

Emise z lodní dopravy v oblasti Plavební komory Smíchov

Studie a měření provedené pro městskou část Praha 5



Michal Vojtíšek, Jan Skácel, Vít Beránek, Martin Pechout
Fakulta strojní, ČVUT v Praze

Jakub Ondráček
Ústav chemických procesů AV ČR

Praha 2017

Shrnutí

Spalovací motory používané v plavidlech (jeden nebo více hnacích motorů, jeden nebo více pomocných agregátů např. pro výrobu elektrické energie) jsou podstatným zdrojem výfukových emisí částic a oxidů dusíku podél plavebních cest.

Oproti silničním vozidlům historicky platily a platí pro lodní motory méně přísné emisní limity. Navíc je u lodí průměrné stáří motorů vyšší, technický stav horší, a emise nejsou předmětem pravidelných kontrol. Z těchto důvodů emise částic oproti silničním vozidlům v přepočtu na kg paliva výrazně vyšší. Nízké zatížení motorů v oblasti plavební komory vede k vyšším měrným emisím zejména semivolatilní složky částic, která je spojena s většinou toxických efektů částic z naftových motorů na lidský organismus.

Měření koncentrací částic a oxidů dusíku provedená v oblasti plavební komory poukázala na to, že mezi motory jsou podstatné rozdíly co do stáří i technického stavu. Mnohé motory viditelně kouří, což je zjevnou známkou neuspokojivého technického stavu.

Lze očekávat, že v oblasti plavební komory je zhoršená kvalita ovzduší, obdobně jako podél horších případů frekventovaných silnic. Relativně velmi vysoké koncentrace částic (počet částic v cm³ vzduchu) byly zaznamenány ve velině plavební komory a rovněž v blízkosti přístaviště lodí.

Velmi vysoké emise mohou být částečně kompenzovány relativně příznivými rozptylovými podmínkami.

Poznámka: Měření celkové hmotnostní koncentrace částic nemusí být průkazné, protože příspěvek uhlíkatých částic, ač ze zdravotního hlediska podstatný, k celkové hmotnosti je relativně malý. Rovněž tak jednorázová měření v bytech apod. nemusí být průkazná, protože situace je velmi závislá na aktuálních rozptylových podmínkách.

Technologické řešení alespoň podstatné části problému je známo, a alespoň někteří provozovatelé mají snahu problém řešit. Některé lodě již byly, z vlastního podnětu a na vlastní náklady provozovatelů, vybaveny novými motory s podstatně nižší spotřebou paliva i emisemi. Lze očekávat, že velmi podstatného snížení emisí lze dosáhnout v první řadě zlepšením technického stavu (opravy, pečlivá údržba). Dalšího podstatného snížení emisí lze dosáhnout buď náhradou motorů za novější s nižšími emisemi, nebo dodatečnou montáží filtrů částic. (Lze uvažovat o výjimce pro dobové motory plavidel historické hodnoty.) Pro ověření technického stavu je třeba provádět průběžné/pravidelné technické/emisní kontroly. Emisní kontroly nejsou prováděny a pravděpodobně ani nejsou vyžadovány legislativou.

Emise malých rekreačních plavidel měřeny nebyly z důvodu jejich velmi malého výskytu v plavební komoře, nicméně na základě dostupných poznatků lze konstatovat, že většina malých plavidel, i novějšího data výroby, je vybavena z emisního hlediska poměrně primitivní technologií motorů (například dvoudobé motory bez katalyzátoru byly používány v automobilech Trabant, známých charakteristickým kouřem a zápachem), a takové motory mají proto na kg paliva nepoměrně vyšší emise oproti silničním vozidlům.

Poznámka: Tato studie se zabývá pouze výfukovými emisemi z motorů. Neřeší emise z kuchyní (charakteristický zápach ze smažení bývá zaměňován za spalování fritovacích olejů v motorech), ani hlukové emise, ani jakékoli další otázky týkající se lodní dopravy.

Úvod: Emise ze spalovacích motorů a jejich rizika

Spalovací motory pohánějící většinu silničních dopravních prostředků a pojezdých strojů jsou považovány za jeden z hlavních zdrojů jak skleníkových plynů, tak znečišťujících látek škodlivých pro životní prostředí a zejména lidské zdraví. Částice emitované spalovacími motory (benzinovými i naftovými) jsou velmi jemné, nejčtenější zastoupení mají částice o velikostech desítek nanometrů^{1 2 3}. Tyto částice, o velikosti jednotek až desítek nanometrů, mají schopnost pronikat až hluboko do plic, kde jsou s relativně vysokou účinností zachycovány v plicních sklípcích⁴, mají schopnost pronikat buněčnou membránou do krevního oběhu, včetně průniku placentou do plodu, a obsahují složitou směs látek, ze kterých u mnohých byl prokázán rakovinotvorný účinek (zejména např. benzo[a]pyren, 1-nitropyren, 3-nitro-benz[a]benzantron)⁵. Výfukové emise ze vznětových motorů byly deklarovány jako karcinogenní Kalifornským úřadem pro ochranu ovzduší (CARB)⁶, Úřadem pro nemoci z povolání a ochranu zdraví USA (OSHA)⁷, Světovou zdravotní organizací (WHO), a Mezinárodním panelem pro výzkum rakoviny (IARC)⁸.

Na rozdíl od velkých stacionárních zdrojů vybavených komíny jsou emise ze spalovacích motorů vypouštěny v bezprostřední blízkosti obyvatel. Částice z motorů tak představují většinu částic, měřeno dle celkového počtu, vyskytujících se v „dýchací“ výšce v obydlených oblastech (Štolcpartová 2015)^{Error! Bookmark not defined.}. **Dlouhodobý pobyt v blízkosti (do 50-200 m) frekventovaných silnic (10 tisíc nebo více vozidel denně) byl identifikován např. jako jedna z příčin vyššího rizika infarktu⁹.**

Tyto částice jsou výrazně rizikovější pro lidské zdraví než částice z jiných zdrojů¹⁰. Snížení koncentrací velmi jemných částic elementárního uhlíku, dominantní součásti výfukových plynů vznětových motorů, má 4-9x vyšší přínos pro lidské zdraví než stejné snížení koncentrací PM_{2.5}¹¹. Obdobně lze očekávat, že zvýšení koncentrací částic v důsledku zvýšení intenzity silniční dopravy by mělo 4-9x vyšší dopad na zdraví, než obecné zvýšení koncentrace částic.

Velká část karcinogenního potenciálu je tvořena velmi rizikovými látkami, které jsou obsaženy v relativně malém množství – jedná se zejména o vícejaderné (polycyklické) aromatické uhlovodíky (PAU), z nichž jedním z nejvíce rizikových je benzo(a)pyren (dále jen „BaP“).

Vznětové motory dále produkují oxidy dusíku (NO_x), z nichž oxid dusičitý (NO₂) je dráždivý a ve vyšších koncentracích toxický. Oxidy dusíku se podílejí na tvorbě přízemního ozonu, který poškozuje vegetaci a organismy. Motorová vozidla dále produkují částice vznikající otěrem brzd a pneumatik, a způsobují rozvíření prachu již usazeného na vozovce či v její blízkosti (sekundární prašnost).

Dle statistik Evropské komise mají částice a troposférický ozon (obojí z velké části z dopravy) na svědomí přes 400 tisíc předčasných úmrtí ročně v EU, což je řádově více v porovnání s dopravními nehodami (39 tisíc ročně). V České Republice dle studie¹² Státního zdravotního ústavu způsobují částice 7379 (Puklová 2013), dopravní nehody pak okolo 600 (statistiky Policie ČR 2014-2017) předčasných úmrtí ročně.

U dětí od 10 do 18 let věku bylo vystavení jemným částicím (PM_{2.5}) a oxidu dusičitého (NO₂) spojeno s chronickými negativními vlivy na vývoj plic a s následným významným zvýšením výskytu významného snížení kapacity plic (množství vydechnutého vzduchu v první sekundě výdechu, FEV₁) v dospělosti¹³.

Koncentrace velmi jemných částic nelze snížit obdobnými opatřeními jako hluk nebo jako hrubý prach; v exponovaných oblastech i v automobilech vnitřní koncentrace velmi jemných částic kopírují koncentrace vnější.

Emise nejsou rovnoměrně rozloženy ani napříč vozovým parkem, ani podél trasy pohybu vozidla nebo stroje. Naopak je známo, že velká část celkových emisí částic pochází z relativně malého počtu motorů s vysokými, často nadměrnými emisemi, a v případě jednotlivých vozidel, že velká část celkových emisí částic na dané trase pochází z relativně krátkých úseků či period s vysokými emisemi. To je v souladu s poznatkem, že emise částic spalovacích motorů jsou výrazně ovlivněny kvalitou návrhu, konstrukce, výroby, seřízení, údržby a obsluhy daného motoru, provozními a klimatickými podmínkami, palivem, a dalšími faktory.

Specifika lodních motorů a jejich emisí

To platí i pro plavidla, povětšinou osobní výletní lodě, pohybující se v oblasti Plavební komory Smíchov. Lodní motory vnitrozemských plavidel musí dle směrnice Evropského parlamentu 2016/802 používat motorovou naftu obdobné kvality jako silniční motory (nesmějí tedy být provozovány na naftu s vysokým obsahem síry nebo na těžká paliva), technologie motorů je tak obdobná jako u silničních motorů, nicméně je třeba zmínit několik specifík.

Za prvé, **emisní limity pro nově vyráběné lodní motory vždy byly výrazně vyšší (tj. méně přísné)** oproti nejen silničním vozidlům, ale také některým druhům nesilničních motorů například ve stavebních strojích.

Za druhé, **životnost lodních motorů** je zpravidla oproti silničním motorům vyšší, proto je vyšší i průměrné stáří motoru. Lze se proto důvodně domnívat, na základě těchto dvou argumentů, že emise lodních motorů budou, při srovnatelné úrovni kvality údržby a srovnatelných provozních podmínkách, oproti silničním motorům výrazně vyšší.

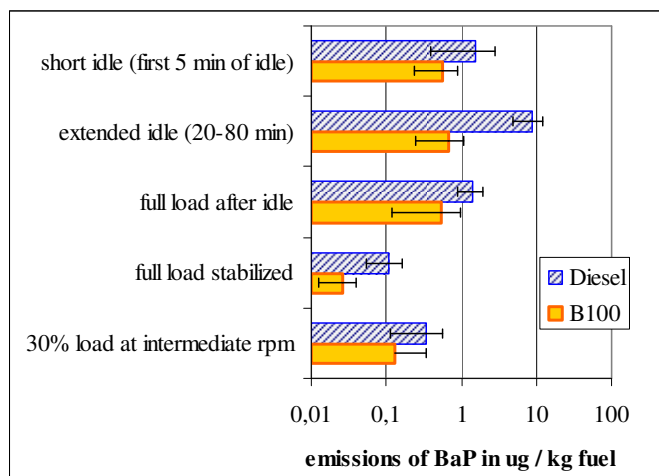
Za třetí, oproti silničním vozidlům mají plavidla výhodu v tom, že **nejsou produkovány emise z otěrů brzd a pneumatik ani sekundární emise** (resuspenze částic z povrchu vozovky a jejího okolí). Tato výhoda platí pro celkové emise částic, je však minimální pro emise BaP, kterým dominují výfukové emise, zatímco z otěrů a resuspenze jsou tyto emise nízké.

Za čtvrté, z důvodu, že velká část emisí částic pochází z relativně malého počtu motorů s vysokými emisemi, byly u silničních vozidel zavedeny pravidelné emisní (a technické) kontroly, jejichž cílem je nalézt (identifikovat) vozidla (motory) s vysokými emisemi, a těmto do doby jejich uvedení do řádného technického stavu nedovolit provoz. Takovéto kontroly však u lodních motorů zcela absentují. Lze se proto domnívat, že **motory s nadměrnými emisemi se mezi lodními motory vyskytují ve vyšší míře, a jejich relativní příspěvek k celkovým emisím je tak vyšší**, oproti silničním motorům.

Za páté, **provozní podmínky motorů v oblasti plavební komory jsou velmi nepříznivé**. Při manévrování v plavební komoře a čekání před plavební komorou a zpravidla i v ní jsou motory provozovány delší dobu na volnoběh, což je z hlediska tvorby rakovinotvorných emisí pro vznětový motor velmi nepříznivý provozní režim. Motor totiž pracuje s velkým přebytkem vzduchu – teploty výfukových plynů jsou kolem 100 °C (oproti 500-600 °C při maximálním výkonu) – čímž dochází k ochlazení spalovacího prostoru a zhoršování spalování. (Dochází také k ochlazení katalytických zařízení, pokud je jimi motor vybaven – v případě výletních osobních lodí v Praze je tomu tak ovšem zřídka.) Tím dochází nejen k navýšení celkového množství emisí částic, ale i ke zhoršení kvality částic z hlediska zvýšení obsahu rizikových PAU, včetně BaP. Pro nesilniční motor bez katalytických zařízení pro úpravu výfukových plynů byl tento jev popsán v článku Vojtíšek a kol. (2015)¹⁴. Zatímco během plného zatížení byly emise BaP v řádu 0,1 ug na kg paliva, v prvních několika minutách volnoběhu byly v řádu 1 ug/kg, tj. o řád vyšší, a mezi dvacátou a šedesátou minutou volnoběhu byly 10 ug/kg, tj. o řád vyšší než na začátku volnoběhu, a o dva řády (stonásobně)

vyšší než během provozu na plné zatížení. Dle stejné studie delší volnoběh také zvyšuje emise BaP během následného provozu na plné zatížení. To je v souladu s vyššími emisemi PAU při pojezdu v koloně, popsanými dalšími autory. Ravindra¹⁵ uvádí, že městské oblasti s vysokou intenzitou dopravy a s výskytem kongesce podporují vysoké emise PAU. Karavalakis¹⁶ uvádí, že emise PAU se zvyšují se snižující se rychlostí vozidla. Shah¹⁷ uvádí, že u nákladních vozů byly emise PAU při pomalé jízdě v kongesci desetinásobně vyšší oproti jízdě vyšší ustálenou rychlostí. Mezi extrémní případy se řadí oblast hraničního přechodu USA-Kanada, kde cca 4 tisíc kamionů denně pojíždějí ve frontě na odbavení, a kde byly v přilehlé lokalitě výrazně navýšeny počty obyvatel s astma, s výskytem astma v desítkách procent (!) domácností¹⁸.

Vzhledem k výše uvedenému lze proto očekávat, že emise částic, a ještě vyšší mírou emise BaP, budou v oblasti plavební komory (a zřejmě také v blízkosti přístavišť a jinde kde relativní zatížení hnacích motorů je malé) oproti jiným plavebním úsekům vyšší, a to pravděpodobně výrazně.



Obr. 1: Graf z publikace Vojtíšek a kol., Atmospheric Environment 2015: Emise BaP v mikrogramech na kg paliva pro (zezhora dolů): během prvních pěti minut volnoběhu, po 20 minutách volnoběhu, během plného zatížení po dlouhém volnoběhu, během trvalého plného zatížení, a při 30% zatížení.

Malá plavidla používají benzinové motory. Závěsné motory a motory tzv. vodních skútrů nebo tzv. motorových vodních lyží, u kterých je požadavek na vysoký výkon při malé hmotnosti, jsou často dvoudobé, čtyřdobé motory jsou pak často provozovány s přebytkem paliva. V obou případech jsou poměrně vysoké emise semivolatilních sloučenin, které jsou vázané na emitované částice. Emisní vlastnosti většiny takových motorů pak odpovídají dnes již zastaralým silničním motorům nalézáných v „předrevolučních“ automobilech (emisní třída Euro 0).

Orientační měření podél plavební dráhy výletních lodí

Pro zjištění skutečného stavu bylo dne 7. října 2016 v odpoledních a večerních hodinách provedeno orientační měření přenosným difúzním klasifikátorem částic (DiscMini, Testo, Německo), který na základě měření elektrického náboje částic na dvou detektorech s různou citlivostí v závislosti na velikosti částice poskytuje údaje o průměru částic (pro průměr velmi malých částic jsou používána odlišná měřítka, v tomto případě se jedná o průměr měřený dle mobility v elektrickém poli) a střední velikosti částic. Příklad byl ručně nesen po následující trase: autobusem MHD ze zastávky Waltrovka na autobusové nádraží Na Knížecí, odtud pěšky k řece Vltavě, podél Janáčkova nábřeží (relativně hustý silniční provoz), podél levého břehu Vltavy přes Kampu, přes Mánesův most na pravý břeh Vltavy k Rudolfinu, odtud podél pravého břehu a podél přístaviště výletních lodí až ke Štefánikovu mostu, zpět k Čechovu

mostu, tramvají ze zastávky Staroměstská do zastávky Národní divadlo (úsek s velmi hustým silničním provozem), přes most Legií (rovněž hustý silniční provoz), podél náplavky pod mostem Legií až k mříži uzavírající přístup do oblasti Plavební komory Smíchov, zpět, podél Janáčkova nábřeží na Dětský ostrov, odtud směrem k ulici Zborovská, odkud jsem pokračoval tramvají přes most Legií, Národní třídu, a ulicemi Vodičkova a Jindřišská (omezený provoz motorových vozidel). Měření tak pokrylo oblasti, kde hnací motory plavidel jsou provozovány na volnoběh nebo malý výkon (podél PK Smíchov, podél náplavky mezi Čechovým mostem a Štefáníkovým mostem) i kde jsou provozovány na vyšší výkon při plavbě po otevřené řece (mezi mostem Legií a Mánesovým mostem), rovněž tak měření pokrylo oblasti s vyšší intenzitou automobilové dopravy (Janáčkovo nábřeží, Smetanovo nábřeží, most Legií) i oblasti s omezenou intenzitou motorových vozidel (Kampa, ulice Vodičkova a Jindřišská).

Rozptylové podmínky byly příznivé, a obecně koncentrace, nebyl-li v blízkosti zdroj částic, byly relativně nízké, kolem 10 tis. částic na cm^3 .

Výsledky měření jsou vyneseny na obr. 2.

Prakticky všechny nejvyšší naměřené hodnoty – zejména hodnoty nad 100 tis. částic na cm^3 , tj. desetinásobek „pozadí“ – byly spojeny s výskytem plavidel. (Výjimku tvoří koncentrace na mostě Legií, kdy v bezprostřední blízkosti cca 3 m projel akcelerující motocykl, a vzhledem ke zjevně nadměrnému hluku u jinak relativně nového stroje považuji za pravděpodobné, že se jednalo o stroj s nadměrnými emisemi v důsledku legislativou neschválených úprav).

V případě náplavky pod Čechovým mostem v rozmezí cca 17:45-18:15 se jednalo mnohdy o statisíce částic na cm^3 , což považuji za poměrně vysoké koncentrace vzhledem k nejméně desetimetrové vzdálenosti od zdroje, poměrně příznivým rozptylovým podmínkám, a mírného větru podél Vltavy.

Rovněž tak v případě měření pod mostem Legií kolem a krátce po 19. hodině se jedná o velmi vysoké koncentrace, pocházející zřejmě z lodí čekající na vplutí a vplouvajících do plavební komory Smíchov. Ve většině případů, kdy jsem naměřil vysoké koncentrace, jsem rovněž zaznamenal čichem charakteristický pach spalin ze staršího naftového motoru nebo okem viditelný kouř bílé-šedé-černé barvy.

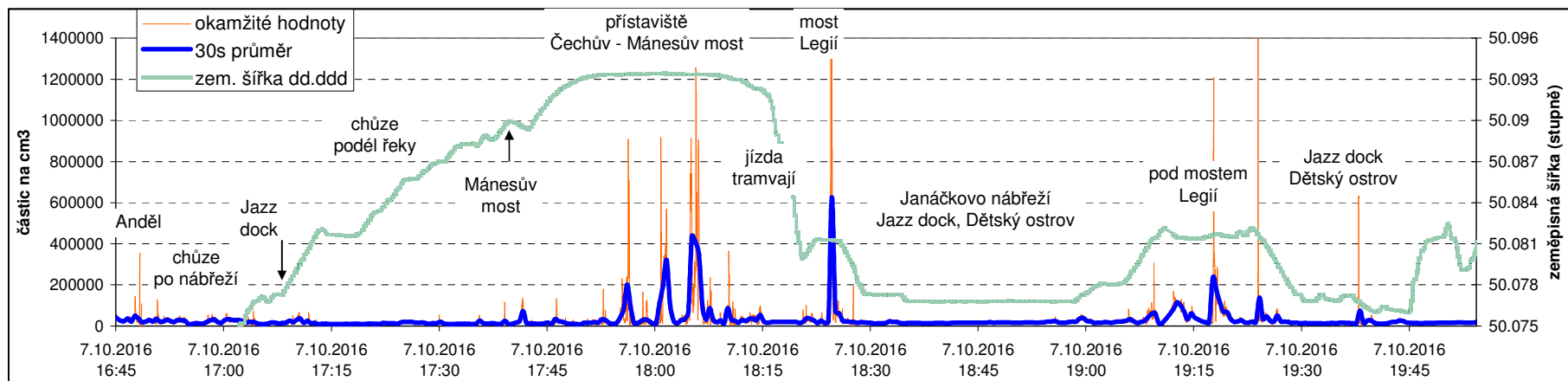
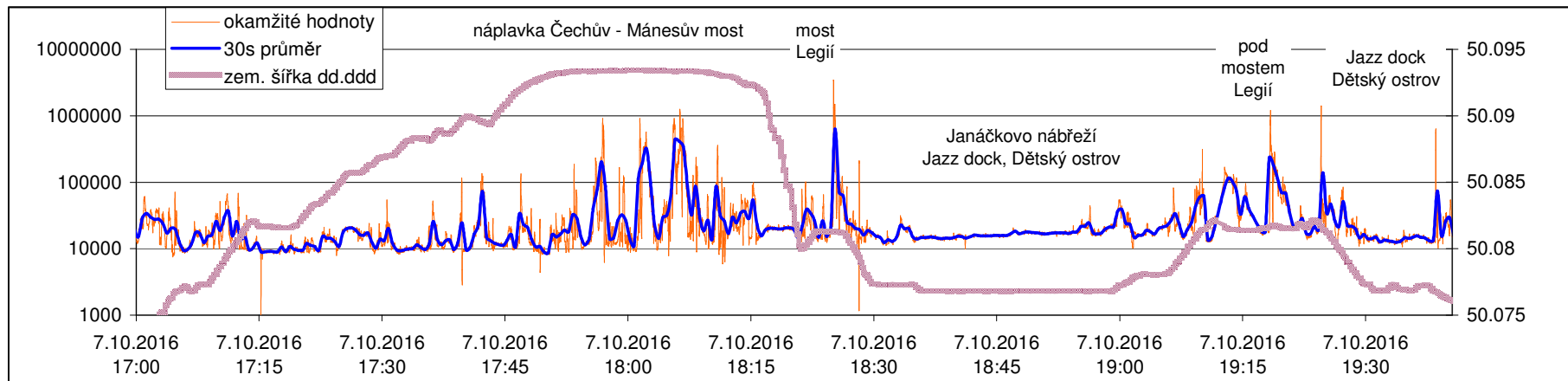
Na základě pozorování i výsledků měření lze vyslovit domněnku, že tak jako u silničních vozových parků, velký podíl na celkových emisích, a na naměřených koncentracích, má poměrně malá část plavidel. Oproti silničním vozidlům však byl zaznamenán pozorování okem i přístroji výrazně vyšší výskyt viditelného kouře, který je spojen s provozem motorů s vysokými emisemi.

Koncentrace částic v blízkosti manévrujících plavidel byly oproti hodnotám naměřenými na chodnicích podél komunikací s vysokou intenzitou automobilové dopravy velmi vysoké, a to i přesto, že vzdálenost od plavidel byla vyšší než u automobilů.

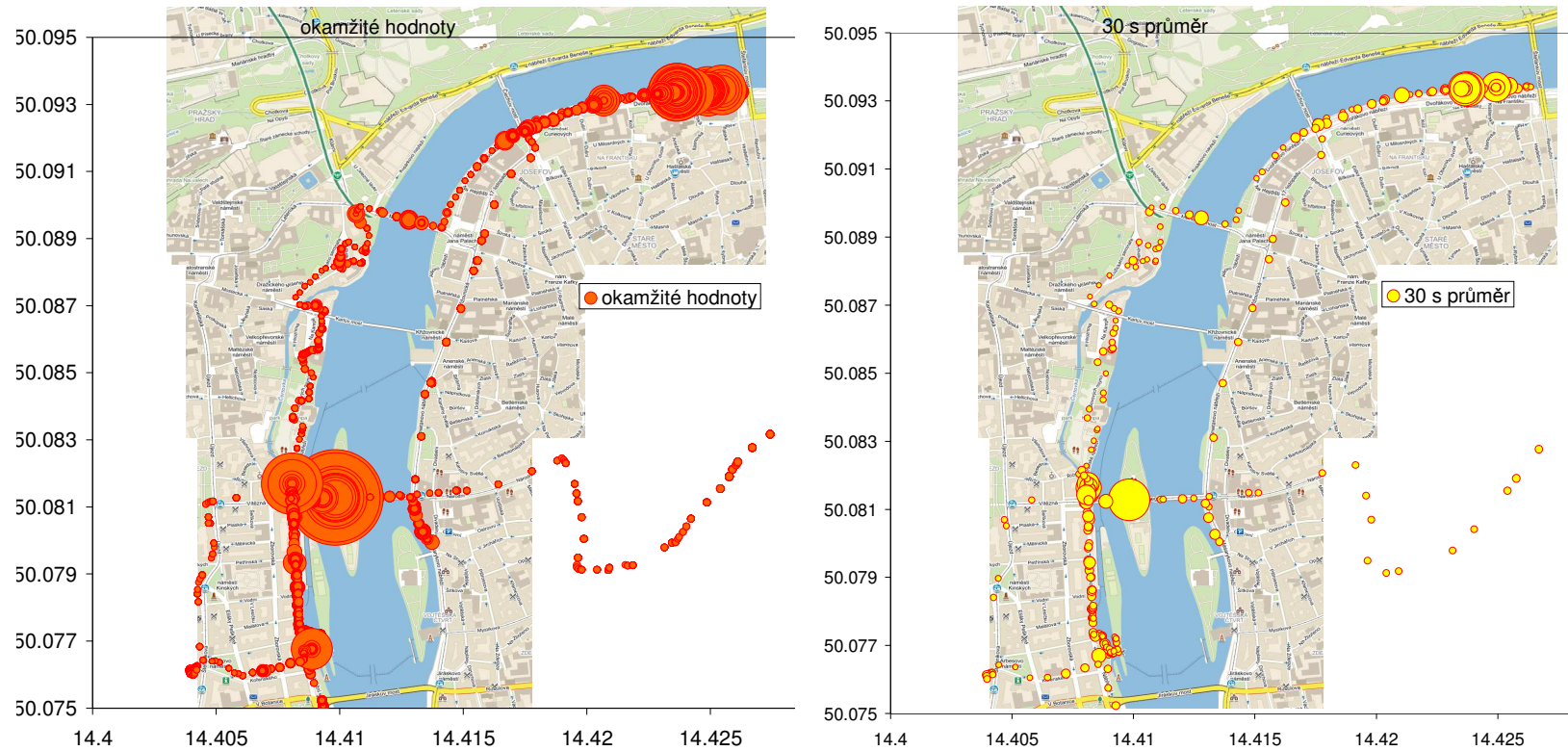
Rozložení výskytu částic pocházejících z plavidel, a jejich výrazný výskyt podél náplavky a v oblasti manévrování před (ve směru plavby) PK Smíchov, pak potvrzuje předpoklad, že emise částic jsou výrazně horší při provozu na nízký výkon.

Měření BaP nebylo provedeno, protože jej není možné přenosnou aparaturou provést. (Přenosnou aparaturou lze odebrat vzorek, který lze následně analyzovat plynovou nebo kapalinovou chromatografií. Množství vzorku, které je potřeba na stanovení BaP, je však poměrně vysoké, a vzorků by tak bylo možné odebrat jen malý počet.)

Ač jsou měření pouze orientační, a nelze z nich vyvodit kvantifikované údaje, tato měření dokládají, že "výletní" plavidla jsou významným zdrojem částic v oblasti jejich plavby.



Obr. 2: Koncentrace částic v ovzduší ve výšce cca 1,0-1,5 m vynesené v logaritmickém měřítku (nahore) a (stejná data) na klasické lineární ose (dole). Typické „městské pozadové“ koncentrace (např. vilová čtvrť mimo frekventované silnice) jsou v tisících částic na cm³, typické koncentrace podél frekventovaných silnic v desetitisících, ve špičkách statisících částic na cm³.



Obr. 3: Okamžité koncentrace (měřené po 1 s) a třicetisekundové průměrné koncentrace v závislosti na poloze. Vysoké koncentrace nad Střeleckým ostrovem jsou důsledkem průjezdu upraveného motocyklu cca 1 m od přístroje, všechny ostatní vysoké koncentrace podél Vltavy jsou prakticky výhradně důsledkem provozu výletních lodí. Kontrast mezi silniční a lodní dopravou lze nejlépe pozorovat porovnáním koncentrací na náplavce mezi Čechovým a Mánesovým mostem, kde je přístaviště lodí, a na Smetanově nábřeží, kde v odpoledních a večerních hodinách projíždějí kolony automobilů.

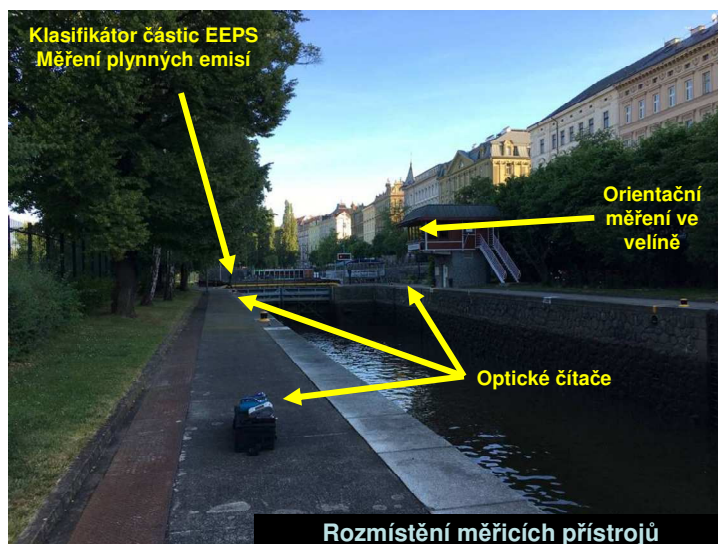
Měření v oblasti Plavební komory Smíchov

Na základě výsledků těchto měření byla provedena série měření v oblasti Plavební komory Smíchov. Měření se sestávala z měření koncentrací částic podél plavební komory a měření koncentrací částic ve vzduchu v blízkosti projíždějících lodí a byla doplněna měřením koncentrací částic ve velině plavební komory.

Orientační měření bylo provedeno dne 8.6.2017 v oblasti Dětského ostrova. Koncentrace částic se pohybovaly od cca 15-20 tisíc částic na cm^3 ($\#/ \text{cm}^3$), což lze považovat za "požadovou" úroveň, do stovek tisíc $\#/ \text{cm}^3$, což je srovnatelné s koncentracemi v bezprostřední blízkosti velmi frekventovaných křižovatek a komunikací. Vyšší koncentrace částic byly spojeny s přítomností lodí v oblasti plavební komory, avšak ne vždy přítomnost lodí vyvolala vyšší koncentrace částic.

Pro další měření byl domluven přístup do areálu plavební komory, kde proběhla měření ve dnech 22.8., 24.8., 29.8., 7.9. a 26.9., vždy ve večerních hodinách, kdy je provoz nejvyšší.

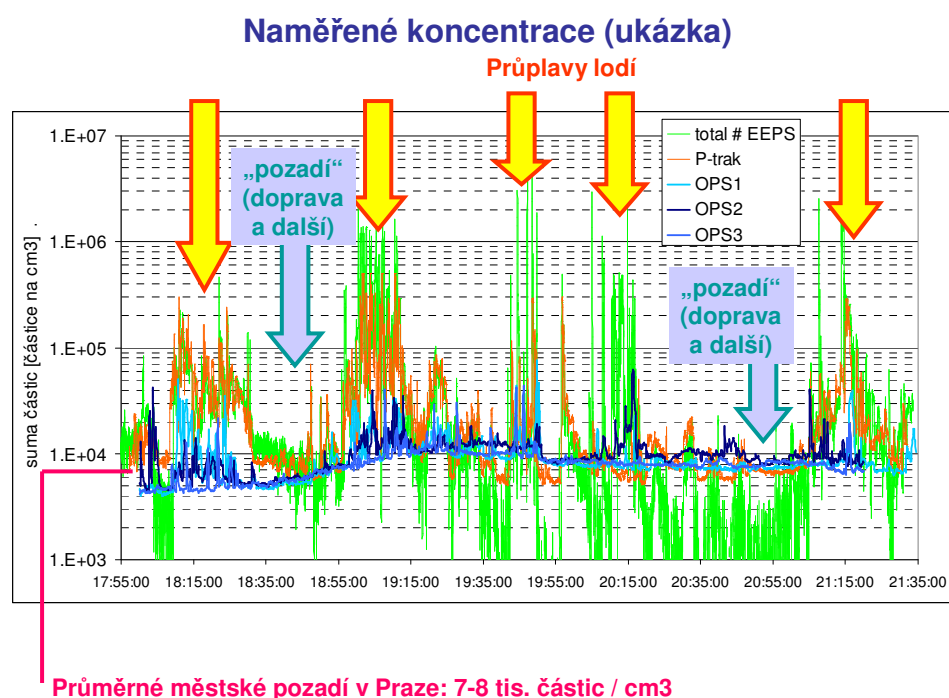
Měření koncentrací částic podél plavební komory



Obr. 4: Rozmístění měřicích přístrojů v oblasti PK Smíchov

Koncentrace částic byly měřeny sadou aerosolových spektrometrů (optické čítače, kondenzační čítač a na závěr i skenovací třídič pohyblivosti částic a aerodynamický třídič částic). Měření byla prováděna v průběhu letní turistické sezóny formou měřicích kampaní (celkem 6) v době předpokládané největší frekvence pohybu lodí v plavební komoře Praha-Smíchov – t.j. ve večerních hodinách.

Tato měření jsou popsána v samostatné zprávě dr. Jakuba Ondráčka z Ústavu chemických procesů Akademie věd ČR, pod jehož vedením měření probíhala, a zde jsou pouze krátce shrnuta. Rozmístění měřicích přístrojů je na obr. 4. Ukázková data jsou pak vynesena na obr. 5. Tabulka 1 sumarizuje průměrné a maximální hodnoty celkových početních koncentrací a hmotnostních koncentrací PM_{2,5} a PM₁₀.



Obr. 5: Ukázková data měření koncentrací částic v areálu Plavební komory Smíchov, rozmístění přístrojů viz. obr. 4.

Tab. 1: Průměrné a maximální hodnoty celkových početních koncentrací a hmotnostních koncentrací PM_{2,5} a PM₁₀ pro jednotlivé měřicí kampaně.

Datum	P-Trak [#/cm ³]		DustTrak [mg/m ³]			
			PM _{2,5}		PM ₁₀	
	Průměr	Maximum	Průměr	Maximum	Průměr	Maximum
8.6.2017	28756	266000	0.023	0.633	0.028	0.641
22.8.2017	27052	>500000	0.029	0.863	0.033	0.868
24.8.2017	27337	>500000	0.032	0.431	0.033	0.433
29.8.2017	35945	>500000	0.039	0.360	0.040	0.361
7.9.2017	11701	372000	0.012	0.170	0.013	0.217
26.9.2017	19328	>500000	0.060	0.513	0.063	0.526

Z výsledků vyplývá, že ve čtyřech z šesti kampaní byly zaznamenány průměrné koncentrace vyšší, než odpovídá národnímu (zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší) a evropskému (2008/50/EU) limitu 25 ug/m^3 pro roční průměr $\text{PM}_{2.5}$, a **ve všech případech byly zaznamenány průměrné koncentrace $\text{PM}_{2.5}$, které jsou několikanásobkem limitu 10 ug/m^3 doporučené Světovou zdravotnickou organizací (WHO)**. Nelze hovořit o překročení limitu v legislativním slova smyslu, protože měření byla provedena jinou metodou než předepsanou pro legislativní měření, a nebyla prováděna nepřetržitě po celý rok, aby bylo možné jednoznačně roční průměr vyčíslit, nicméně hodnoty jsou poměrně vysoké na to, že byly naměřeny za relativně teplého a příznivého počasí.

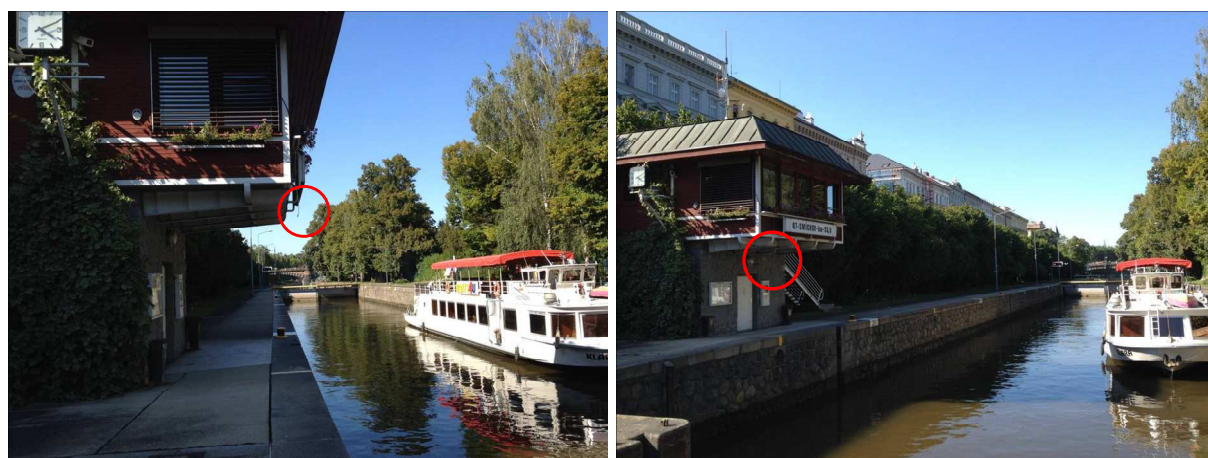
Z hlediska měření počtu nanočástic se měřené hodnoty také pohybovaly o několik řádů výše než je běžné v případě městského prostředí ovlivněného dopravou – obecně se průměrné početní koncentrace částic v městském prostředí pohybují řádově v jednotkách až desítkách tisíc částic v cm^3 , v případě městské pozadové stanice ÚCHP (Praha-Suchdol) je několikaletá průměrná hodnota měření celkových početních koncentrací $7\,000 \text{ \#/cm}^3$.

Měřené koncentrace v dané lokalitě jsou samozřejmě ovlivněny i ostatními zdroji v daném prostředí – t.j. dopravou a dalšími případnými zdroji. Vlastní měření je také samozřejmě ovlivněno konkrétní meteorologickou situací. V případech kdy bylo převládající proudění směrem od měřících přístrojů k plavební komoře nebo podél plavební komory, samozřejmě není možné provést detailní charakterizaci zdrojů a přímo přiřadit emise proplouvajícím lodím. V některých případech také proto ne zcela souhlasí časy průjezdu jednotlivých lodí se zvýšenými koncentracemi. Nicméně především z dlouhodobého kontinuálního měření je zcela zřejmé, že proplouvající lodě značně zvyšují koncentrace částic v ovzduší a tak negativně ovlivňují kvalitu ovzduší v dané lokalitě.

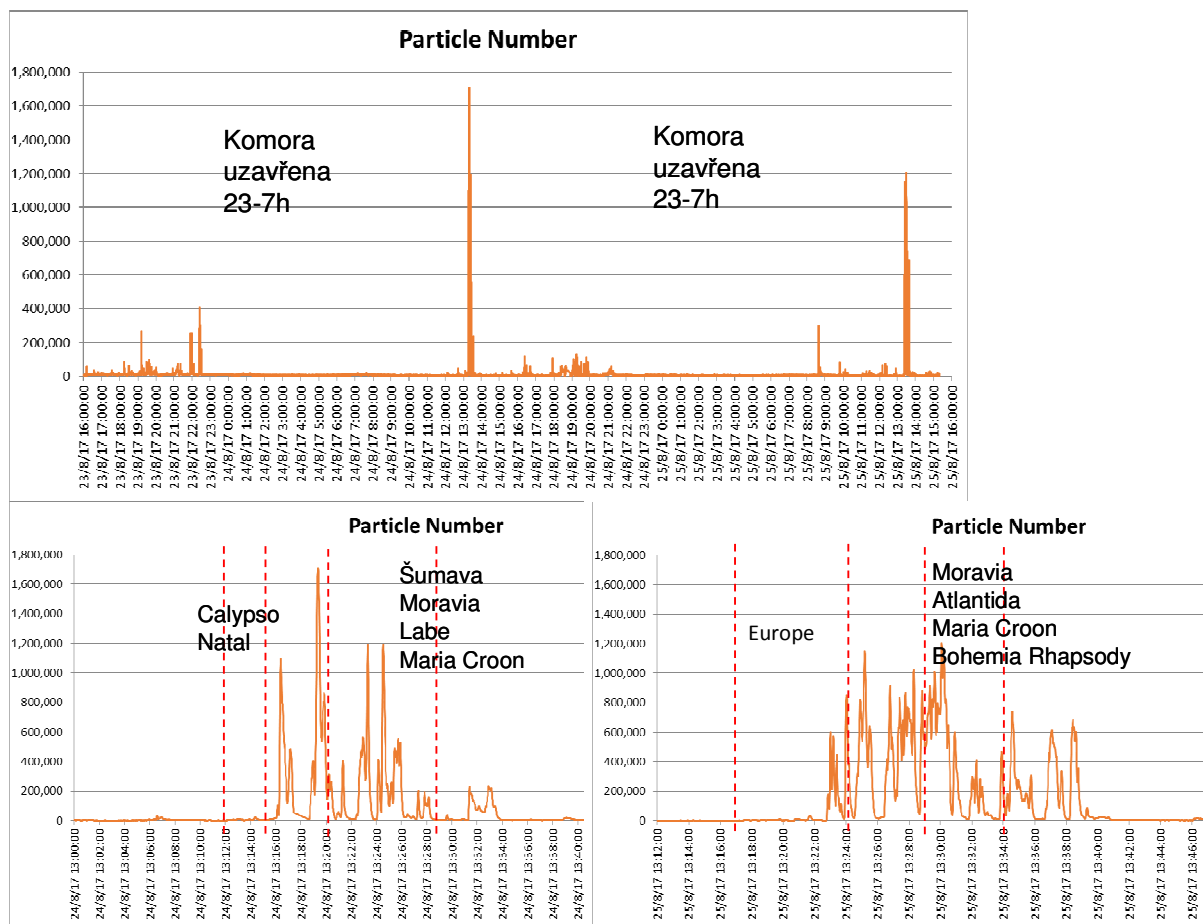
V této souvislosti je nutné vést v patrnosti, že ne všechny lodě ale přispívají k tomuto znečištění stejnou měrou.

Měření koncentrací částic ve velíně plavební komory

Měření ve velíně byla provedena z toho důvodu, že **se jedná o místnost obývanou obsluhou velína. Velín tak představuje místo, ve kterém lze očekávat, že jsou pracovníci zplodinám z lodí dlouhodobě vystaveni**. Měření byla provedena přístrojem DiscMini, který měří celkové početní koncentrace částic. Umístění sondy přístroje je na fotografii na obr. 6. Měření proběhla nepřetržitě od 23.8.2017 16:00 do 25.8.2017 16:00.



Obr. 6: Umístění sondy přístroje DiscMini na velíně Plavební komory Smíchov



Obr. 7: Koncentrace částic ve velině Plavební komory Smíchov

Naměřené koncentrace jsou vyneseny na obr. 7. Z grafu v horní části obrázku je patrné, že koncentrace byly velmi nízké v období 23:00-07:00, kdy je plavební komora uzavřena, a že v denním období byly v koncentracích částic značné výkyvy. Relativně vysoké koncentrace byly naměřeny 24.8. a 25.8. v období 13:00-13:40, pro které jsou vyneseny v dolní části obrázku detaily. Pro tato období jsou v grafu poznamenána jména plavidel, která v uvedenou dobu komorou proplula.

Měření koncentrací částic v blízkosti proplouvajících plavidel

Tato studie je jedna z pilotních studií pro prvotní koncept alternativní metodiky pro detekci vozidel s nadměrnými emisemi v provozu. Pro provozní měření plynných znečišťujících látek jsou již desetiletí používány spektrometry s optickou dráhou napříč vozovkou, známé jako Remote Sensing Device (Bishop 1989)¹⁹. Tímto způsobem však prakticky nelze měřit malé částice, které jen velmi omezeně utlumují (pohlcují a rozptylují) světelný paprsek. Velmi malé částice lze naopak úspěšně detekovat kondenzačními čítači a elektrometry. Kondenzační čítače jsou již využívány pro kontroly motorů ve Švýcarsku (Bischof 2015)²⁰, přičemž malé ruční přístroje na bázi difúzního nabíjení částic a následné měření náboje odevzdaného částicemi elektrometrem (Fierz a kol., 2011²¹ a 2014²²) jsou již běžně používané pro atmosférické studie. Hallquist a kol. (2013)²³ sledovali částice z autobusů poháněných naftou a zemním plynem přístroji umístěnými podél dráhy průjezdu autobusu po zkušebním okruhu. Bishop a kol. (2015)²⁴ měřili kondenzačním čítačem koncentrace částic ve sběrném potrubí umístěném ve stanu, kterým projížděly nákladní vozy.

V této studii je ověřován koncept měření přístroji s rychlou odezvou, které odebírají vzorek z bezprostřední blízkosti projíždějících vozidel. Je uvažován výsledek v emisích na kg paliva, který lze porovnat s emisními limity Euro.

Koncentrace částic byly měřeny klasifikátorem, který třídí částice dle jejich ekvivalentního průměru dle mobility v elektrickém poli (částice jsou značně nepravidelného a složitého tvaru, jejich velikost je proto dána tzv. ekvivalentním průměrem hypotetické kulovité částice, která má stejnou určitou vlastnost, v tomto případě mobilitu nabitě částice v elektrickém poli). Použit byl přístroj Engine Exhaust Particle Sizer, model 3090, TSI, St. Paul, Minnesota, USA, který měří početní koncentrace částic ve velikostních kategoriích 5-560 nm. Koncentrace plyných znečišťujících látek byly měřeny infračerveným spektrometrem s Fourierovou transformací (FTIR, model I-Series, Midac, Irvine, California, USA, Michelsonův interferometr, MCT detektor chlazený kapalným dusíkem, ZnSe optika, délka optické dráhy 6 m, pracovní teplota 121 °C), který měří absorbní spektra v oblasti 4000-700 cm^{-1} (2,5-14 μm) se spektrálním rozlišením 0,5 cm^{-1} . Ze čtyřech skenů byla vypočtena absorbní spektra, která byla následně vyhodnocena pro koncentrace CO_2 a dalších látek, ze kterých NO a CO byly nalezeny v detekovatelné míře.

Přístroje byly napojeny na 6 m nerezovou trubici, která byla po průjezdu jednotlivých lodí snížena nad vodní hladinu tak, aby do přístrojů byl přiváděn vzorek s co nejvyšší koncentrací výfukových plynů. Fotografie měřicí aparatury je na obr. 8.

Pro plynné látky bylo stanoveno pozadí jako 0,2 percentil naměřené hodnoty během kampaně, a toto bylo od naměřených koncentrací odečteno. Pro zjednodušení bylo předpokládáno, že vyšší koncentrace CO_2 jsou výhradně důsledkem spalování nafty v pomocných a hnacích motorech projíždějících lodí, že motorová nafta obsahuje 86% hmotnostních uhlíku, a že veškerý uhlík v palivu byl přeměněn na CO_2 (s předpokládanou nejistotou vzniklou tímto zjednodušením cca 1-2%).

Podělením naměřených koncentrací částic ekvivalentním množstvím paliva v cm^3 vzorku, vypočteném na základě těchto předpokladů, byly vypočteny emisní faktory vyjádřené jako emise částic na kg paliva.

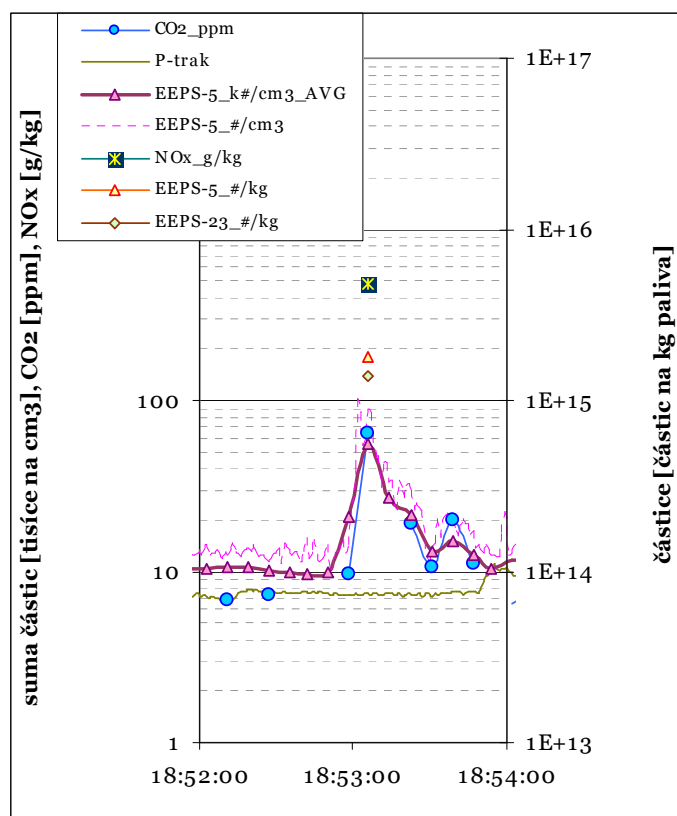


Obr. 8: Měřicí aparatura – klasifikátor částic a FTIR spektrometr (vlevo) a detail měření emisí projíždějící lodě (vpravo).

Ukázka odezvy přístrojů na proplutí lodě je na obr. 9. Zatímco mezi 18:52 a 18:53 přístroje měří víceméně pozadřové koncentrace, po 18:53 následuje výrazné zvýšení koncentrace částic z řádově 10 na řádově 100 tisíc částic na cm³, toto zvýšení je pozorováno ale jen nad hladinou, protože souběžně měřící kondenzační čítač p-trak i nadále vykazuje 7-8 tisíc částic na cm³. Zároveň je pozorována vyšší koncentrace CO₂, cca 70 ppm, oproti max. 10 ppm (nad koncentrací odečtenou jako pozadřová). Podělením příspěvku ke koncentracím částic příspěvkem ke koncentracím CO₂ lze vyčíslit emise částic na kg CO₂, což již lze přepočítat na kg paliva.

Pro výpočet částic bylo uvažováno několik měřítek – celkový počet částic větších než 5 nm, celkový počet částic větších než 23 nm (limity pro počet částic Euro 6 a Euro VI jsou pro počet nevolatilních částic větších než 23 nm, či správněji, měřených tak, že částice o velikosti 23 nm má 50% pravděpodobnost být detekována), a celková hmotnost.

Hmotnost částic byla vypočtena z velikostních distribucí, přičemž byly uvažovány dva odlišné způsoby výpočtu hmotnosti částic, oba popsané, s odkazy na zahraniční studie, v práci Vojtíšek a kol. (2015)²⁵: Konstantní hustota 0,8 g/cm³, což odpovídá spíše „kulatějším“ částicím spíše připomínající kapičky, způsob zde označený *1, a hustota klesající s průměrem částice (interpolace dat ze studií Park a kol.^{26,27}), což odpovídá shlukům uhlíkatých částic s nepravidelným fraktálním tvarem, zpravidla pozorovatelných jako „černé saze“, způsob zde označený *2.



Obr. 9: Ukázka odezvy přístrojů na proplutí plavidla a výpočtu emisních faktorů.

Emise z jednotlivých průjezdů lodí jsou vyčíslené v Tab. 2.

Ne u všech plavidel se podařilo emise vyčíslit, a ne vždy bylo možné jednoznačně přiřadit vyčíslené emise konkrétnímu plavidlu. I tam, kde je přiřazení pravděpodobné, není zřejmé, ze kterého nebo kterých z motorů provozovaných na plavidle emise pocházejí.

Souhrnné výsledky pro všech 109 měření jsou v Tab. 3.

Tab. 2: Emisní faktory jednotlivých lodí. Kromě faktorů přiřazených jednotlivým plavidlům tabulka obsahuje i měření, která nebylo možné přiřadit.

datum	čas otevření komory	čas otevření vrat	směr	příjezd měřicím místem	identifikace plavidla	čas měření	částice > 5 nm, počet na kg paliva	částice > 23 nm, počet na kg paliva	částice, mg na kg paliva *1	částice, mg na kg paliva *2	NOx, g na kg paliva
22.8.2017	17:51		d	17:51	Cecilie-05607630						
22.8.2017		18:00	d	18:00	Cecilie-05607630						
22.8.2017				18:05							
22.8.2017	18:10		n	18:09	Taurus-105919						
22.8.2017				18:10							
22.8.2017			n	18:10	Klára-104259						
22.8.2017			n	18:10	Odra-101685						
22.8.2017			n	18:11	Blanik-04305610						
22.8.2017			n	18:13	Taurus-105919						
22.8.2017		18:21	n	18:22	Klára-104259	18:22:13	1.91E+15	1.59E+15	1221	749	18
22.8.2017			n	18:23	Taurus-105919	18:22:42	2.31E+15	1.77E+15	1157	719	37
22.8.2017			n	18:24	Odra-101685	18:24:08	2.41E+15	1.73E+15	947	601	0
22.8.2017			n	18:25	Blanik-04305610	18:24:51	1.41E+15	8.50E+14	802	459	40
22.8.2017	18:24		n	18:25	Moravia-100100						
22.8.2017			n	18:26	Calypto-100081						
22.8.2017		18:27	n	18:30	Moravia-100100	18:29:55	2.10E+15	1.34E+15	444	273	57
22.8.2017			n	18:31	Calypto-100081	18:30:39	1.04E+15	6.98E+14	695	373	44
22.8.2017	18:38		n	18:38	TR 567-101 377						
22.8.2017		18:45	n	18:38	TR 567-101 377	18:40:44					
22.8.2017	18:50		d	18:50	Klára-104259	18:52:03					
22.8.2017		18:57	d	18:56	Klára-104259						
22.8.2017	18:59		d	18:56	Taurus-105919	18:56:52	2.26E+15	2.07E+15	2209	1304	43
22.8.2017			d	18:57	Blanik-04305610						
22.8.2017			d	18:58	Calypto-100081						
22.8.2017			d	18:59	Moravia-100100						
22.8.2017						19:00:29					
22.8.2017						19:00:58	1.11E+16	8.80E+15	967	862	57
22.8.2017						19:01:27	2.35E+16	1.95E+16	1812	1772	43
22.8.2017						19:06:16					
22.8.2017						19:06:29					
22.8.2017						19:10:34					
22.8.2017						19:10:45					
22.8.2017						19:11:04	9.10E+15	7.98E+15	1419	1114	49
22.8.2017		19:08	d	19:10	Taurus-105919						
22.8.2017			d	19:11	Blanik-04305610						
22.8.2017			d	19:11	Moravia-100100						
22.8.2017			d	19:12	Calypto-100081						
22.8.2017	19:25		n	19:17	Hamburk-101705						
22.8.2017			n	19:19	Europe-32101472						
22.8.2017			n	19:20	Valencia-107423						
22.8.2017			n	19:21	Maria Croon-04307310						
22.8.2017			n	19:25	Classic River-05604820						
22.8.2017			n	19:27	Cecilie-05607630						
22.8.2017		19:41	n	19:42	Hamburk-101705	19:41:51	6.91E+14	5.48E+14	541	309	67
22.8.2017			n	19:43	Valencia-107423	19:42:36	1.99E+15	1.86E+15	2075	1234	47
22.8.2017			n	19:45	Europe-32101472	19:44:43	6.31E+15	3.92E+15	2297	1404	150
22.8.2017			n	19:46	Maria Croon-04307310	19:46:10	1.64E+15	1.24E+15	728	434	0
22.8.2017			n	19:46	Classic River-05604820	19:46:25	1.11E+15	7.51E+14	655	363	0
22.8.2017			n	19:48	Classic River-05604820	19:48:35	4.10E+15	3.89E+15	5431	3036	28
22.8.2017			n	19:49	Cecilie-05607630	19:49:47	1.86E+14	1.69E+14	220	125	39
22.8.2017	19:56		d	19:56	Explorer - 111 362	19:56:45	1.28E+16	9.40E+15	965	862	94
22.8.2017		20:04	d	20:04	Explorer - 111 362						
22.8.2017	20:07		d	20:00	Hamburk-101705						
22.8.2017			d	20:05	Valencia-107423	20:05:10	9.90E+15	9.67E+15	25541	13430	98
22.8.2017			d	20:08	Cecilie-05607630	20:08:17	1.44E+15	1.37E+15	985	639	32
22.8.2017						20:11:40	1.45E+15	1.36E+15	1018	661	53
22.8.2017						20:12:25	2.57E+15	2.45E+15	1855	1203	0
22.8.2017						20:15:18	1.21E+15	1.14E+15	957	608	0
22.8.2017						20:16:30	2.07E+15	1.95E+15	1636	1047	34
22.8.2017		20:15	d	20:16	Hamburk-101705						
22.8.2017			d	20:17	Valencia-107423						
22.8.2017			d	20:18	Cecilie-05607630						
22.8.2017	20:26		n	20:25	Lužnice-101623						
22.8.2017			n	20:26	Šumava-101550						
22.8.2017		20:37	n	20:39	Lužnice-101623	20:38:08					
22.8.2017			n	20:40	Šumava-101550	20:39:49					
22.8.2017	20:39		n	20:39	Bohemia Rhapsody-04812050						
22.8.2017		20:43	n	20:46	Bohemia Rhapsody-04812050						
22.8.2017	21:14		d	20:57	Classic River-05604820						
22.8.2017			d	20:58	Maria Croon-04307310						
22.8.2017			d	20:59	Corsiva						
22.8.2017			d	21:08	Bohemia Rhapsody-04812050	21:08:06	3.22E+15	2.25E+15	1416	921	61
22.8.2017			d	21:14	Šumava-101550	21:13:59	1.12E+16	7.43E+15	2070	1425	63
22.8.2017						21:15:11	3.76E+15	2.70E+15	829	565	26
22.8.2017						21:15:55	3.86E+15	2.94E+15	939	636	32
22.8.2017						21:16:23	2.60E+15	1.98E+15	675	450	38
22.8.2017						21:18:19	2.80E+15	2.13E+15	744	493	0
22.8.2017		21:25	d	21:26	Classic River-05604820	21:26:02	1.29E+15	1.05E+15	537	342	52
22.8.2017			d	21:27	Bohemia Rhapsody-04812050						
22.8.2017			d	21:28	Maria Croon-04307310						
22.8.2017			d	21:29	Šumava-101550						
22.8.2017			d	21:30	Corsiva	21:29:54	1.02E+15	7.70E+14	431	266	0

datum	čas otevreni komory	čas otevreni vrat	směr	príjezd měřicím místem	identifikace plavidla	čas měření	částice > 5 nm, počet na kg paliva	částice > 23 nm, počet na kg paliva	částice, mg na kg paliva *1	částice, mg na kg paliva *2	NOx, g na kg paliva
24.8.2017				17:15							
24.8.2017				18:02							
24.8.2017	18:16		n	18:04	Vltava-101835						
24.8.2017			n	18:11	Odra-101685						
24.8.2017			n	18:12	Blaník-04305610						
24.8.2017			n	18:15	Czechie-32105827						
24.8.2017		18:32	n	18:33	Vltava-101835	18:34:18	4.01E+15	3.28E+15	2220	1375	
24.8.2017						18:34:37	2.38E+15	1.81E+15	913	526	
24.8.2017			n	18:34	Odra-101685	18:35:57	5.56E+15	4.38E+15	4300	2741	
24.8.2017											
24.8.2017			n	18:35	Blaník-04305610						
24.8.2017			n	18:37	Czechie-32105827	18:37:54	3.11E+15	2.17E+15	18	10	36
24.8.2017			n	18:38	Klára-104259	18:38:37	6.97E+15	6.01E+15	156	87	67
24.8.2017			n	18:38	Hamburk-101705	18:39:04	5.18E+15	4.36E+15	291	169	67
24.8.2017						18:39:04	5.18E+15	4.36E+15	291	169	67
24.8.2017	18:41		d	18:40	112003	18:42:12	1.34E+16	9.95E+15	239	136	81
24.8.2017			d	18:41	Explorer - 111 362						
24.8.2017		18:48	d	18:48	112003						
24.8.2017			d	18:48	Explorer - 111 362						
24.8.2017	19:03		d	18:59	Klára-104259						
24.8.2017			d	19:00	Blaník-04305610						
24.8.2017			d	19:01	Hamburk-101705	19:01:20	3.79E+15	3.37E+15	124	66	44
24.8.2017			d	19:03	Czechie-32105827	19:05:04	6.54E+15	5.97E+15	149	102	95
24.8.2017						19:11:01	2.77E+15	2.46E+15	1819	1233	61
24.8.2017						19:13:01	3.24E+15	2.80E+15	541	345	119
24.8.2017						19:16:45	9.83E+15	9.07E+15	127	81	80
24.8.2017						19:17:44	4.32E+15	3.86E+15	106	59	42
24.8.2017						19:19:08	3.20E+15	2.84E+15	300	184	40
24.8.2017		19:12	d	19:14	Klára-104259						
24.8.2017			d	19:15	Blaník-04305610						
24.8.2017			d	19:15	Hamburk-101705						
24.8.2017			d	19:16	Czechie-32105827						
24.8.2017	19:39		n	19:22	Maria Croon-04307310						
24.8.2017			n	19:24	Classic River-05604820						
24.8.2017			n	19:25	Natal-102141						
24.8.2017			n	19:27	Bohemia Rhapsody-04812050						
24.8.2017			n	19:29	Elbis-104434						
24.8.2017			n	19:31	Sumava-101550						
24.8.2017						19:24:56	2.25E+15	1.40E+15	3727	2212	
24.8.2017						19:26:30	4.14E+15	3.48E+15	1169	694	75
24.8.2017						19:26:38	4.34E+15	3.63E+15	1385	822	123
24.8.2017						19:26:45	4.84E+15	4.06E+15	1442	856	141
24.8.2017						19:27:03	6.86E+15	5.77E+15	2204	1308	151
24.8.2017		19:46	n	19:47	Maria Croon-04307310						
24.8.2017			n	19:48	Natal-102141	19:49:09	4.56E+15	3.94E+15	1402	832	109
24.8.2017			n	19:50	Classic River-05604820	19:51:06	1.95E+16	1.73E+16	452	268	65
24.8.2017			n	19:51	Elbis-104434	19:51:56	2.47E+15	1.74E+15	776	460	71
24.8.2017			n	19:52	Bohemia Rhapsody-04812050	19:54:14	5.28E+15	3.05E+15	1723	1023	0
24.8.2017			n	19:53	Sumava-101550	19:55:29	5.40E+15	3.34E+15	1284	762	123
24.8.2017						19:56:20	4.82E+15	3.15E+15	573	340	31
24.8.2017						19:56:29	4.95E+15	3.03E+15	902	536	107
24.8.2017	20:03		d	20:02	Cecillie-05607630	20:02:56	1.80E+15	1.42E+15	504	299	114
24.8.2017						20:03:05	2.02E+15	1.43E+15	1819	1080	0
24.8.2017						20:03:42	2.74E+15	1.26E+15	2047	1215	0
24.8.2017		20:10	d	20:10	Cecillie-05607630						
24.8.2017	20:12		d	20:09	Natal-102141						
24.8.2017			d	20:10	401166						
24.8.2017		20:19	d	20:19	Natal-102141						
24.8.2017			d	20:22	401166						
24.8.2017	20:29		n	20:26	Porto-101648						
24.8.2017			n	20:28	Praha-101706						
24.8.2017			n	20:29	Lužnice-101623						
24.8.2017			n	20:30	Explorer - 111 362						
24.8.2017			n	20:30	112003						
24.8.2017			n	20:32	105187						
24.8.2017						20:28:37	9.97E+14	4.95E+14	1236	733	118
24.8.2017						20:29:32	1.55E+15	7.04E+14	2074	1231	0
24.8.2017						20:33:25	1.19E+15	6.24E+14	1554	922	113
24.8.2017		20:41	n	20:44	Praha-101706						
24.8.2017			n	20:45	Porto-101648	20:46:42	3.77E+15	2.36E+15	2225	1321	137
24.8.2017			n	20:47	Lužnice-101623	20:48:27	8.77E+15	4.76E+15	1310	777	90
24.8.2017			n	20:48	Explorer - 111 362						
24.8.2017			n	20:48	112003						
24.8.2017			n	20:49	105187						
24.8.2017	20:45		n	20:45	Kotva-103926						
24.8.2017		20:49	n	20:50	Kotva-103926						
24.8.2017	21:06		d	20:52	Classic River-05604820	20:54:44	1.08E+16	9.27E+15	1879	1115	137
24.8.2017			d	20:56	Elbis-104434						
24.8.2017			d	20:57	Maria Croon-04307310						
24.8.2017			d	20:59	Bohemia Rhapsody-04812050	21:00:29	8.32E+15	5.34E+15	854	507	64
24.8.2017						21:00:50	5.47E+15	4.46E+15	862	511	43
24.8.2017			d	21:02	Porto-101648	21:01:46	5.75E+15	5.06E+15	877	520	74
24.8.2017			d	21:03	Praha-101706						
24.8.2017			d	21:06	Sumava-101550	21:06:11	1.13E+16	7.04E+15	62	37	53
24.8.2017						21:06:20	2.54E+16	1.69E+16	464	276	110
24.8.2017						21:06:27	7.60E+15	5.63E+15	50	29	41
24.8.2017		21:16	d	21:16	Classic River-05604820						
24.8.2017			d	21:17	Maria Croon-04307310						
24.8.2017			d	21:18	Bohemia Rhapsody-04812050						
24.8.2017			d	21:19	Porto-101648						
24.8.2017			d	21:20	Praha-101706						
24.8.2017			d	21:23	Sumava-101550						
24.8.2017			d	21:25	Elbis-104434						
24.8.2017	21:35		n	21:36	Hamburk-101705						
24.8.2017			n	21:40	401166						
24.8.2017						21:47:14	2.58E+15	2.08E+15	543	322	43
24.8.2017						21:47:55	3.57E+15	2.85E+15	745	442	63
24.8.2017		21:47	n	21:49	Hamburk-101705	21:48:29	5.05E+15	4.33E+15	986	585	81
24.8.2017			n	21:49	401166	21:49:28	8.21E+15	3.82E+15	3526	2093	161
24.8.2017	21:57		d	21:57	Lužnice-101623	21:57:49	2.98E+15	1.89E+15	2452	1455	117
24.8.2017						21:59:35	4.33E+15	3.77E+15	652	387	76

datum	čas otevreni komory	čas otevreni vrat	směr	přijezd měřicím místem	identifikace plavidla	čas měření	částice > 5 nm, počet na kg paliva	částice > 23 nm, počet na kg paliva	částice, mg na kg paliva *1	částice, mg na kg paliva *2	NOx, g na kg paliva
26.9.2017			n	17:20	Atlantida-102013						
26.9.2017			n	17:21	Porto-101648						
26.9.2017			n	17:31	Porto-101648						
26.9.2017			n	17:32	Atlantida-102013						
26.9.2017			n	17:38	112439	17:33:54	6.23E+14	3.91E+14	537	266	78
26.9.2017			n	17:44	112439	17:44:16	3.48E+16	2.63E+16	4568	3701	150
26.9.2017			d	17:46	Cecilie-05607630	17:47:22	1.69E+15	1.43E+15	1211	735	62
26.9.2017			d	17:54	Porto-101648						
26.9.2017			d	17:59	Cecilie-05607630						
26.9.2017			d	18:05	Porto-101648						
26.9.2017			n	18:09	Klára-104295						
26.9.2017			n	18:11	Labe-05112740						
26.9.2017			n	18:14	Natal-102141						
26.9.2017			n	18:16	Moravia-100100						
26.9.2017			n	18:23	Czechie-32105827						
26.9.2017			n	18:24	Labe-05112740	18:25:05	3.17E+15	2.83E+15	2264	1406	106
26.9.2017			n	18:25	Klára-104295	18:26:32	2.19E+15	1.95E+15	1380	874	0
26.9.2017			n	18:27	Natal-102141	18:28:16	3.10E+15	2.71E+15	1638	964	49
26.9.2017			n	18:28	Moravia-100100	18:30:57	1.73E+15	1.43E+15	1145	660	135
26.9.2017			n	18:33	Czechie-32105827	18:33:33	7.39E+15	6.28E+15	2805	1852	60
26.9.2017			d	18:44	Atlantida-102013	18:44:32	3.38E+15	2.99E+15	1669	1070	0
26.9.2017			d	18:52	Natal-102141	18:53:08	1.78E+15	1.39E+15	723	479	46
26.9.2017			d	18:53	Klára-104295						
26.9.2017			d	18:54	Atlantida-102013						
26.9.2017			d	18:55	Moravia-100100						
26.9.2017			d	18:56	Czechie-32105827						
26.9.2017						18:56:07	2.81E+16	2.55E+16	6690	5006	121
26.9.2017						18:57:26	1.40E+16	1.33E+16	3471	2623	69
26.9.2017						18:59:30	1.40E+15	9.90E+14	655	399	49
26.9.2017						19:01:59	1.08E+16	9.56E+15	1579	1317	55
26.9.2017						19:03:58	2.72E+16	2.49E+16	4446	3739	49
26.9.2017						19:06:06	9.83E+15	8.69E+15	2645	1782	65
26.9.2017						19:07:53	5.00E+15	4.40E+15	1911	1214	0
26.9.2017			d	19:05	Klára-104295						
26.9.2017			d	19:06	Natal-102141						
26.9.2017			d	19:07	Moravia-100100						
26.9.2017			d	19:08	Czechie-32105827						
26.9.2017			n	19:14	Hamburk-101705						
26.9.2017			n	19:17	Europe-32101472						
26.9.2017			n	19:18	Bohemia-103339						
26.9.2017			n	19:18	Maria Croon-04307310						
26.9.2017			n	19:19	Praha-101706						
26.9.2017			n	19:20	Slapy-102121						
26.9.2017			n	19:21	Bohemia Rhapsody-04812050						
26.9.2017			n	19:36	Hamburk-101705	19:37:08	2.42E+15	2.22E+15	2119	1243	37
26.9.2017			n	19:37	Bohemia-103339	19:37:50	3.03E+15	2.62E+15	1932	1179	65
26.9.2017			n	19:39	Europe-32101472	19:39:04	1.36E+15	1.04E+15	593	371	95
26.9.2017			n	19:40							
26.9.2017			n	19:40	Maria Croon-04307310						
26.9.2017			n	19:41	Slapy-102121						
26.9.2017			n	19:42	Praha-101706						
26.9.2017			n	19:44	Bohemia Rhapsody-04812050						

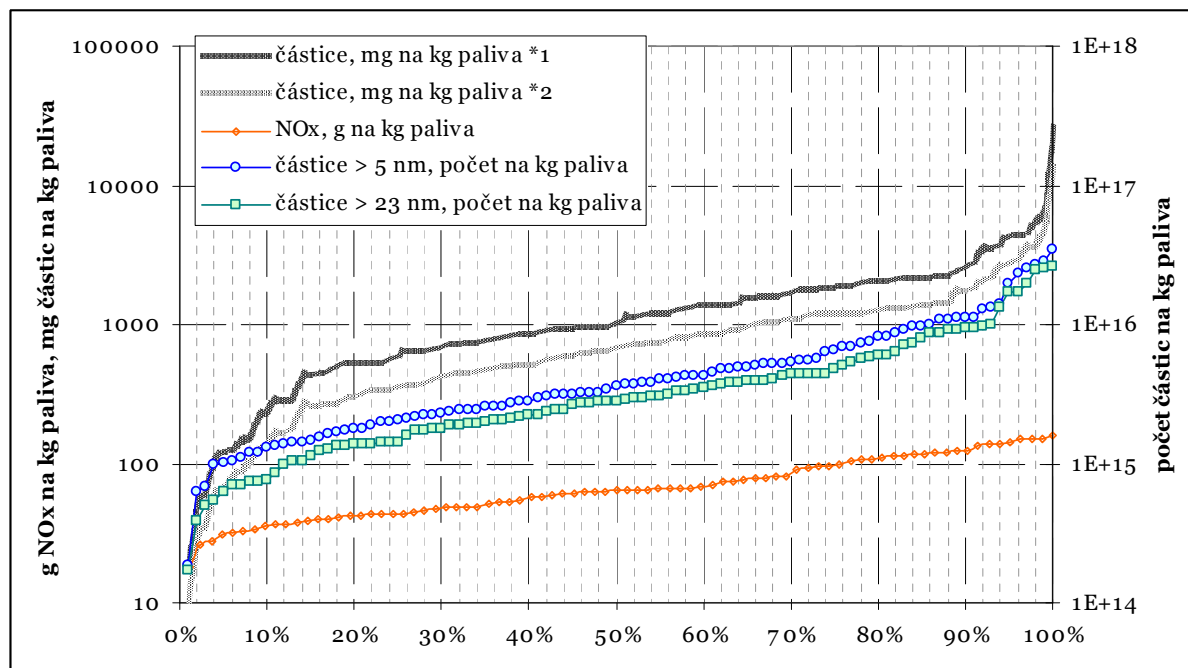
Tab. 3: Souhrnné výsledky měření

	částice > 5 nm, počet na kg paliva	částice > 23 nm, počet na kg paliva	částice, mg na kg paliva *1	částice, mg na kg paliva *2	NOx, g na kg paliva
průměr	5.70E+15	4.54E+15	1636	1028	63
směrodatná odchylka	6.23E+15	5.17E+15	2686	1505	42
minimum	1.86E+14	1.69E+14	18	10	18
maximum	3.48E+16	2.63E+16	25541	13430	161
medián	3.67E+15	2.85E+15	1082	707	59

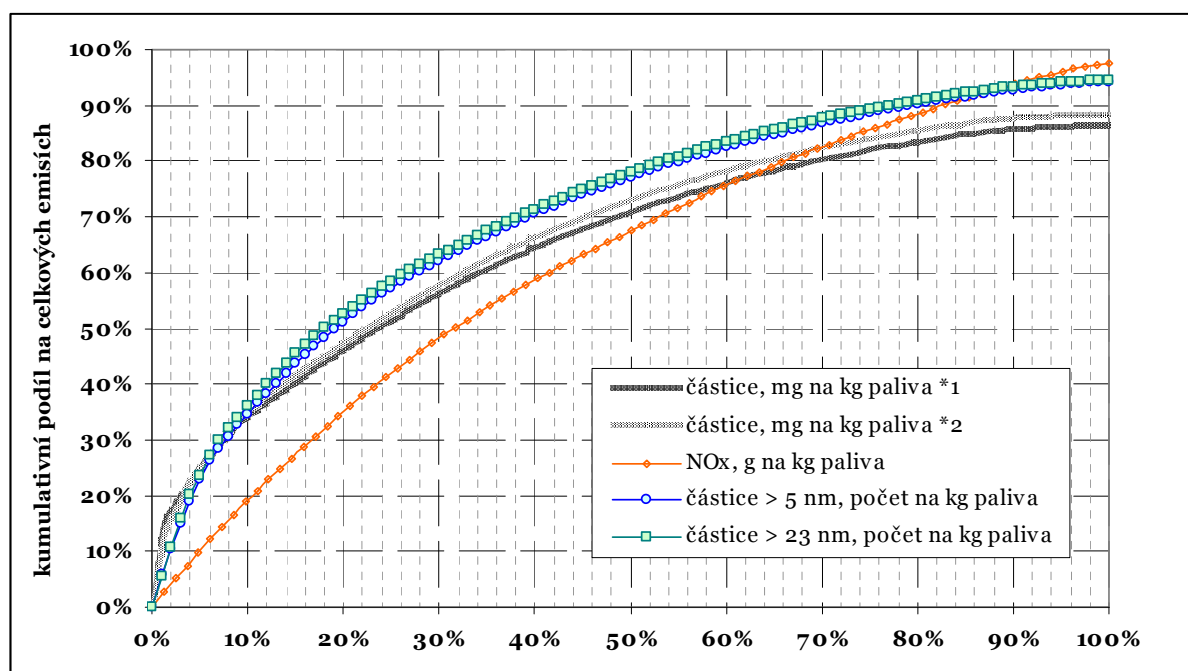
Z tabulky 3 je zřejmé, že v případě hmotnosti částic jsou nejvyšší naměřené koncentrace více než tisícinásobek nejnižších naměřených koncentrací. V případě počtu částic je rozdíl „pouze“ více než stonásobný, zde je však třeba poukázat na to, že čím vyšší je koncentrace velmi malých částic, tím rychleji se tyto částice shlukují do větších aglomerátů, čímž jejich celkový počet klesá. V případě emisí NOx jsou nejvyšší koncentrace necelý devítinásobek nejnižších naměřených koncentrací. Rozložení emisí podle velikosti je vyneseno na obr. 10, kde na svislé ose jsou naměřené hodnoty a na vodorovné ose je procentuální podíl provedených měření. Kumulativní distribuce naměřených hodnot, vynesena na obr. 11, pak umožňuje určit, jak velká část měření je spojena s jakou částí celkových emisí. Je například patrné, že

plná třetina celkového množství naměřených částic pochází z přibližně 10% měření s nejvyššími hodnotami, další třetina z dalších 30% měření, a poslední třetina z přibližně 60% „nejčistších“ měření. Pokud by každé plavidlo bylo měřeno právě jednou, nebo pokud by výběr měření byl rozumně reprezentativní (což do značné míry lze očekávat), bylo by možné konstatovat, že třetina částic pochází z 10% nejhorších plavidel, nebo naopak, že 60% plavidel vyprodukuje pouhou třetinu všech částic.

Nejhorší „hříšníky“ s technicky nevyhovujícími motory lze identifikovat i pouhým okem (viz obr. 12).



Obr. 10: Rozložení vypočtených emisních faktorů pro jednotlivá měření



Obr. 11: Kumulativní distribuce celkových naměřených emisí

Porovnání s legislativními limity a dalšími studii

Výsledky této studie jsou porovnány s výsledky dalších studií v Tab. 4. Ne vždy jsou však výsledky porovnatelné. Emise z motorových vozidel zpravidla zahrnují rovněž otěry z brzd a pneumatik a zvířený prach. V různých studiích byly měřeny různé velikosti nebo i různé kategorie částic. Pro ilustraci jsou rovněž vyneseny emisní limity pro těžká silniční vozidla Euro 3 a Euro 6.

Tab. 4: Porovnání výsledků s emisními limity pro silniční vozidla a dalšími studii

	částice > 5 nm počet na kg paliva	částice > 23 nm počet na kg paliva	částice mg / kg paliva *1	částice mg / kg paliva *2	NOx g / kg paliva
<i>tato studie</i>	$5.7 \pm 6.2 \times 10^{15}$	$4.5 \pm 5.2 \times 10^{15}$	1636 ± 2686	1028 ± 1505	63 ± 42
Autobusy New York, 2004 ²⁸			100-230 (jen uhlíkaté částice)		
Autobusy, Švédsko, 2013 ²³	S filtrem částic: $4.4 \pm 3.5 \times 10^{14}$ Bez filtru částic: $2.1 \pm 1.0 \times 10^{15}$				
Autobusy, Finsko, 2015 ²⁹	$3 \times 10^{13} - 2.1 \times 10^{15}$		10-1200		6-40
Nákladní vozy, Kalifornie, 1998 ³⁰	$6.3 \pm 1.9 \times 10^{15}$		2500 ± 200		42 ± 5
Nákladní vozy, Kalifornie, 2006 ³¹	(průměr) 4.7×10^{15}		(průměr) 1700		
Nákladní vozy, Kalifornie, 2006 ³²	$3.3 \pm 1.3 \times 10^{15}$				
Automobily, Kanada, 2017 ³³	(průměr, 130 tis. vozů) 8.5×10^{14}		(průměr, 130 tis. vozů) 88		
Nákladní lodě na Rýnu, 2016 ³⁴			2000 ± 300		54 ± 4
Euro 3 limit, 2000-2005 (při měrné spotřebě 250 g/kWh)			400		20
Euro 6 limit, od 2013 (při měrné spotřebě 250 g/kWh)			20		1.6

Ač je přirovnání velmi obtížné, naměřené emisní faktory pro částice odpovídají přibližně faktorům zjištěných u nákladních vozidel v Kalifornii na přelomu tisíciletí, a jsou výrazně vyšší, než bylo naměřeno u autobusů.

Legislativa a inspirace z jiných zemí

Emise z lodí zůstávají jednou z otevřených otázek. Emisní limity pro motory nově uváděné do provozu i požadavky na palivo jsou dány evropskou legislativou. Není známo, že by kdekoli v Evropě byla prováděna namátková či systematická měření emisí lodních motorů vnitrozemských plavidel. Různé incentivy pro snižování emisí existují, je však otázkou, do jaké míry jsou využitelné pro případ Prahy. Přehled zahraničních řešení bude předmětem doplnění této studie.

**Shrnutí, závěry a doporučení
jsou na začátku této studie v kapitole „shrnutí“.**

Shrnutí doporučení:

Vyžadovat udržování motorů v náležitém technickém stavu.

Starší motory dodatečně vybavit filtrem částic nebo nahradit novými.



Obr. 12: Viditelný kouř zpravidla vypovídá o špatném technickém stavu motoru. Při vyšších zatíženích bývá kouř černý, při spalování oleje, nižších zatíženích a studených startech bývá modrý až šedý.

Poznámka o doložení kvality jinou formou než autorizací:

Autorizace osob ani laboratoří není dokladována. Obtížně ji v tomto případě lze požadovat, a ani by nebyla zárukou kvality, protože se jedná o studii a měření vysoce nad rámec rutinních, standardně prováděných postupů, pro které jsou autorizace typicky udělovány. Kvalita výsledků této studie proto nevyplývá z autorizace osob či organizací podílejících se na měření orgánem státní správy, nýbrž z kvalifikací týmu odborníků, provádějících studii v rámci své odborné působnosti na špičkových akademických pracovištích v ČR. Pro jednotlivé ústavy Akademie věd ČR je pravomoc, mimo jiné, provádět výzkum a poskytovat vědecké posudky, stanoviska a doporučení dána paragrafem 13 zákona č. 283/1992 Sb., o Akademii věd České republiky v platném znění. Obdobné pravomoci, a rovněž zastávání aktivní role ve veřejné diskuzi s spolupráce s různými stupni státní správy a samosprávy, jsou pro vysoké školy zakotveny v prvním paragrafu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, ve kterém se mimo jiné uvádí, že „Vysoké školy jako nejvyšší články vzdělávací soustavy jsou vrcholnými centry vzdělanosti, nezávislého poznání a tvůrčí činnosti a mají klíčovou úlohu ve vědeckém, kulturním, sociálním a ekonomickém rozvoji společnosti.“

Literatura (seznam citovaných pramenů)

- ¹ Dimopoulos-Eggenschwiler P., Liati A.: Characterization of particulate matter deposited in diesel particulate filters: Visual and analytical approach in macro-, micro- and nano-scales. *Combustion and Flame* 157 (2010) 1658–1670.
- ² Kittelson D. B., Watts W. F., Johnson, J. P., 2006a. On-road and Laboratory Evaluation of Combustion Aerosols Part 1: Summary of Diesel Engine Results. *J. Aerosol Sci.* 37, 913-930.
- ³ Kittelson D. B., Watts W. F., Johnson, J. P., Schauer, J.J., Lawson, D.R., 2006b. On-road and Laboratory Evaluation of Combustion Aerosols Part 2: Summary of Spark Ignition Engine Results. *J. Aerosol Sci.*, 37, 931-949.
- ⁴ Gerde P., Muggenburg, B.A., Lundborg, M., Dahl, A.R., 2001. The rapid alveolar absorption of diesel soot-adsorbed benzo(a)pyrene: bioavailability, metabolism and dosimetry of an inhaled particle-borne carcinogen, *Carcinogenesis* 22, 741-749.
- ⁵ Künzli, N, R Kaiser, R, Medina, S, Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, F., Puybonnieux-Textier, V., Quénel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.-C., Sommer, H., 2000. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, *The Lancet* 356, 895-901.
- ⁶ http://oehha.ca.gov/public_info/facts/dieselfacts.html
- ⁷ <http://www.osha.gov/SLTC/dieselexhaust/>
- ⁸ http://press.iarc.fr/pr213_E.pdf
- ⁹ Kuenzli, S.: Chronic pulmonary effects of ambient nano-PM: Lessons learned from PM. 13th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, June 2009.
- ¹⁰ Krzyzanowski M, Kuna-Dibbert B, Schneider J, eds. Copenhagen: World Health Organization; 2005. Health Effects of Transport-Related Air Pollution.
- ¹¹ Janssen, N.A.H., et al.: Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM10 and PM2.5. *Environ Health Perspect.* 2011 December; 119(12): 1691–1699. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3261976/
- ¹² Puklová V., Lustigová M., Kazmarová H., Kotlík B., 2013: Ke vlivu znečištění ovzduší na úmrtnost v České Republice. *Hygiena*, 58(1), 5-10.
- ¹³ Gauderman, W.J., et al.: The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. *New England Journal of Medicine*, 351, 11, 2004, 1057-1067.
- ¹⁴ Vojtisek M., Pechout M., Dittrich L., Beranek V., Kotek M., Schwarz J., Vodicka P., Milcova A., Rossnerova A., Ambroz A., Topinka J.: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and their genotoxicity in exhaust emissions from a diesel engine during extended low-load operation on diesel and biodiesel fuels. *Atmospheric Environment* 109 (2015) 9-18.
- ¹⁵ Ravindra, K., Sokhi, R., VanGrieken, R.: Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment*, 42, 2007, 2895-2921.
- ¹⁶ Karavalakis, G., et al.: Effects of low concentration biodiesel blends application on modern passenger cars. Part 3: Impact on PAH, nitro-PAH, and oxy-PAH emissions. *Environmental Pollution* 158, 2010, 1584–1594.
- ¹⁷ Shah, S.D., Ogunyoku, T.A., Miller, W., Cocker III, D.R.: On-Road Emissions Rates of PAH and n-alkane Compounds from Heavy-Duty Diesel Vehicles. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, 39, 5276-5284.
- ¹⁸ Lwebuga-Mukasa, J.S., *Journal of Asthma*, 42, 5, 2005, 337-348.
- ¹⁹ Bishop, G. A., Starkey, J. R., Ihlenfeldt, A., Williams, W. J., & Stedman, D. H. (1989). IR long-path photometry: a remote sensing tool for automobile emissions. *Analytical Chemistry*, 61(10), 671–677A.
- ²⁰ Bischof, O. (2015). Recent Developments in the Measurement of Low Particulate Emissions from Mobile Sources: A Review of Particle Number Legislations. *Emiss. Control Sci. Technol.*, 1, 203-212.
- ²¹ Fierz, M., Houle, C., Steigmeier, P., Burtscher, H. (2011). Design, calibration, and field performance of a miniature diffusion size classifier. *Aerosol Sci. Technol.* 45 (1), 1-10.
- ²² Fierz, M., Meier, D., Steigmeier, P., Burtscher, H. (2014). Aerosol measurement by induced currents. *Aerosol Sci. Technol.* 48 (4), 350-357.
- ²³ Hallquist, Å. M., Jerksjö, M., Fallgren, H., Westerlund, J., & Sjödin, Å. (2013). Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(10), 5337-5350.
- ²⁴ Bishop, G. A., et al. (2015). On-road heavy-duty vehicle emissions monitoring system. *Environmental science & technology*, 49(3), 1639-1645.
- ²⁵ Vojtisek-Lom, M., Beranek, V., Stolcpartova, J., Pechout, M. et al., "Effects of n-Butanol and Isobutanol on Particulate Matter Emissions from a Euro 6 Direct-injection Spark Ignition Engine During Laboratory and on-Road Tests," *SAE Int. J. Engines* 8(5):2338-2350, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-24-2513>.

-
- ²⁶ Park K., Cao F., Kittelson D.B., McMurry P.H.: Relationship between Particle Mass and Mobility for Diesel Exhaust Particles. *Environ. Sci. Technol.* 2003, 37, 577-583.
- ²⁷ Park K., Cao F., Kittelson D.B., McMurry P.H.: Structural Properties of Diesel Exhaust Particles Measured by Transmission Electron Microscopy (TEM): Relationships to Particle Mass and Mobility, *Aerosol Science and Technology*, 38:9, 2004, 881-889, DOI: 10.1080/027868290505189
- ²⁸ Canagaratna, M.J., a kol. (2004): Chase Studies of Particulate Emissions from in-use New York City Vehicles, *Aerosol Science and Technology*, 38:6, 555-573.
- ²⁹ Pirjola, L., a kol. (2015): Physical and Chemical Characterization of Real-World Particle Number and Mass Emissions from City Buses in Finland. *Environ. Sci. Technol.*, 2016, 50 (1), pp 294–304.
- ³⁰ Kirschtetter, T. (1999): On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles. *Atmospheric Environment*, 33, 2955-2968.
- ³¹ Ban-Weiss, G.A., a kol. (2009): Measurement of Black Carbon and Particle Number Emission Factors from Individual Heavy-Duty Trucks. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, 43 (5), pp 1419–1424.
- ³² Ban-Weiss, G. A., Lunden, M. M., Kirchstetter, T. W., & Harley, R. A. (2010). Size-resolved particle number and volume emission factors for on-road gasoline and diesel motor vehicles. *Journal of Aerosol Science*, 41(1), 5-12.
- ³³ Wang, J.M., a kol.: Real-World Emission of Particles from Vehicles: Volatility and the Effects of Ambient Temperature. *Environ. Sci. Technol.*, 2017, 51 (7), pp 4081–4090.
- ³⁴ Kurtenbach, R., Vaupel, K., Kleffmann, J., Klenk, U., Schmidt, E., & Wiesen, P. (2016). Emissions of NO, NO₂ and PM from inland shipping. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14285-14295.