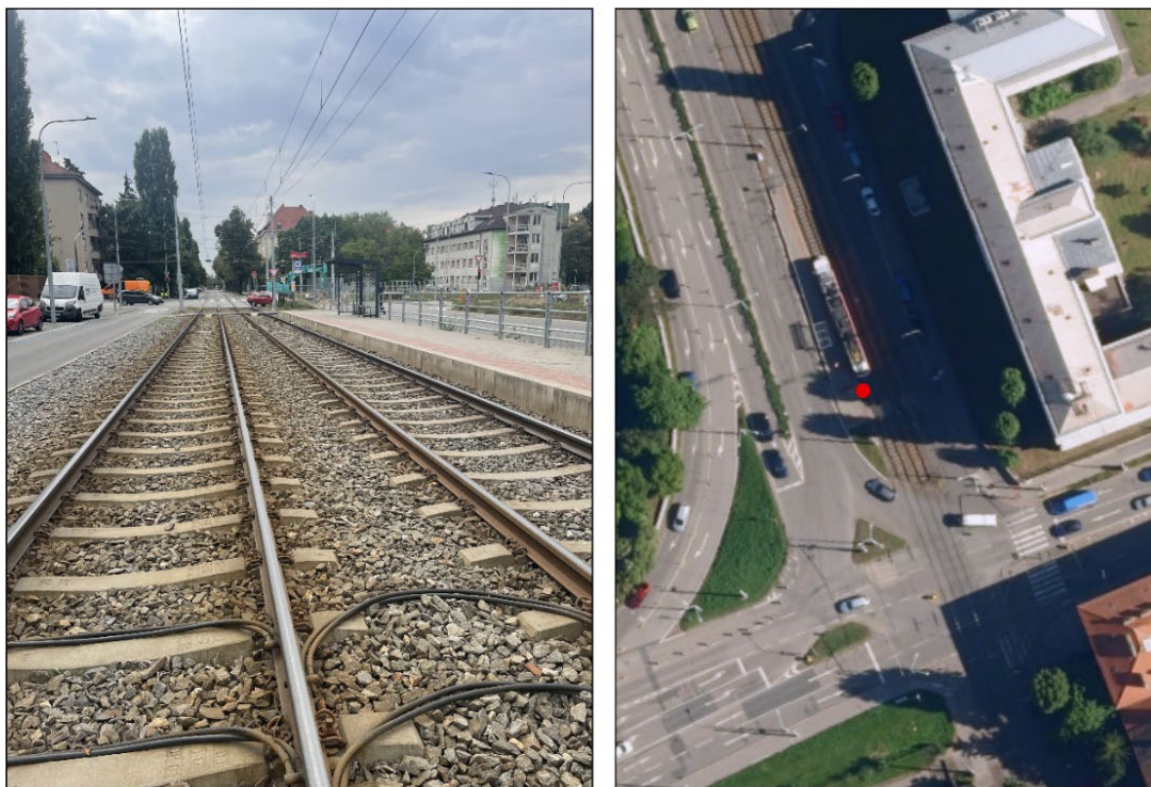
Druh	Počet výskytů (zastávek)
rdesno ptačí (<i>Polygonum aviculare</i>)	42
pampelišky smetánky (<i>Taraxacum</i> sect. <i>Taraxacum</i>)	27
lipnice roční (<i>Poa annua</i>)	25
jitrocel kopinatý (<i>Plantago lanceolata</i>)	20
starček obecný (<i>Senecio vulgaris</i>)	19

Obr. 9. Tramvajová točna Novolíšeňská



Pro Brno bylo také specifické nejvyšší množství ohrožených druhů, jako je třeba bělolist rolní (*Filago arvensis*) nalezený na točně Novolíšeňská. Zajímavé byly také nálezy sazenic zahradních plodin, např. lubenice obecná/vodní meloun (*Citrullus lanatus*) nebo lilek rajče (*Solanum lycopersicum*) se zralými plody. Obě plodiny byly nalezené na zastávce Lesnická (obr 10). Poměrně časté byly i semenáčky dřevin, hlavně pak rodu javor (*Acer* sp.), kterým se dařilo na zastávkách se štěrkovým povrchem.

Obr. 10. Tramvajová zastávka Lesnická



Zaznamenané druhy vykazovaly vlastnosti umožňující jim úspěšně prosperovat v těchto podmínkách. Významná část z nich je zároveň opylována hmyzem, a může tak představovat důležitý zdroj potravy pro opylovače a další bezobratlé živočichy. Druhově pestrá spontánní vegetace navíc poskytuje různé mikrohabitaty a přispívá k celkové heterogenitě městského prostředí.

Zajímavé jsou také rozdíly mezi jednotlivými typy zelených kolejíšť. Travnaté vegetační pásy mohou poskytovat prostor pro spontánní kolonizaci většího počtu druhů a vytvářet strukturálně pestřejší porosty, zatímco pásy tvořené sukulenty a rozchodníky bývají z hlediska spontánní vegetace homogennější. Studie z Bratislavy například zjistila rozdíly ve floristickém složení mezi konvenčními a zelenými kolejíšti a upozornila také na skutečnost, že zelená kolejíště mohou mít nižší podíl spontánně rostoucích nepůvodních druhů než tradiční kolejíště [5], [17].

Z tohoto pohledu je důležité vnímat management zelených tramvajových pásů nejen z hlediska provozní bezpečnosti a estetického vzhledu, ale také z hlediska jejich ekologické funkce. Intenzivní seč, odstraňování spontánní vegetace nebo používání druhově velmi chudých vegetačních směsí může omezovat jejich potenciál pro podporu biodiverzity. Naopak vhodně zvolená vegetace a diferencovaný management mohou umožnit současné plnění provozní, mikroklimatické a ekologické funkce. Dosavadní studie zelených tramvajových tratí ukazují, že extenzivněji udržované porosty mohou představovat ekonomicky i ekologicky zajímavou alternativu k intenzivně udržovaným trávníkům, přičemž jejich ekologická hodnota souvisí mimo jiné s biodiverzitou porostu [4], [8].

Výsledky floristického průzkumu proto představují důležitý podklad pro další hodnocení vhodnosti jednotlivých druhů pro vegetační pásy tramvajových kolejíšť. Do budoucna je vhodné zaměřit se na výběr druhů a druhově pestrých osivových směsí,

kteé budou tolerovat specifické podmínky tramvajové infrastruktury a pravidelný management a zároveň poskytovat zdroje potravy pro opylovače a další organismy. Tento přístup je v souladu s probíhajícími snahami o využití druhově pestrých směsí pro ozelenění městské a dopravní infrastruktury. V českých podmínkách byly například v rámci projektu zaměřeného na využití genových zdrojů pro města a krajinu testovány směsi trav, jetelovin a bylin také na tramvajových tratích v Praze [18]. Další výzkum by proto měl směřovat k optimalizaci druhového složení vegetačních směsí s ohledem na kompromis mezi provozními požadavky, nároky na údržbu, odolností vegetace a podporou městské biodiverzity.

Obr.11. Ukázka rostlinné diverzity v kolejišti (A: plevel v porostu sukulentů, B: zaplevelený travnatý pás, C: spontánní vegetace na štěrkovém podloží, D: spontánní vegetace mezi bloky železobetonu)



4. Závěr

Předkládaný příspěvek ukazuje, že zelené tramvajové tratě nelze v podmínkách města chápat pouze jako estetickou úpravu dopravní infrastruktury, ale jako potenciálně významný prvek opatření ke zmírnění projevu tepelného ostrova města. V urbanizovaném prostředí, kde rozsáhlé zpevněné povrchy akumulují teplo a přispívají ke zvyšování teplotní zátěže, představují vegetační kryty v tramvajovém kolejišti možnost, jak část této infrastruktury proměnit ve funkční mikroklimatický prvek.

Výsledky z města Brna potvrzují, že vegetační tramvajové pásy dosahují v letních podmínkách nižších povrchových teplot v průměru přibližně o 12–15 °C oproti úsekům nezatravněným. Tento rozdíl je z hlediska tepelného ostrova města podstatný, protože ukazuje, že i liniové prvky dopravní infrastruktury mohou lokálně snižovat tepelnou zátěž v ulicích a dopravních koridorech, tedy právě v těch částech města, kde bývá přehřívání povrchů výrazné [1], [2], [8]. Význam takového přístupu podporují i měření

realizovaná v různých částech Brna, která dokládají, že městské klima je vnitřně výrazně diferencované a že souvislá vegetace má prokazatelný ochlazovací efekt [15].

Z tohoto pohledu je důležité i stanovení teoretického potenciálu dalších úseků tramvajových tratí vhodných pro ozelenění. Identifikace segmentů, kde lze o vegetační úpravě kolejíště uvažovat, nepředstavuje sama o sobě důkaz účinnosti každé jednotlivé lokality, ale vytváří rozvojový rámec pro další úvahy o tom, kde by bylo možné uplatnit opatření s příznivým mikroklimatickým efektem. Navazující hodnocení teplotních charakteristik různých typů povrchu a biologický průzkum vybraných lokalit pak tento rámec doplňují o poznatky, které obecně podporují význam vegetačních úprav tramvajových tratí z hlediska snižování teplotní zátěže a zvyšování ekologické kvality městského prostředí.

Vedle mikroklimatického efektu se zároveň potvrzuje, že vegetační úpravy kolejíště mohou mít i širší ekologický význam. Pokud tramvajové těleso není tvořeno pouze tvrdými a biologicky chudými povrchy, ale obsahuje vegetační kryt, může vedle ochlazovací funkce plnit také roli specifického liniového stanoviště pro rostliny a další organismy. Právě propojení těchto dvou rovin – zmírnění tepelného ostrova a podpora biodiverzity – činí ze zelených tramvajových tratí opatření, které má v kontextu současných klimatických a urbanistických výzev praktický význam a měla by mu být věnována pozornost.

Závěrem lze konstatovat, že zelené tramvajové tratě představují v podmínkách města Brna smysluplný směr dalšího rozvoje dopravní infrastruktury, pokud je cílem nejen zachování dopravní funkce, ale i aktivní reakce na projevy městského tepelného ostrova. V situaci, kdy se města potýkají s rostoucím počtem horkých dnů, vyšší četností tepelných epizod a výraznou prostorovou nerovnoměrností teplotní zátěže, je vhodné zvažovat vegetační úpravy tramvajových tratí jako součást širší strategie klimatické adaptace městského prostoru.

Literatura

- [1] SZTURC, J., DOSTÁL, I., TIŠLEROVÁ, A. The Role of Green Tramways in Urban Ecology: Cooling Cities and Capturing Rain Water. *Geografické informácie*, 2026, in press.
- [2] JAKUBCOVÁ, E., HORVÁTHOVÁ, E. Costs and Benefits of Green Tramway Tracks. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 2020, 51(4), 99–106. DOI: 10.2478/sab-2020-0012.
- [3] SHAFIQUE, M., KIM, R., RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90, 757–773. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.006.
- [4] MOROŇ, D., BEIM, M., GUDOWSKA, A. et al. Evaluating tramway infrastructure on biodiversity and ecosystem services. *Scientific Reports*, 2024, 14, 9394. DOI: 10.1038/s41598-024-59460-2.
- [5] RENDEKOVÁ, A., MIČIETA, K., RANDÁKOVÁ, Z. et al. Flora of the tram tracks of Bratislava. *Urban Ecosystems*, 2020, 23(4), 875–891. DOI: 10.1007/s11252-020-00952-0.
- [6] WINKLER, J., KODA, E., ČERVENOVÁ, J. et al. Fragmentation and biodiversity change in urban vegetation: A case study of tram lines. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(5), 1734–1747. DOI: 10.1002/ldr.5017.
- [7] SIKORSKI, P., WIŃSKA-KRYSIAK, M., CHORMAŃSKI, J. et al. Low-maintenance green tram tracks as a socially acceptable solution to greening a city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35, 148–164. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.08.017.

- [8] MAJOR, Z., SZIGETI, C., CZÉDLI, H. M. "Green" Tram Tracks for the Sustainability of the Urban Environment. *Chemical Engineering Transactions*, 2023, 107, 289–294. DOI: 10.3303/CET23107049.
- [9] Český statistický úřad. *Charakteristika okresu Brno-město*. [online]. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/jhm/charakteristika_okresu_brno_mesto>.
- [10] Dopravní podnik města Brna. *Jízdní řády zastávek a linek*. [online]. Dostupné z: <<https://www.dpmb.cz/jizdni-rady-zastavek-linek>>.
- [11] Magistrát města Brna. Portál data Brno. [online]. Dostupné z: <<https://data.brno.cz/>>.
- [12] Magistrát města Brna. Mapový portál města Brna. [online]. Dostupné z: <<https://gis.brno.cz/>>.
- [13] Magistrát města Brna. Termální skenování Brna. [online]. Dostupné z: <<https://data.brno.cz/pages/termalni-skenovani-brna>>.
- [14] Český úřad zeměměřický a katastrální. Prohlížeč služba WMS – Ortofoto. [online]. Dostupné z: <geoportal.cuzk.cz>.
- [15] ROŽNOVSKÝ, J. Occurrence of tropical days in cities. In: *Public recreation and landscape protection - with environment hand in hand? Proceedings of the 17th Conference*. Brno, Mendelova univerzita v Brně, ISBN 978-80-7701-086-3. 2026, s. 272–276. DOI: 10.11118/978-80-7701-087-0-0272.
- [16] RADÁCSI, L., CZÉDLI, H., MAJOR, Z., SZIGETI, C. Grassed Tramway Tracks and Sustainable Urban Mobility: Integrating Nature-based Solutions in City Transport Infrastructure. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2026, 23(1). DOI: 10.12700/APH.23.1.2026.1.16.
- [17] RENDEKOVÁ, A., MIČIETA, K., HRABOVSKÝ, M. et al. Comparison of the differences in the composition of ruderal flora between conventional tram tracks and managed green tram tracks in the urban ecosystem of the city of Bratislava. *Hacquetia*, 2022, 21(1). DOI: 10.2478/hacq-2021-0020.
- [18] HLÁSNÁ ČEPKOVÁ, P., VÍTÁMVÁS, P., VYMYSLICKÝ, T., RAAB, S., HOLUBEC, V. Experimentální směsi rostlin pro ozeleňování tramvajových tratí a obratišť. *Nová Botanika*, 2023, 6(2), 24–31

Poděkování

Tento výzkum byl finančně podpořen z RVO č. 222018 „Integrované řešení ekologických tramvajových pásů pro adaptaci městské kolejové infrastruktury na klimatické výzvy“.

Contribution of Green Tram Track to Reducing the Urban Heat Island and Supporting Biodiversity

Jan Szturc^{1,3}, Jaroslav Rožnovský^{2,3}, Eva Navrátilová³

¹*Transport Research Centre*

Líšeňská 33a, 636 00 Brno

e-mail: jan.szturc@cdv.gov.cz

²*Czech Hydrometeorological Institute, Brno*

Kroftova 2578/43, 616 67 Brno

e-mail: jaroslav.roznovsky@chmi.cz

³*Mendel University in Brno, Faculty of Agronomy,*

Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

e-mail: xnavra15@mendelu.cz

Abstract

Green tram tracks represent a specific element of urban green infrastructure that integrates transport functions with environmental benefits. This study focuses on their role in mitigating the urban heat island effect and supporting biodiversity in urban environments. The first part of the study assesses the theoretical potential for greening tram tracks within the city of Brno based on a spatial evaluation of tram infrastructure and existing track surface types. The second part evaluates the thermal characteristics of different surface types directly within tram tracks, with particular emphasis on sections covered by vegetation, asphalt, aggregate, and concrete panels. The third part focuses on a biological survey of selected tram track sections and their importance as habitats for plants and other organisms.

The preliminary results from Brno indicate that vegetated tram tracks exhibit average summer surface temperatures approximately 10–15 °C lower than those of non-vegetated sections, while additional parts of the tram network show potential for future greening. The study thus presents green tram tracks as a multifunctional component of urban infrastructure capable of contributing to both improved urban microclimatic conditions and enhanced ecological quality of the urban environment.

Název:

Doprava, zdraví a životní prostředí

Vydalo:

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Líšeňská 33a Brno, Česká republika

Číslo vydání:

I. vydání

Rok, místo:

2026, Brno

ISBN 978-80-88655-77-0 (Online; pdf)



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