

MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH EFEKTŮ V TUNELECH NA ŽELEZNIČNÍ SÍTI ČR

THE MEASUREMENTS OF AERODYNAMIC EFFECTS IN TUNNELS ON THE CZECH RAILWAY NETWORK

Emanuel MERGL¹, Jiří ŠÁTEK²

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252662

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Článek představuje aerodynamická měření v tunelech na železniční síti ČR, jejichž hlavním úkolem bylo demonstrovat velikost efektů při rychlostech 160 až 200 km/h a analyzovat výsledky ve vztahu k nově projektovaným tratím. Jsou prezentovány ukázky naměřených tlakových změn a rychlostí proudění na pevné pozici v tunelu nebo tlakových změn na povrchu jedoucího vozidla. Dále jsou uvedena působící tlaková zatížení na vozidla a tlakový komfort cestujících pro tyto rychlosti. Závěrem jsou shrnuty související požadavky na vozidla, které tvoří důležitou součást návrhu a provozu na nových tratích v ČR s rychlostí 200 km/h.

Klíčová slova

aerodynamika, tunely, kolejová vozidla, měření, tlakové změny

Abstract

The article presents aerodynamic measurements in tunnels on Czech railway network whose main task was to demonstrate effect magnitudes at speeds of 160 to 200 km/h and to analyse the results in relation to new projects of lines. There are presented examples of measured pressure changes and airflow speeds on the fixed position inside tunnel or pressure changes on the surface of running train. Further there are shown pressure loads acting on the vehicle and passenger pressure comfort for such train speeds. Finally, there are summarised related requirements on vehicles that comprise important part of design and operation on new lines in the Czech Republic with the speed of 200 km/h.

Keywords

aerodynamics, tunnels, railway vehicles, measurement, pressure changes

1 ÚVOD

V posledních letech probíhá realizace studií na základě zadání GŘ O13 Správy železnic, státní organizace, které se věnují aerodynamickým efektům v tunelech. Jejich hlavním záměrem je systematické posouzení vybraných efektů v návaznosti na nově projektované stavby a plánované zvyšování traťové rychlosti na železniční síti v České republice. Důležitou součástí byla i realizace případových měření v existujících tunelech, které měly poskytnout detailní pohled na skutečnou velikost efektů.

¹ Ing. Emanuel Mergl. VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky, Česká republika, tel.: +420 736 519 952, e-mail: mergl@vukv.cz

² Ing. Jiří Šátek. VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky, Česká republika, tel.: +420 736 519 947, e-mail: satek@vukv.cz

Následující text prezentuje soubor měření, které v oblasti aerodynamiky v tunelech obvykle probíhá, a je ukázkou velikosti efektů, které se vyskytují již v současných provozních podmínkách a s vyšší rychlostí dále narůstají. Uvedené příklady byly naměřeny v tunelech na IV. tranzitním železničním koridoru, kde se nachází několik dvoukolejných tunelů, z nichž některé jsou již vybudovány pro rychlost až 200 km/h. Typickým reprezentantem je například tunel Mezno v úseku Sudoměřice-Votice, jehož řešení je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1 Pohled na řešení tunelu Mezno – portál (vlevo) a tubus tunelu (vpravo)

2 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH EFEKTŮ V TUNELECH

Základní požadavky na měření aerodynamických efektů v tunelech jsou v současnosti uvedeny v evropské normě EN 14067-5 [1]. Základem měření je záznam průběhu změn statického tlaku, který je způsoben tlakovými vlnami vznikající vlivem setrvačných účinků při vjezdu a výjezdu vozidla do, resp. z tunelu a třecími efekty při průjezdu vozidla tunelem. Při vyhodnocení naměřených dat se obvykle analyzuje tlaková charakteristika vozidlo-tunel, tj. charakteristické tlakové změny:

- Δp_N vlivem vjezdu čela vozidla do tunelu,
- Δp_{fr} vlivem třecích efektů podél délky vozidla,
- Δp_T vlivem vjezdu konce vozidla do tunelu,
- Δp_{HP} vlivem průjezdu čela vozidla kolem měřicího stanoviště.

Bližší popis tlakových změn, jejich vznik a působení na vozidla je stručně popsán například v příspěvku [2]. Ostatní měřené veličiny – rychlost proudění v tunelu, atmosférické podmínky (tlak, teplota a vlhkost) v tunelu a rychlost vozidla na jeho vjezdu do tunelu, slouží zejména pro následné vyhodnocení a korekci naměřených tlakových hodnot do referenčních podmínek. Rychlost proudění ovšem poskytuje i informace o dalších souvisejících efektech v tunelu.

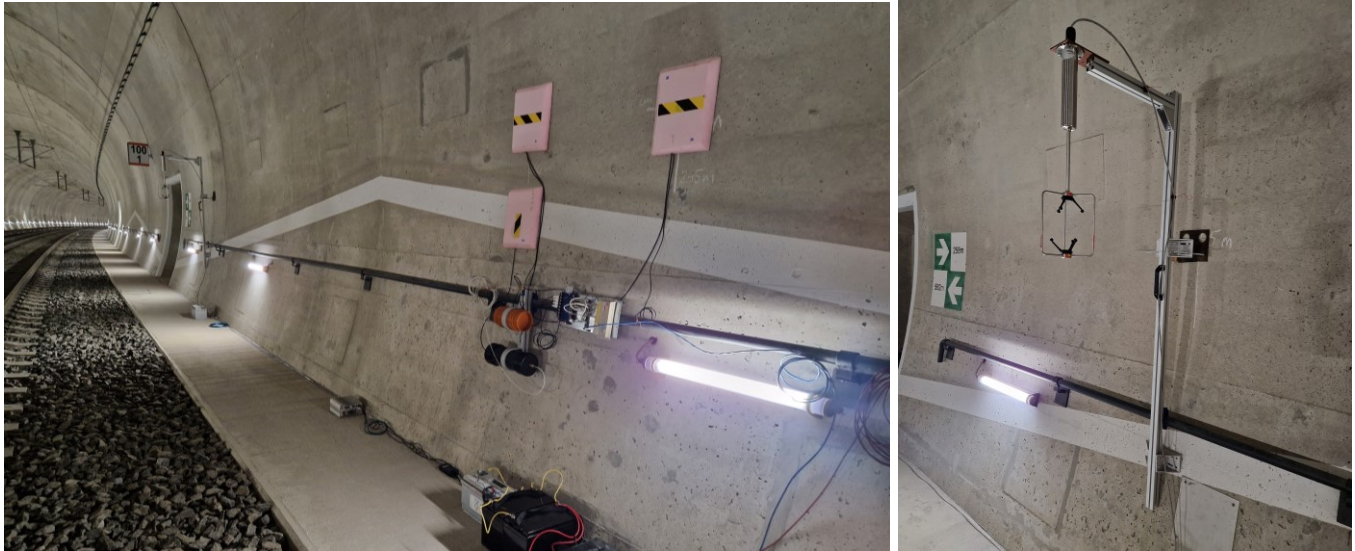
Rozmanitost konstrukčního řešení vozidel i tunelů vyžaduje podrobnou přípravu každého měření a stanovení vhodných zkušebních podmínek. V praxi je často limitujícím faktorem potřebná minimální délka tunelu, aby bylo možno naměřit všechny relevantní složky tlakových změn v jejich odpovídající velikosti bez zkreslení, které vzniká při vzájemné interakci po jejich odrazech na druhém portálu.

Jelikož tlakové vlny přetrvávají v tunelu po dobu, dokud není jejich energie zmařena třením na vnitřních površích tunelu a odrazy od portálů, je nezbytné při měření eliminovat přítomnost efektů spojených s tzv. aerodynamickým míjením vozidel, kdy vozidlo a jím generované tlakové změny interagují s efekty od předchozího vozidla.

Důležitou součástí zkoušky je rovněž analýza vlivu specifických prvků v tunelu jako jsou větrací šachty, průchody, kaverny, tvar portálu apod. Všechny tyto prvky mohou ovlivnit vznik a následné šíření tlakových změn a musí být vyloučeny nebo následně korigovány během vyhodnocení.

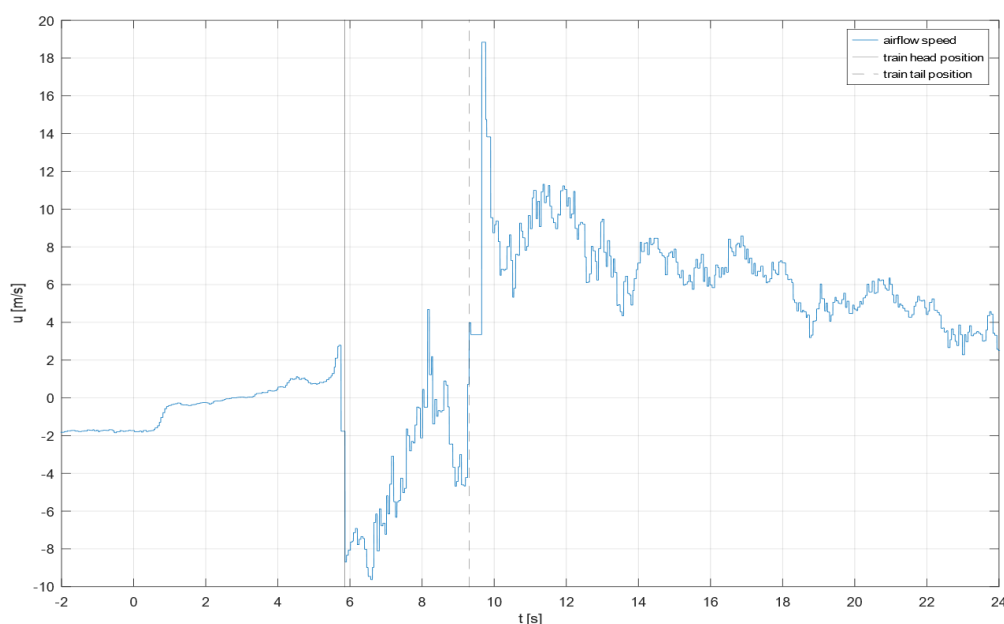
3 TLAKOVÉ ZMĚNY NA PEVNÉ POZICI V TUNELU

Měření na pevné pozici v tunelu představuje základní možnost hodnocení reálných aerodynamických vlastností vozidla i tunelu. Tlakové změny a rychlosti proudění jsou měřeny v dostatečné vzdálenosti od vjezdového portálu, aby bylo možno zaznamenat kompletní tlakovou charakteristiku vozidlo–tunel. Ukázkou instrumentace pro tento případ ukazuje obr. 2.



Obr. 2 Ukázka instrumentace při zkoušce na pevné pozici v tunelu – snímače tlakových změn (vlevo) a anemometr pro záznam rychlosti proudění (vpravo)

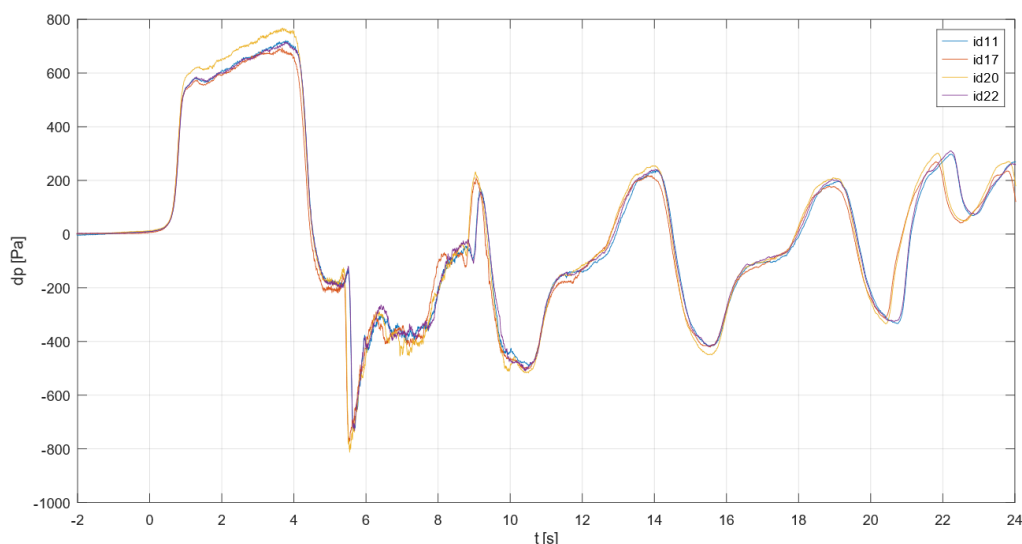
Měření rychlosti proudění v tunelu je nezbytnou podmínkou, která umožňuje stanovit počáteční rychlost proudění v tunelu a tím i relativní rychlost vozidla na vjezdu do tunelu. Příklad záznamu rychlosti proudění na pevné pozici v tunelu ukazuje obr. 3. Na tomto průběhu lze sledovat některé charakteristické jevy – přítomnost počátečního proudění v tunelu, zpětné proudění v okolí vozidla nebo špičky rychlosti těsně za vozidlem, které dokazují existenci dalších témat aerodynamiky v železničních tunelech – výskyt přirozeného proudění, nárůst přítlakové síly pantografu vlivem relativní rychlosti proudění působící na lištu sběrače, resp. aerodynamická zatížení objektů vystavených působícímu proudění.



Obr. 3 Průběh rychlosti proudění v tunelu Mezno při průjezdu lokomotivní soupravy s 5 osobními vozy rychlostí 160 km/h včetně vyznačených okamžiků průjezdu čela a konce vlaku kolem měřicího stanoviště; vjezd čela vlaku do tunelu je v čase 0 s

Příklad průběhu tlakových změn na pevné pozici v tunelu ukazuje obr. 4, na kterém je možné pozorovat některé dříve zmíněné charakteristické složky, okamžik průjezdu vozidla kolem měřicího stanoviště nebo opakovaný výskyt odražených tlakových vln. Časová poloha jednotlivých tlakových vln je způsobena odchylkami v rychlosti jednotlivých souprav. Velikost tlakových změn je mimo jiné ovlivněna relativní rychlostí vozidla, tj. počáteční rychlostí proudění v tunelu v jednotlivých případech.

Tyto tlakové změny působí jako zdroj aerodynamických zatížení na konstrukce oddělující rozdílná prostředí (dveře nouzových východů, skříň rozvaděčů apod.), která by byla umístěna na dané pozici v tunelu. Pro další zobecnění nebo porovnání s mezními hodnotami mohou být tyto výsledky dále transformovány do referenčních podmínek – standardní hustoty vzduchu, rychlosti vozidla, nulové počáteční rychlosti proudění a příčného průřezu tunelu.



Obr. 4 Průběh tlakových změn v tunelu Mezno na pevné pozici při průjezdu lokomotivní soupravy s 5 osobními vozy rychlostí 160 km/h; srovnání pro několik nezávislých jízd

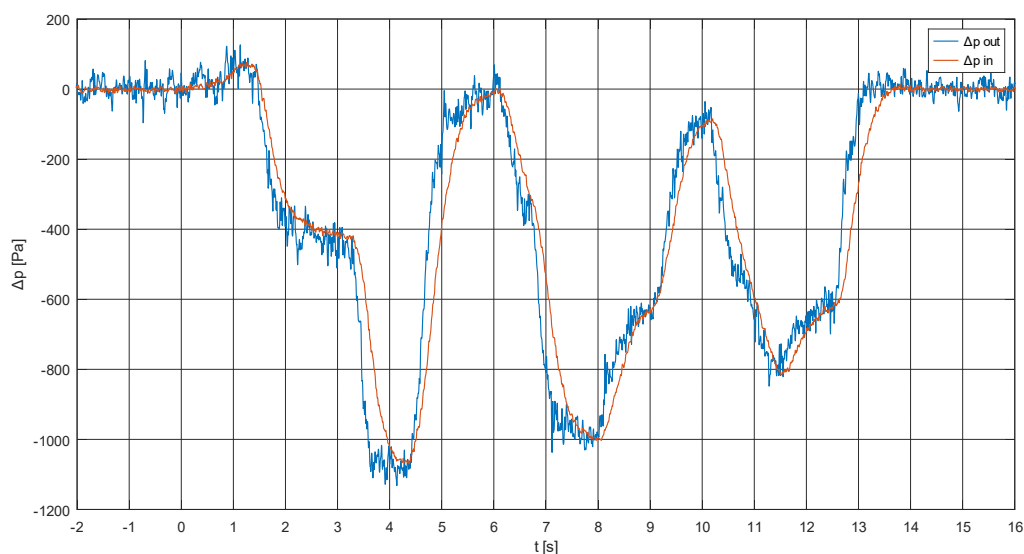
4 TLAKOVÉ ZMĚNY PŮSOBÍCÍ VNĚ A UVNITŘ VOZIDLA

Tlakové změny lze rovněž zaznamenávat na jedoucím vozidle. V tomto případě je jejich průběh odlišný oproti příkladu v předchozí kapitole, jelikož měřicí stanoviště je pohyblivé a interakce s jednotlivými tlakovými vlnami je současně závislá na rychlosti vozidla. Ukázkou instrumentace při takovém měření na vozidle zobrazuje obr. 5.



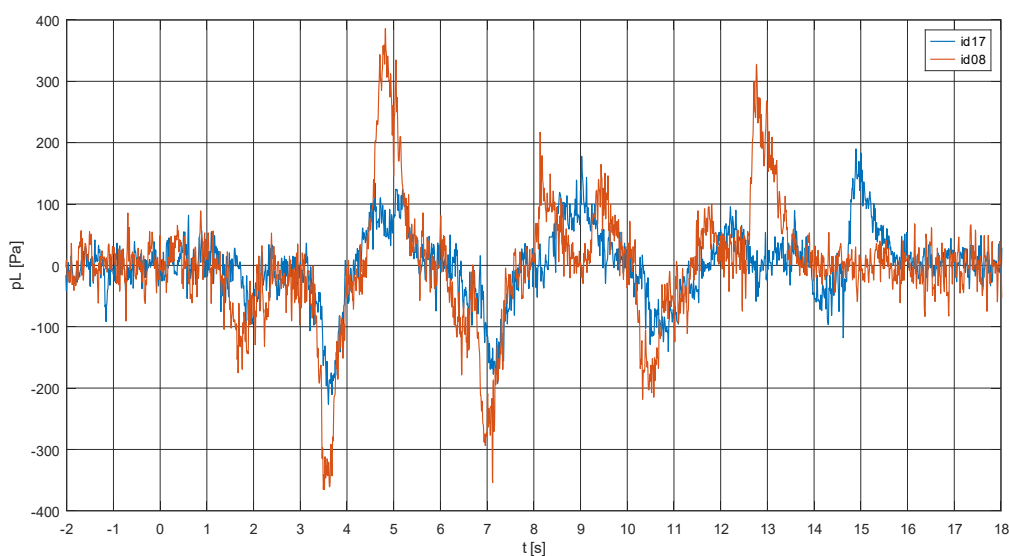
Obr. 5 Ukázka instrumentace při zkoušce na vozidle – celkový pohled na umístění tlakového snímače na bočníci vozu WRmz⁸¹⁷ (vlevo) a detail snímače (vpravo)

Charakteristické tlakové změny, jejichž přítomnost se v tomto případě objevuje v jiném pořadí než u záznamu na pevné pozici v tunelu, ukazuje obr. 6 včetně srovnání jejich průběhu vně a uvnitř vozidla. Relativně rychlé vyrovnávání tlaku uvnitř vozidla zde naznačuje netěsnost vozu, protože se v jeho interiéru vyskytují tlakové změny o podobné velikosti jako v samotném tunelu.



Obr. 6 Průběh tlakových změn vně (Δp_{out}) a uvnitř (Δp_{in}) zkušební soupravy na pozici ve vzdálenosti 24 m od čela při rychlosti cca 190 km/h při průjezdu tunelem Deboreč; vjezd čela soupravy do tunelu je v čase 0 s

Účelem měření tlakových změn na vozidle je obvykle vyhodnocení zatížení jeho konstrukce, stanovení jeho tlakotěsnosti nebo vyhodnocení tlakového komfortu cestujících. Tlakové zatížení odpovídá rozdílu tlaku působícího vně a uvnitř vozidla v daný okamžik a příklad jeho průběhu včetně srovnání pro rychlosti 190 km/h a 160 km/h je uveden na obr. 7.



Obr. 7 Srovnání průběhu tlakových zatížení zkušební soupravy na pozici ve vzdálenosti 24 m od čela při rychlosti 160 km/h (id17) a 190 km/h (id08) během průjezdu tunelem Deboreč

Toto představuje příklad reálných provozních zatížení působící na vůz zařazený v dané lokomotivní soupravě při jejím sólo průjezdu tunelem. Výrazně vyšší hodnoty zatížení lze očekávat pro situace míjení vozidel, které pak definují výjimečná (návrhová) tlaková zatížení ve dvoukolejných tunelech. Tato tlaková zatížení působí na celou skříň vozu včetně komponent, jako jsou dveře, okna atd.

5 TLAKOVÝ KOMFORT CESTUJÍCÍCH

Z pohledu cestujícího jsou podstatné tlakové změny v interiéru, jejichž vnímání přispívá k jeho celkové úrovni pohodlí za jízdy. Vstupem pro hodnocení tlakového komfortu je záznam tlakových změn v interiéru vozidla. Ukázkou instrumentace pro toto měření ukazuje obr. 8.

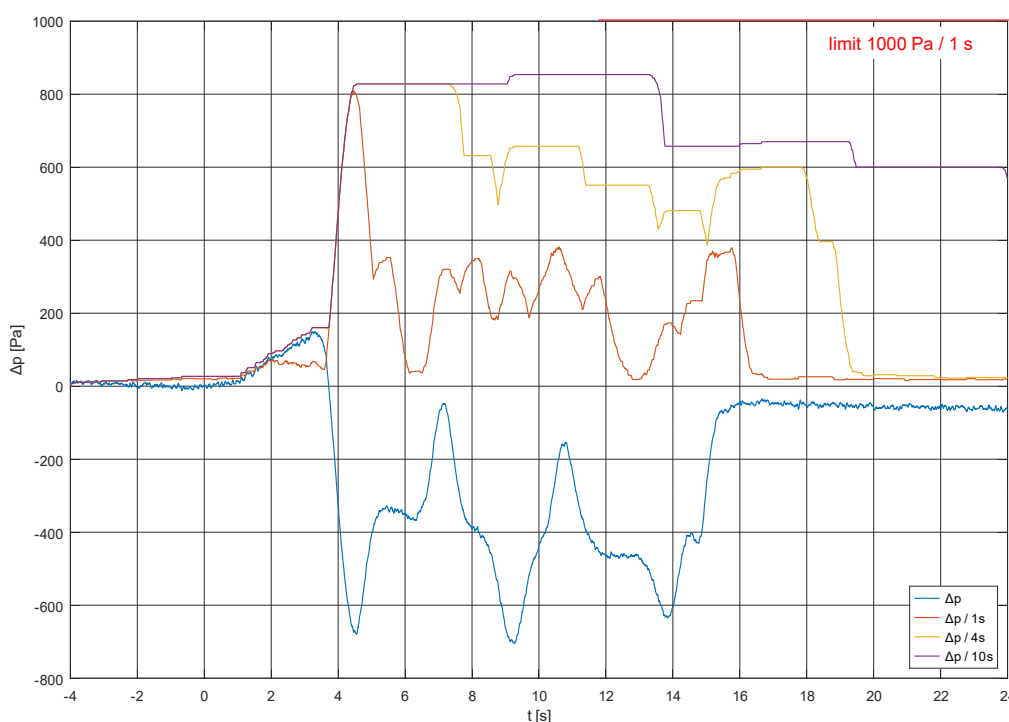


Obr. 8 Ukázka instrumentace pro záznam tlakových změn ve vozidle při zkoušce tlakového komfortu

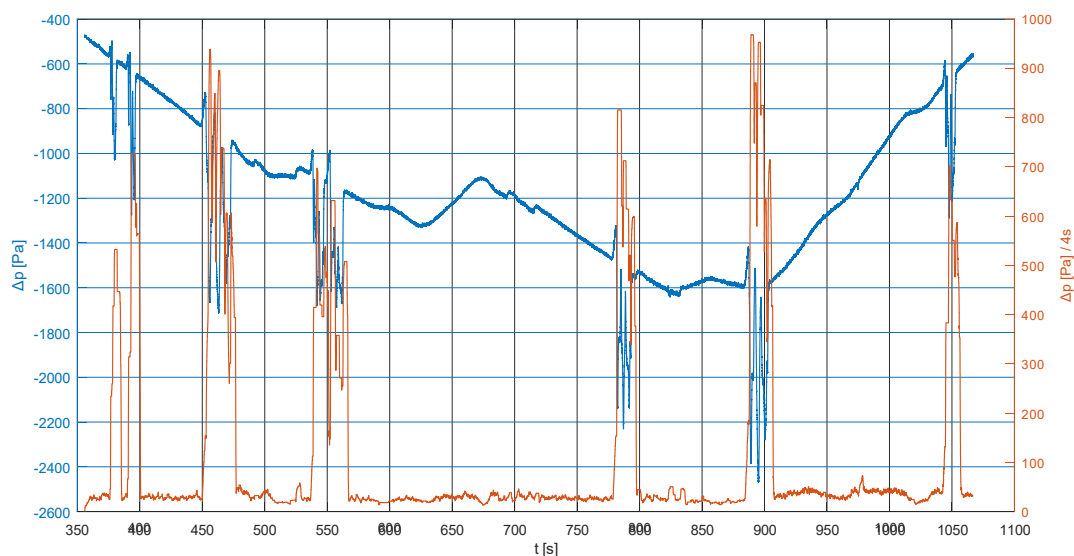
Z naměřených průběhů tlakových změn je vyhodnocen tlakový komfort, který je určen jako maximální tlaková změna Δp za stanovené uplynulé intervaly Δt , např. $\Delta t = 1$ s, 4 s a 10 s. Příklad tlakového komfortu při průjezdu tunelem ukazuje obr. 9.

Pro cestujícího je významná i četnost opakování těchto změn po dobu jeho jízdy, a tak doplňujícím hodnocením může být stanovení tlakového komfortu na delším úseku trati s identifikací počtu kritických tlakových změn. Grafické zobrazení tlakového komfortu na delším úseku je zobrazeno na obr. 10.

V případě tohoto měření bylo v lokomotivních soupravách v úseku Benešov-Tábor prokázáno splnění zvolených kritérií uvedených v následující kapitole. Současně však s ohledem na výslednou velikost tlakových změn bylo poukázáno, že pro vyšší rychlosti bude již nezbytné na tuto trať nasadit vozidla tlakotěsná.



Obr. 9 Příklad tlakového komfortu $\Delta p / \Delta t$ ve voze za lokomotivu v lokomotivní soupravě s pěti osobními vozy při rychlosti 160 km/h pro časové intervaly $\Delta t = 1$; 4 a 10 s v tunelu Deboreč; zobrazeno je i kritérium pro interval 1 s (1000 Pa / 1 s), ostatní kritéria (1600 Pa / 4 s, 2000 Pa / 10 s) se nacházejí mimo oblast grafu



Obr. 10 Příklad rozložení hodnot tlakového komfortu $\Delta p/\Delta t$ na úseku Bystřice-Chotoviny (IV. TŽK) ve voze za lokomotivou pro vybraný časový interval $\Delta t = 4$ s

6 POŽADAVKY PŘI NÁVRHU VOZIDEL

Při návrhu mají být relevantní požadavky zohledňovány s cílem dosažení kompatibility tratě a vozidel bez vzniku provozních omezení. Provedená měření podpořila návrh požadavků pro posouzení vozidel, která jsou určena pro provoz na konvenční železniční síti v ČR s rychlostí do 200 km/h včetně.

Požadavky na odolnost vozidel vůči tlakovým zatížením od průjezdu tunely vychází z normy [1] kapitol 5.3 a 7.7. a jsou následující:

- pro netlakotěsná vozidla ($\tau_{\text{dyn}} \leq 0,5$ s) – Výjimečné tlakové zatížení pro návrh nebo posouzení vozidla je ± 1900 Pa pro maximální rychlost vozidla $v_{\text{tr,max}} \leq 160$ km/h a ± 2500 Pa pro maximální rychlost vozidla $160 \text{ km/h} < v_{\text{tr,max}} \leq 200$ km/h. Únavové tlakové zatížení pro návrh nebo posouzení vozidla je pro oba případy ± 800 Pa působící v odpovídajícím počtu cyklů zajišťující trvalou pevnost konstrukce;
- pro tlakotěsná vozidla ($\tau_{\text{dyn}} > 0,5$ s) – Výjimečná i únavová tlaková zatížení pro návrh nebo posouzení vozidla musí být stanovena individuálně se zohledněním konkrétní tlakotěsnosti a dalších parametrů vozidla (tvar čela, plocha příčného řezu, délka apod.) podle postupů v [1] pro tunely a provozní podmínky v ČR.

Při zvyšování traťové rychlosti na železniční síti v ČR je také žádoucí nezhoršovat dosavadní úroveň tlakového komfortu ve vozidlech, který je cestujícími určitým způsobem již akceptován. Je proto doporučeno věnovat pozornost i této problematice a vozidla navrhovat se zohledněním následujících požadavků:

- při sólo (samostatné) jízdě tunelem – Maximální změny vnitřního tlaku za definovaný časový interval $\Delta p/\Delta t$ v netlakotěsných i tlakotěsných vozidlech by v provozních podmínkách ČR neměly překročit hodnoty 1000 Pa / 1 s, 1600 Pa / 4 s a 2000 Pa / 10 s;
- při míjení s jinými vozidly v tunelech – Pro netlakotěsná vozidla ($\tau_{\text{dyn}} \leq 0,5$ s) s maximální rychlostí $v_{\text{tr,max}} \leq 160$ km/h se aplikuje kritérium 4500 Pa / 4 s. Maximální změny vnitřního tlaku v tlakotěsných ($\tau_{\text{dyn}} > 0,5$ s) vozidlech mají splňovat identická kritéria dle bodu a) výše.

Rozdělení vozidel podle jejich tlakotěsnosti je provedeno pomocí hodnoty dynamického součinitele tlakotěsnosti τ_{dyn} , který je definován v normě [1] a který charakterizuje útlum (zpoždění) tlakových změn na konstrukci vozidla při jejich přechodu z exteriéru do interiéru v dynamických podmínkách za jízdy. Požadavky na tlakový komfort předpokládají, že vozidla s maximální rychlostí $v_{\text{tr,max}} > 160$ km/h jsou

konstruována již jako tlakotěsná. Netlakotěsná vozidla jedoucí vyšší rychlostí než 160 km/h proto nejsou zohledňována při projektování tunelů a nezaručují pro ně splnění požadavků na tlakový komfort.

Tyto definice jsou v současnosti uplatněny i při návrhu infrastruktury a tvoří důležité rozhraní mezi vozidly a tunely. Z toho důvodu se tyto požadavky v základní podobě objevují i jako podmínka pro přístup vozidel na trať a stávají se tak i nedílnou součástí Prohlášení o dráze, což aktuálně demonstruje i jeho znění pro rok 2026 [3].

7 ZÁVĚR

Získané výsledky poskytují praktickou ukázkou aerodynamických efektů v tunelech, které se v nezanedbatelné velikosti vyskytují již při rychlostech kolem 160 km/h a které pro vyšší traťové rychlosti dále narůstají. Výrobci vozidel, dopravci ale i objednatelé dopravy tak musí zohlednit skutečnost, že důležitou podmínkou technické způsobilosti vozidel k přístupu na trať s traťovou rychlostí vyšší než 160 km/h je mimo jiné problematika tlakových zatížení vozidel a tlakového komfortu cestujících. Tyto požadavky musí být systematicky zohledněny při návrhu nových vozidel. Při provozování existujících vozidel v nových podmínkách musí být dodatečně posouzeny provozní zatížení a bezpečnost konstrukce vozidel. Rozvoj železniční sítě v ČR tímto přináší další nároky na související technickou přípravu.



Literatura

- [1] EN 14067-5+AC:2023. *Railway applications – Aerodynamics – Part 5: Requirements and assessment procedures for aerodynamics in tunnels.*
- [2] MERGL, E. Aerodynamika železničních vozidel v tunelech. In: *Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2019: XXIV. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel II.* Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2019, s. 55–64. ISBN 978-80-89276-59-2.
- [3] SPRÁVA ŽELEZNIC, s.o. *Prohlášení o dráze celostátní a dráhách regionálních pro jízdní řád 2026 ve znění změny č. 1.* Online. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/dopravci/prohlaseni-o-draze-2026>. [citováno 2025-06-02]
- [4] VÚKV a.s. *Studie aerodynamických efektů v tunelech na IV. TŽK – Měření tlakových změn v tunelu.* Zpráva č. 23-C 088, 2023.
- [5] VÚKV a.s. *Studie aerodynamických efektů v tunelech na IV. TŽK – Měření tlakového zatížení a tlakového komfortu na voze WRmz⁸¹⁷.* Zpráva č. 24-C 020, 2024.
- [6] VÚKV a.s. *Studie aerodynamických efektů v jednokolejných tunelech – Měření současného tlakového komfortu v ČR.* Zpráva č. 25-C 020, 2025.

Zasláno / received: 13. 06. 2025, přijato / accepted: 07. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Josef Bednář (Správa železnic, státní organizace), Ing. Stanislav Plánička, Ph.D. (Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd).