

Vliv jízdního režimu na emise polycyklických aromatických uhlovodíků v reálném provozu



Ing. Adam Poul
Centrum dopravního výzkumu v. v. i.
výzkumný pracovník



Ing. et Ing. Libor Špička
Centrum dopravního výzkumu v. v. i.
výzkumný pracovník

DOI:10.64720/SO.2026.01.AP01

Článek se zabývá vlivem jízdního režimu na emise polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) z výfukových plynů osobních automobilů v reálném silničním provozu. Měření byla realizována na vozidlech různých emisních kategorií a konstrukčních typů motorů, přičemž odběr vzorků probíhal na trase zahrnující městský, příměstský a dálniční provoz. Pozornost byla věnována zejména PAU vázaným na pevné částice, jejichž koncentrace byly analyzovány v závislosti na dynamice jízdy v různých jízdních režimech. Výsledky ukazují výrazné rozdíly v emisních profilech v závislosti na jízdním režimu a emisní normě, což má významné důsledky pro hodnocení environmentálních dopadů dopravy a návrh efektivních opatření ke snižování emisí škodlivin z reálného provozu.

Klíčová slova: polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), emise, doprava, reálná jízda, jízdní režim, izokinetický odběr vzorků

This article deals with the influence of driving mode on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from passenger car exhaust gases in real traffic conditions. Measurements were taken on vehicles of various emission categories and engine types, with sampling carried out on a route covering urban, suburban, and highway driving. Particular attention was given to PAHs bound to solid particles, whose concentrations were analyzed in relation to driving dynamics in different driving modes. The results show significant differences in emission profiles depending on the driving mode and emission standard, which has important implications for assessing the environmental impact of transport and designing effective measures to reduce pollutant emissions from real-world driving.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), emissions, transport, real driving, driving mode, isokinetic sampling

ÚVOD

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) jsou toxické látky, přičemž některé z nich jsou považovány za karcinogenní. Pro tyto škodlivé látky nebyly dosud dle platných emisních norem pro silniční vozidla nastaveny vhodné limity ve výfukových plynech. Zároveň chybí data o škodlivinách PAU z reálného provozu osobních vozidel. Emisní faktory, které jsou uvedeny v databázích [1, 2], pocházejí z měření ustálených režimů s konstantní rychlostí, nebo ze standardních emisních testů prováděných

na motorových zkušebnách, kde odpovídají průměrným hodnotám za celý test bez rozlišení různých fází (jízdních režimů). Proto autoři článku provedli unikátní výzkum na vybraném vzorku vozidel, a to odběr vzorků PAU navázaných na pevných částicích v různých jízdních režimech reálného provozu. Zatížení motoru a emise výfukových plynů se výrazně liší v závislosti na jízdním režimu – městském, mimoměstském a dálničním. Každý z těchto režimů klade na spalovací motor jiné nároky, což se odráží v množství a složení emisí PAU.

Měření emisí PAU navázaných na pevné částice ve výfukových emisích vozidel v reálném provozu je klíčové pro hodnocení zdravotních rizik a environmentálních dopadů dopravy. PAU vznikají při nedokonalém spalování uhlovodíkových paliv a jejich vysokomolekulární frakce (3–6 benzenových jader) se váže především na pevné částice (PM), čímž se zvyšuje jejich setrvačnost v ovzduší a schopnost pronikat hluboko do dýchacího systému [3], [4]. Dle zahraničního výzkumu prováděného pomocí dynamometru ve zkušebně bylo zaznamenáno, že nejvyšší koncentrace PAU byly při akceleraci, tedy při vysokém zatížení spalovacího motoru, zatímco při konstantní rychlosti byly nejnižší [5]. Zároveň bylo zjištěno, že z hlediska produkce emisí PAU velmi záleží na typu a konstrukci spalovacího motoru a druhu spalovaného paliva [6].

Ze širokého spektra látek zachycených na filtrech během testovacích jízd v reálném provozu byly podrobněji analyzovány ty, které jsou na základě Aarhuského protokolu o perzistentních organických znečišťujících látkách [7] používány při emisních inventurách dle rámcové úmluvy OSN o změně klimatu a Úmluvy o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (UNFCCC-CLRTAP). Jedná se o skupinu čtyř látek klasifikovaných jako PAU (benzo[b]fluoranten, benzo[k]fluoranten, benzo[a]pyren a indeno[1,2,3-cd]pyren), které se používají v metodice modelování emisí popsané v příručce EMEP/EEA pro inventarizaci emisí látek znečišťujících ovzduší [8] a také zároveň používané v softwaru COPERT, který se používá k vykazování emisí ze silniční dopravy v souladu s požadavky mezinárodních úmluv, protokolů a právních předpisů EU.

TESTOVACÍ TRASA

Pro zajištění srovnatelnosti jednotlivých výsledků je měření emisí v reálném provozu prováděno na identické trase a stejným řidičem. Za účelem stanovení emisních faktorů polycyklických aromatických uhlovodíků v různých jízdních režimech

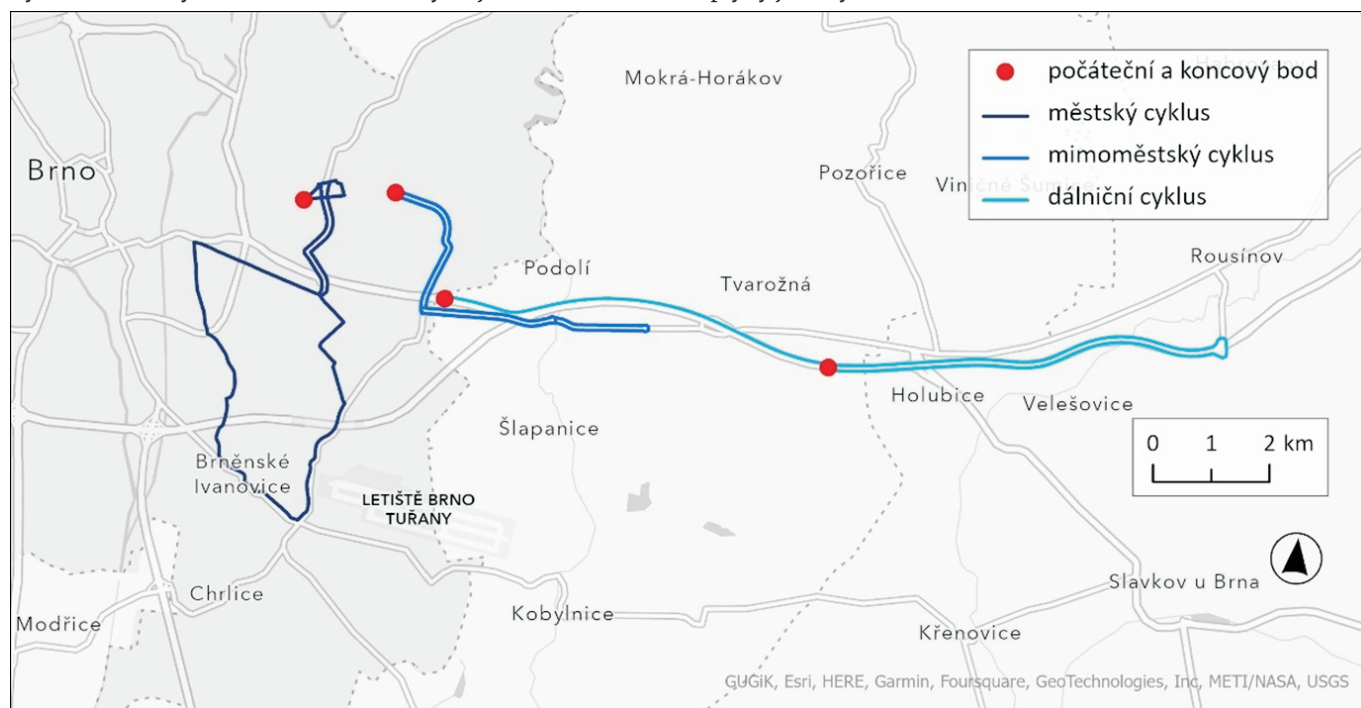
(město, mimo město a dálnice) byly vybrány tři trasy. Při jejich volbě bylo primární snahou zajistit, aby ideálně každá z nich, nebo alespoň dohromady splňovaly okrajové podmínky RDE cyklu, který je definován souborem požadavků na testovací trasu a mezních podmínek uvedených v Nařízení komise (ES) č. 2017/1151 [9]. Během měření jsou sledovány dynamické parametry jízdy a zatížení motoru a pokud dojde k zásadním odchylkám během měření, jízda se provede znovu.

Druhým zásadním požadavkem bylo, aby se do jednotlivých tras minimálně prolínaly ostatní dva jízdní režimy. Tzn. aby rychlost jízdy na jednotlivých trasách byla co nejméně mimo požadované rozmezí. Zvolené trasy jsou zobrazeny v mapě (obr. 1). U městské trasy, která měří 21,7 km se rychlost jízdy pohybuje během celé jízdy do 60 km·h⁻¹. Jízda na meziměstské trase je přerušována kruhovými objezdy. Průměrná délka trasy je 25,3 km. Z toho přibližně v 13,7 % jízdy rychlost klesá pod 60 km·h⁻¹. Dálniční trasa měří 20,1 km. Rychlost jízdy na této trase klesá pod 90 km·h⁻¹ pouze v místě obrátky. Pohyb rychlostí nižší než 90 km·h⁻¹ (v obrátce) představuje pouze cca 5,2 % jízdy.

MĚŘICÍ A LABORATORNÍ VYBAVENÍ

Měřicí trasa a průběh testovacích jízd jsou analyzovány s využitím dat získaných GPS data loggerem Racelogic VBOX 3i doplněným tříosým gyroskopem Racelogic IMU 04 nainstalovanými v testovaném vozidle. Parametry z řídicí jednotky jsou načítány pomocí přístroje OBDLink MX. Měřená data se bezdrátově přenáší do přenosného počítače umístěného ve vozidle a zaznamenávají v programu OBDwiz. U OBD dat je především sledován průběh zatížení motoru.

Měření emisí se provádí s využitím mobilního měřicího zařízení (obr. 2). Mobilní zařízení se připojuje za automobil pomocí běžného tažného zařízení. Při vlastním měření jsou výfukové plyny jímány do měřicího úseku. V zadní části měřicího úseku



obr. 1 Testovací trasy specifických jízdních cyklů



obr. 2 Mobilní měřicí zařízení

je izokineticky odebírán reprezentativní vzorek výfukových plynů pomocí patentované dvoudílné izokinetické sondy pro emisní měření.

Pro záchyt pevných částic z výfukových plynů a stanovení koncentrací PAU jsou používány filtry ze skelných mikrovláken (Whatman) o průměru 37 mm. Na každý jízdní režim byl použit nový filtr pro záchyt pevných částic a na ně vázaných polycyklických aromatických uhlovodíků. Z filtru jsou vyextrahovány organické látky do dichlormetanu (Chromservis) v extraktoru SER 158 (VELP Scientifica). Všechna použitá rozpouštědla měla čistotu pro HPLC-G, tedy určená pro metodu vysokoúčinné kapalinové chromatografie. Tento extrakt je poté zakonzentrován na objem 1 ml v zařízení TurboVap II (Biotage). Po zakonzentrování je extrakt přečištěn hexanem a dichlormetanem (Chromservis) na chromatografické skleněné koloně naplněné aktivovaným silikagelem (Sigma-Aldrich), převeden do toluenu (Chromservis) a znovu zakonzentrován na objem 1 ml. V takto zakonzentrovaném extraktu je stanovena koncentrace PAU na plynovém chromatografu GC Agilent 78908B vybaveném autosamplerem Agilent 7693A a hmotnostním detektorem Agilent 7010 GC/MS s trojitým kvadrupólem (Agilent Technologies). Jako nosný plyn slouží helium o čistotě 6.0 (SIAD). Separace analytů v plynovém chromatografu probíhá na kapilární koloně DB-EUPAH (Agilent Technologies) o délce 2×15 metrů se zpětným proplachem druhé kolony po ukončení analýzy při teplotním programu optimalizovaném pro stanovení PAU.

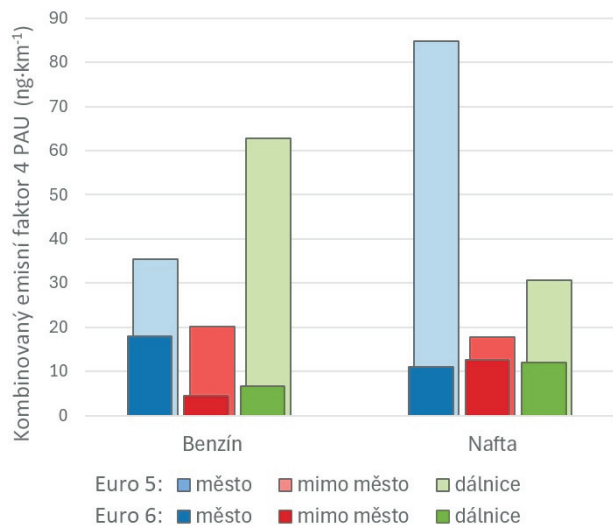
SROVNÁNÍ EMISÍ VYBRANÝCH PAU OSOBNÍCH VOZIDEL V SILNIČNÍM PROVOZU DLE JÍZDNÍHO REŽIMU

Vzorek testovaných vozidel zahrnoval zážehové (benzínové – BA) a vznětové (naftové – NM) motory s přímým i nepřímým vstřikováním paliva. Testovaná vozidla byla bez závad, v dobrém technickém stavu, který odpovídal jejich proběhům, což bylo prokázáno také kontrolou řídicích jednotek a rozboru oteřových kovů ve vzorcích motorových olejů. Konkrétněji jsou v testovaném vzorku obsažena vozidla členěná do následujících emisních kategorií:

- Euro 5: BA – 3 osobní automobily, najeto 99,3–188,6 tis. km
NM – 2 osobní automobily, najeto 113,1–237,2 tis. km
- Euro 6: BA – 3 osobní automobily, najeto 24,1–196,1 tis. km
NM – 5 osobních automobilů, najeto 33,1–178,8 tis. km

Výsledné průměrné emisní faktory PAU vázaných na částice u vozidel v členění podle typu paliva a emisní kategorie Euro, respektive jejich relativní srovnání, je patrné z grafu 1. Emisní faktor je veličina vyjadřující množství znečišťující látky, které

vozidlo vypustí z výfuku na jednotku provozní aktivity (v případě této studie $\text{ng}\cdot\text{km}^{-1}$). Tato veličina je používána k porovnání jednotlivých typů paliv a emisních kategorií vozidel. Přesné rozdílové hodnoty emisních faktorů jsou uvedeny v tab. 1.



graf 1 Kombinovaný emisní faktor 4 PAU dle UNFCCC-CLRTAP

tab. 1 Procentuální poklesy hodnot kombinovaného emisního faktoru PAU u kategorie vozidel Euro 6

	Jízdní režim		
	městský	mimoměstský	dálniční
pokles Euro 6, benzín (BA)	-49 %	-78 %	-89 %
pokles Euro 6, nafta (NM)	-87 %	-29 %	-61 %

Pokud porovnáme vozidla s benzínovým pohonem (BA) a naftovým pohonem (NM) emisní normy Euro 5, zjistíme zásadně nižší emisní faktor PAU u benzínových vozidel v městském režimu a naopak vyšší v dálničním. Naftová vozidla ve stejné emisní normě dosahují nižších emisních faktorů PAU v dálničním režimu oproti městskému. Tento jev je z velké části zapříčiněn rozdílnými technickými vlastnostmi vznětových a zážehových motorů a především rozdíly ve zpracování spalin ve výfukovém systému v emisní normě Euro 5. V emisní normě Euro 6 se ve sledované skupině vozidel objevil opačný trend.

U testované skupiny vozidel dosahovala nejvyššího emisního faktoru PAU naftová (NM) vozidla emisní kategorie Euro 5, a to více než sedminásobného oproti emisní kategorii NM, Euro 6. Tento jev může být pravděpodobně zapříčiněn tím, že testovaná vozidla se vznětovými motory z emisní kategorie Euro 5 (zejména Euro 5a) disponovala méně účinným filtrem pevných částic (DPF). Vozidla se vznětovým motorem spadající do emisní normy Euro 6 jsou vybavena účinnějším filtrem pevných částic (DPF) a zároveň disponují lepším teplotním řízením výfuku a novější technologií oxidačních katalyzátorů. Dalším možným vlivem je vyšší průměrný kilometrový proběh u vozidel se vznětovým motorem spadajících do emisní kategorie Euro 5.

Dvojnásobný emisní faktor PAU u benzínového (BA) pohonu v emisní kategorii Euro 5 je pravděpodobně zapříčiněn úplnou absencí filtru pevných částic (GPF) u většiny vozidel této emisní normy a vyšším průměrným kilometrovým proběhem. U emisní

normy Euro 6 je znatelný pokles, a to v důsledku povinné výbavy vozidel systémem filtrace pevných částic (GPF) a masivnějšího rozšíření systému start-stop v těchto vozidlech. Tato povinnost výbavy zařízením GPF u benzínových vozidel nastala v září 2018, tedy od vstoupení emisní normy Euro 6c v platnost [10].

ZÁVĚRY

Z prezentovaných výsledků měření emisí v reálném provozu je patrný trend snižování nelimitovaných složek emisí PAU očekávaným vývojovým směrem (zpřísněním) emisních norem Euro. Je třeba mít na paměti, že se jednalo o vzorek vozidel s průměrným zastoupením lehce nad 3 vozidla v každé sledované skupině. Jediné vozidlo s výrazně vyšší hodnotou emisního faktoru tedy znatelně ovlivní výsledek. Je důležité v daném výzkumu dále pokračovat a postupně rozšiřovat vzorek testovaných vozidel, aby byl zajištěn reprezentativní, statisticky významný vzorek vozového parku provozovaného na našem území.

Z výsledků také vyplývá, že nejvýraznější průměrné rozdíly emisních faktorů mezi vozidly plnicími emisní standardy Euro 5 a 6 se

obvykle projevují v městském a dálničním provozu, tedy v režimech s extrémními nároky na hnací ústrojí a odlišnými teplotními profily výfuku společně se systémem zpracování spalin. Ve městě časté rozjezdy z klidu a krátké akcelerace zvyšují okamžité zatížení motoru a snižují účinnost systému následného zpracování spalin, což obecně vede k vyšším emisím. Na dálnici je zatížení motoru dáno především aerodynamickým odporem, který roste přibližně s druhou mocninou rychlosti (a potřebný výkon s třetí mocninou), což se promítá do vyšší spotřeby paliva a specifických emisních projevů. V důsledku toho se rozdíl mezi technologiemi potřebnými pro splnění požadavků na nízké emise (např. teplotní management a strategie obohacení palivem u zážehových motorů, řízení EGR a regenerace filtrů pevných částic u vznětových motorů) nejvíce projevují právě v těchto okrajových provozních režimech.

Poděkování

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

LITERATURA

- [1] Ntziachristos, L., 2023. Air pollutant emission inventory guidebook 2023. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>.
- [2] ATEM. MEFA 13. Verze 1.0.7 [software]. 2013. Dostupné z: <https://www.atem.cz/mefa.php>
- [3] Debbarma, S., Rajeev, P., Gupta, T. a Phuleria, H. C., 2025. Characteristics, emission factors, and health risks of vehicular polycyclic aromatic hydrocarbons. *Npj Clean Air* [online]. Springer Science and Business Media, 2025-4-7, 1(1) [cit. 2025-11-06]. ISSN 3059-2240. Dostupné z: [doi:10.1038/s44407-025-00005-w](https://doi.org/10.1038/s44407-025-00005-w)
- [4] Zheng, X., Wu, Y., Zhang, S., Hu, J., Zhang, K. M., Li, Z., He, L. a Hao, J., 2017. Characterizing particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from diesel vehicles using a portable emissions measurement system. *Scientific Reports* [online]. Springer Science and Business Media, 2017-8-30, 7(1) [cit. 2025-11-06]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: [doi:10.1038/s41598-017-09822-w](https://doi.org/10.1038/s41598-017-09822-w)
- [5] Wei, H., Guangbin, L., Yong, T. a Qin, Z., 2015. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from different types of motor vehicles' exhaust. *Environmental Earth Sciences* [online]. Springer Science and Business Media, 2015-5-29, 74(7), 5557-5564 [cit. 2025-11-06]. ISSN 1866-6280. Dostupné z: [doi:10.1007/s12665-015-4570-9](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4570-9)
- [6] Špička, L., Poul, A., Huzlík, J., Bucková, M., Hegrová, J. a Ličbinský, R., 2024. Comparison of high mileage LPG cars in different technical condition in Czechia: Particle-bound PAHs. *Atmospheric Environment: X* [online]. 23 [cit. 2025-11-07]. ISSN 25901621. Dostupné z: [doi:10.1016/j.aeaoa.2024.100294](https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100294)
- [7] Protocol to the 1979 convention on long-range transboundary air pollution on persistent organic pollutants. Aarhus: UNECE, 1998. Dostupné z: <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-persistent-organic-pollutants-pops>.
- [8] Ntziachristos, L., 2023. Air pollutant emission inventory guidebook 2023. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>.
- [9] Nařízení Komise (ES) č. 2017/1151 ze dne 1. června 2017 kterým se doplňuje nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č. 715/2007 o schvalování typu motorových vozidel z hlediska emisí z lehkých osobních vozidel a z užitkových vozidel (Euro 5 a Euro 6) a z hlediska přístupu k informacím o opravách a údržbě vozidla, mění směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES, nařízení Komise (ES) č. 692/2008 a nařízení Komise (EU) č. 1230/2012 a zrušuje nařízení Komise (ES) č. 692/2008. In: Úřední věstník. Evropská unie, 2017, ročník 60, L175.
- [10] ČESKÝ ROZHLAS, 2018. Kvůli nové emisní normě dostanou filtry pevných částic i auta na benzin [online]. [cit. 2025-11-27]. Dostupné z: <https://zelenavlna.rozhlas.cz/kvuli-nove-emisni-norme-dostanou-filtr-pevných-částic-i-auta-na-benzin-7916412>

Lektorský komentář

Autoři prezentují výsledky pilotní studie srovnávající emisní faktory polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) zachycených na povrchu prachových částic v závislosti na jízdním režimu, typu pohonné jednotky a emisní kategorii. I s ohledem na malý počet testovaných vozidel s benzínovou a naftovou pohonnou jednotkou byly pozorovány významné rozdíly v kombinovaných emisních faktorech karcinogenních PAU jednak mezi městským a dálničním provozem, ale zejména mezi emisními třídami Euro 5 a Euro 6. Diskuse zahrnující vysvětlení rozdílů v emisních faktorech přináší v oblasti studia emise PAU do složek životního prostředí nové otázky, které by měly být předmětem dalších experimentů prováděných v reálném provozu. Uvedené výsledky by měly sloužit v dlouhodobém kontextu také k nastavení emisních limitů pro PAU ve výfukových zplodinách, jež doposud nejsou regulovány.

RNDr. Tomáš Pluháček, Ph.D.
Univerzita Palackého v Olomouci