

VÝZNAM REFERENČNÍCH SCÉNÁŘŮ PŘI HODNOCENÍ AERODYNAMICKÝCH EFEKTŮ NA ŽELEZNICI

THE SIGNIFICANCE OF REFERENCE SCENARIOS TO ASSESS AERODYNAMIC EFFECTS IN RAILWAY APPLICATION

Emanuel MERGL¹

Abstrakt

Aerodynamika v železniční aplikaci je typickým příkladem problematiky, která se vyskytuje na rozhraní mezi vozidly a infrastrukturou, přičemž se oba systémy navzájem ovlivňují. Velikost efektů je ovlivněna i okolním prostředím, které reprezentují atmosférické podmínky nebo konkrétní provozní situace. To vyžaduje při analýze aerodynamických efektů definovat referenční podmínky nebo scénáře, ke kterým jsou výsledky vztaženy a v jejichž kontextu dále porovnávány nebo hodnoceny. Při experimentu je pak důležitá korekce nebo transformace naměřených dat na tento referenční stav. Článek stručně představuje příklady referenčních vozidel a infrastruktury při hodnocení aerodynamických efektů na širé trati nebo v tunelu. Jsou zmíněny referenční scénáře u vybraných témat aerodynamiky, poukázáno na specifické otázky při jejich aplikaci a uvedeny příklady vlivu okrajových podmínek na velikost některých efektů.

Klíčová slova

aerodynamika, referenční scénář, širá trať, boční vítr, tunely, železniční vozidla, železniční infrastruktura

Abstract

The aerodynamics in railway application is a typical example of the topic that occurs on the interface between vehicles and infrastructure while both systems affect each other. The magnitude of effects is also determined by surrounding environment that represents atmospheric conditions or specific operational situations. During the analysis of aerodynamic effects, it requires a definition of reference conditions or scenarios to which the results are referred and in which context they are further compared or assessed. In experiment it is important to correct or transform measured data into this reference state. The article briefly describes examples of reference vehicles and infrastructure that are used in the assessment of aerodynamic effects on open track or in tunnel. There are shown reference scenarios relating to some aerodynamic topics, there is emphasized on specific questions in their application and shown examples of boundary conditions influence on the magnitude of some effects.

Keywords

aerodynamics, reference scenario, open track, cross wind, tunnels, railway vehicles, railway infrastructure

¹ Ing. Emanuel Mergl, VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky. Tel.: +420 225 343 445, e-mail: mergl@vukv.cz

1 ÚVOD

Při detailním sledování aerodynamických efektů na železnici lze pozorovat, že jejich charakter i absolutní velikost jsou spojeny nejen s konkrétním vozidlem ale také s typem infrastruktury, po které se vozidlo pohybuje. Důležitým faktorem jsou také okolní atmosférické podmínky, tj. prostředí, ve kterém se tyto aerodynamické efekty odehrávají a které definují významné okrajové podmínky. Nezanedbatelnou roli pak hrají i provozní podmínky, tj. konkrétní provozní události určené vzájemnou polohou jednotlivých vozidel, jejich možné kombinace apod.

Aerodynamické efekty tedy vznikají v konkrétní situaci, která je reprezentována aktuálními parametry celého železničního systému včetně atmosférických podmínek v daném místě a čase. Pro typové situace lze nicméně pozorovat, že při průjezdu vozidla mají jednotlivé efekty a veličiny zaznamenané na pevném místě podél trati nebo na pohyblivé pozici umístěné na samotném vozidle charakteristický průběh. Pro inženýrskou praxi to umožňuje stanovit tzv. referenční scénáře, které následně pomáhají vyjádřit požadavky na velikost těchto efektů pro pevně definované rozhraní vozidel, infrastruktury i podmínek prostředí.

2 KONCEPT REFERENČNÍCH SCÉNÁŘŮ

Soubor požadavků a doporučení pro aerodynamiku v železniční aplikaci včetně metod pro hodnocení jednotlivých efektů dnes podrobně popisuje soubor evropských norem EN 14067. Problematika aerodynamiky je aktuálně soustředěna do následujících částí:

- Část 4: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku na širé trati;
- Část 5: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku v tunelech;
- Část 6: Požadavky a zkušební postupy pro hodnocení účinků bočního větru.

Nedílnou součástí, která uvozuje takřka každou problematiku v tomto souboru norem, je definice referenčních scénářů. Ty vymezují okrajové podmínky pro jednotlivé efekty a umožňují stanovit jejich mezní hodnoty v kontextu jednoznačně definovaných parametrů vozidel, infrastruktury a podmínek prostředí. Referenční scénář je tedy souborem těchto parametrů, které ovlivňují absolutní velikost sledovaného efektu.

Významnou součástí definice referenčních scénářů je samotný fyzikální popis a velikost aerodynamických efektů, což umožňuje nepřímo definovat omezení pro různé vzájemné kombinace dalších parametrů. Typickým příkladem jsou geometrické parametry vozidla (např. výška, šířka, tvar čela apod.), které nepochybně aerodynamické efekty ovlivňují, ale přitom nejsou v mnoha referenčních scénářích přímo definovány. Často se proto můžeme setkat s různými faktory a součiniteli (např. součinitel tvaru čela), které popisují vozidlo přenesené za pomoci výsledné velikosti efektů.

Velikost aerodynamických efektů se vždy stanovuje pro podmínky referenčního scénáře. Při výpočtech a simulacích je důležitým faktorem volba správných okrajových podmínek, která je však plně pod kontrolou uživatele a požadované scénáře lze reprodukovat zcela přesně. Naopak u experimentu je v podstatě nemožné zajistit potřebné referenční podmínky a zpracování výsledků je závislé na aplikaci různých korekcí nebo transformací.

Příklady zmíněných referenčních scénářů, ukázky vlivu různých parametrů v podobě okrajových podmínek výpočtu nebo experimentu na velikost aerodynamických efektů nebo praktická aplikace těchto scénářů jsou uvedeny v další části textu.

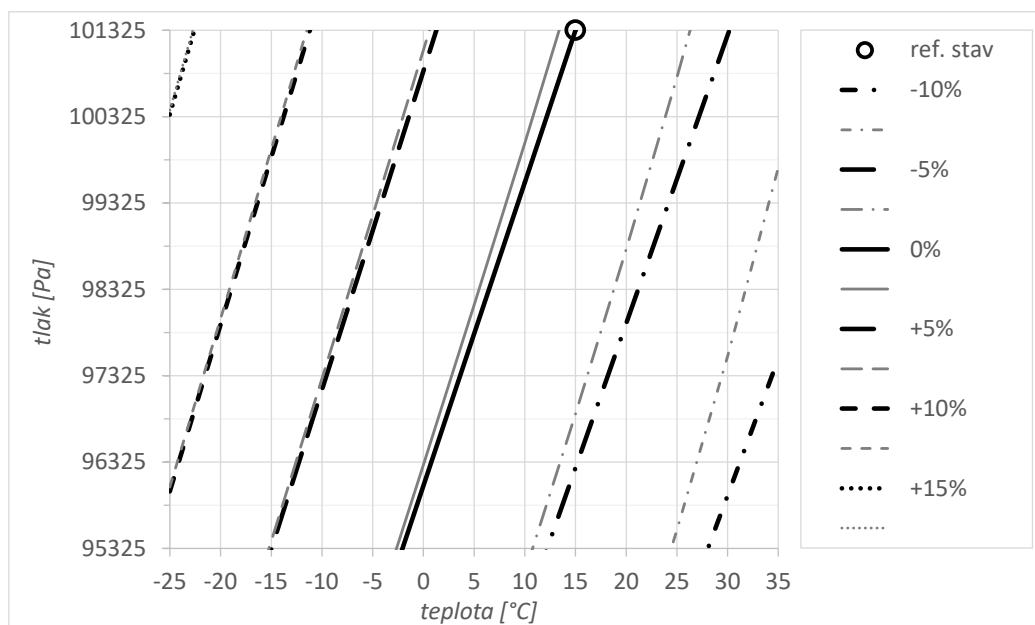
3 ATMOSFÉRICKÉ PODMÍNKY

Pro základní definici parametrů vzduchu se běžně používá model tzv. Mezinárodní standardní atmosféry, který je podrobně popsán v ISO 2533. Model pracuje s předpokladem vzduchu, který se chová jako ideální plyn bez obsahu vlhkosti nebo prachových částic. Pro nulovou nadmořskou výšku

(střední úroveň hladiny moře) jsou referenční hodnoty stavových veličin stanoveny následovně – tlak $p = 101325$ Pa, hustota $\rho = 1,225$ kg/m³ a teplota $T = 288,15$ K.

Pro výpočty a simulace, týkající se zejména hodnocení vozidel, je běžnou praxí používat právě tyto referenční hodnoty. Na základě známé závislosti stavových parametrů vzduchu s nadmořskou výškou lze ale obecně použít i atmosférické podmínky odpovídající konkrétní aplikaci. To je obvyklé zejména pro oblast infrastruktury, jejíž poloha je v tomto smyslu pevně definována. V každém případě je důležité vždy důsledně dodržovat jednotné okrajové podmínky při hodnocení velikosti efektů a porovnání vůči stanoveným mezním hodnotám.

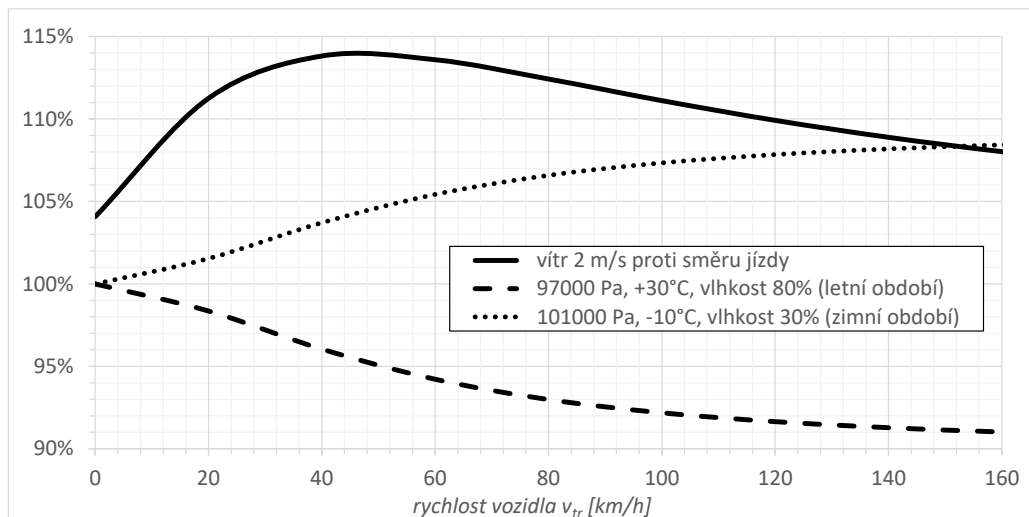
Experiment je závislý na konkrétních parametrech v daný okamžik měření a vyžaduje proto podrobně monitorovat všechny stavové parametry vzduchu v jeho průběhu. Měření teploty a atmosférického tlaku lze realizovat pro danou aplikaci vhodnými přístroji. Hustota vzduchu se stanovuje nepřímo z naměřených hodnot tlaku, teploty a relativní vlhkosti. Její závislost na těchto parametrech je podrobně zpracována v evropských normách, například v prEN 14067-5:2020. Význam hustoty vzduchu je zdůrazněn skutečností, že její hodnotě jsou přímo úměrné dynamické účinky při proudění. Grafické zobrazení relativní změny hustoty v obvyklých intervalech atmosférického tlaku a teploty ukazuje obrázek 1.



Obr. 1 Relativní změna hustoty vzduchu pro obvyklé hodnoty atmosférického tlaku a teploty na měřicím stanovišti v nadmořské výšce 250 m n.m. (atmosférický tlak je zde o cca 3000 Pa nižší než pro nulovou nadmořskou výšku); uvedeno pro relativní vlhkost $H = 0\%$ (tmavě) a 100% (světle); referenční stav (ref. stav) označuje referenční podmínky s hustotou $\rho = 1,225$ kg/m³ (při $H = 0\%$); vyjádřeno dle vztahu závislosti hustoty na parametrech vzduchu dle prEN 14067-5:2020

Mimo stavové veličiny vzduchu je významným parametrem rychlost větru. Ta ovlivňuje relativní rychlost nabíhajícího proudu na vozidlo nebo proudění v okolí infrastruktury a tím mění i velikost aerodynamických efektů. Hodnota dynamického tlaku je úměrná druhé mocnině rychlosti proudění, čímž se rychlost větru stává významnou okrajovou podmínkou. Běžným požadavkem na experiment je maximální rychlost větru do 2 m/s, což při jeho působení proti směru jízdy vozidla, které jede rychlostí 160 km/h (44,44 m/s), zapříčiní nárůst relativní rychlosti nabíhajícího proudu o 4,5 %. Při rychlosti vozidla pouze 80 km/h (22,22 m/s) je takový nárůst relativní rychlosti 9%, což názorně ukazuje na často opomíjenou skutečnost a význam zohlednění rychlosti větru i u vozidel pohybujících se nižšími rychlostmi.

Ukázka vlivu různých atmosférických podmínek a rychlosti větru je na obrázku 2 prezentována na příkladu relativní změny jízdního odporu vozidla. Tento vliv je nejen v tomto případě nezanedbatelný a o velikostech, které často převyšují požadovanou přesnost stanovení výsledku ať pomocí simulací nebo experimentu.



Obr. 2 Příklad vlivu atmosférických podmínek a rychlosti větru na relativní změnu jízdního odporu vozidla, který je stanoven pomocí zjednodušeného výpočtového modelu; referenční hodnota (100 %) odpovídá podmínkám atmosférického tlaku 101325 Pa, teplotě 15 °C, relativní vlhkosti 40 % a rychlosti větru 0 m/s

4 ŠÍŘÁ TRATĚ

Při jízdě na širé trati se vlivem tvaru vozidla a jeho pohybu v blízkosti zemského povrchu vyskytuje prostorový charakter proudění, kdy současně s lokálními změnami rychlosti dochází ke vzniku proměnného tlakového pole v okolí vozidla. S rostoucí vzdáleností od vozidla resp. osy koleje jsou sice tyto jevy utlumovány z důvodu disipace energie vlivem tření, ale přesto jsou do určité vzdálenosti nezanedbatelné a působí na infrastrukturní stavby, objekty nebo osoby v okolí trati nebo na míjená vozidla.

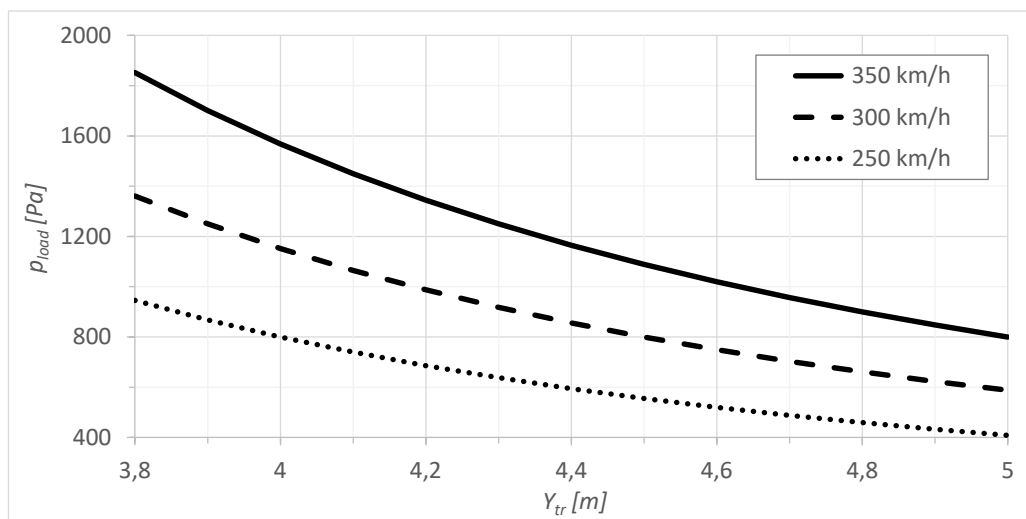
Část účinků podél trati je způsobena úplavem za vozidlem, v němž dochází k turbulentnímu proudění s vysokými lokálními rychlostmi. Význam má především horizontální složka rychlosti generující silové účinky, které působí na objekty a osoby vyskytující se podél trati. Projíždějící vozidlo také generuje tlakové špičky, které jsou charakteristické postupným nárůstem tlaku s maximem na úrovni začátku čela a skokovým poklesem na zápornou tlakovou špičku po průjezdu čela. Tyto tlakové účinky jsou zdrojem tlakového zatížení konstrukce míjených vozidel nebo infrastrukturních staveb.

Referenční trati, na které se oba tyto efekty hodnotí, je širá trať se standardním kolejovým svrškem bez dalších staveb nebo konstrukcí v jejím těsném okolí. Základní charakteristické rozměry této referenční trati jsou definovány například v EN 14067-4. Mezní hodnoty horizontálních rychlostí proudění vyvolané průjezdem vozidla jsou stanoveny pro referenční polohy ve výškách 0,2 m a 1,4 m nad temenem kolejnice a ve vzdálenosti 3 m od osy trati. U tlakových změn se hodnotí jejich velikost v rozmezí výšek 1,5 m až 3 m nad temenem kolejnice a ve vzdálenosti 2,5 m od osy trati. Mezní hodnoty jsou v obou případech definovány pro různé referenční rychlosti vozidel.

Referenční vozidlo je v těchto případech takové, které generuje mezní tlakové změny nebo rychlosti proudění v jeho úplavu při jízdě po referenční trati. Při návrhu prvků infrastruktury, dimenzování vozidel nebo hodnocení bezpečnosti pro umístěné objekty a přítomné osoby podél trati je možné vycházet pouze z mezních účinků vyplývajících z definovaných referenčních scénářů, aniž

by bylo nutné podrobně definovat konkrétní geometrii nebo provedení vozidla. Mnohem důležitější je v těchto případech správné zohlednění konkrétního řešení infrastruktury a zejména odlišností od referenční trati jako jsou například různá lokální specifika (nástupiště, stěny podél trati atd.).

Aerodynamické efekty popsané referenčním scénářem lze transformovat do nových okrajových podmínek na základě obecných zákonitostí, že například velikost tlakové změny je úměrná druhé mocnině rychlosti vozidla nebo že směrem od osy trati klesá s druhou mocninou této vzdálenosti. Tento přístup se uplatňuje při dimenzování konstrukcí, zhodnocení bezpečnosti provozu nebo účinků na osoby pro konkrétní případ řešení. Příklad vlivu některých okrajových podmínek na velikost efektů ukazuje obrázek 3, na kterém je uvedena velikost amplitudy tlakového zatížení pro dimenzování konstrukce vozidla při míjení s dalším vozidlem na širé trati v závislosti na rychlosti druhého vozidla a osové vzdálenosti kolejí.

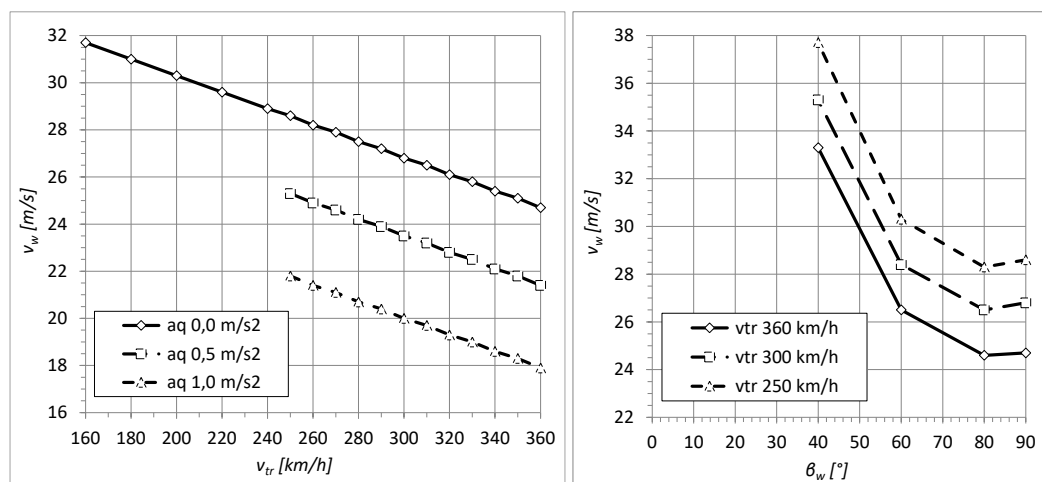


Obr. 3 Závislost amplitudy tlakového zatížení p_{load} způsobené tlakovou špičkou na čele vozidla s parametry odpovídajícími mezním hodnotám dle EN 14067-4 a jedoucího různými rychlostmi; zatížení je vyjádřeno pro vozidlo o šířce 3 m a pro různé osové vzdálenosti kolejí Y_{tr}

5 BOČNÍ VÍTR

V železniční aplikaci je pod tímto názvem označována otázka stability vozidla při účincích bočního větru. Stanovení stability vozidla vychází z podmínky odlehčení kola o 90 %, tj. na stav odpovídající 10 % statického zatížení, které nastává vlivem účinků relativní rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu. Pro stabilitu vozidla jsou významné aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo při obtékání proudem vzduchu a dynamické chování vozidla. Pro definovanou podmínku stability se stanovují tzv. charakteristické křivky větru (CWC), které dávají do vzájemné souvislosti maximální přípustnou rychlost větru, jeho úhel náběhu vůči vozidlu, rychlost vozidla a případná nevyrovnaná příčná zrychlení.

Pro hodnocení navrženého řešení vozidel se používají referenční charakteristické křivky větru, které udávají mezní hodnoty, které musí navrhované vozidlo splňovat. Na druhé straně musí infrastruktura svým řešením zajistit, že pro toto referenční vozidlo je zaručena patřičná bezpečnost a za jeho provozu nedojde k překročení této referenční charakteristické rychlosti větru s pravděpodobností vyšší než je stanovená mez, tj. přijatelná míra rizika. Referenční křivky větru jsou příkladem jednoznačné definice rozhraní mezi vozidly a infrastrukturou, čímž je umožněn jejich návrh odděleně pouze se zohledněním těchto referenčních hodnot. Příklad referenčních charakteristických křivek větru pro vysokorychlostní vozidla je uveden na obrázku 4.



Obr. 4 Grafické znázornění referenčních charakteristických křivek větru (CWC) pro osobní vozidla a lokomotivy s rychlostí $250 \text{ km/h} \leq v_{tr, \max} \leq 360 \text{ km/h}$ dle EN 14067-6 udávající rychlosti větru v_w v závislosti na rychlosti vozidla v_{tr} pro úhel náběhu větru $\beta_w = 90^\circ$ (vlevo) a v závislosti na úhlu náběhu větru β_w pro nevyrovnané příčné zrychlení $a_q = 0 \text{ m/s}^2$ a vybrané rychlosti vozidla v_{tr} (vpravo)

6 TUNEL

Při vjezdu vozidla do tunelu vznikají tlakové vlny. Vjezdem vozidla do tunelu vzniká kompresní tlaková vlna, která se dále šíří tunelem rychlostí zvuku, na druhém konci se odráží a postupuje zpět s opačnou velikostí jako expanzní tlaková vlna. Při vjezdu konce vozidla do tunelu vzniká expanzní tlaková vlna, jejíž šíření a odrazy probíhají analogicky. Toto nastává při sólo průjezdu vozidla tunelem i při míjení dvou vozidel, při kterém se pouze vyskytuje vyšší počet tlakových vln a proto i komplexnější průběh tlakových změn. Tyto tlakové změny jsou spojeny s většinou otázek aerodynamiky v tunelech jako je problematika jejich limitních hodnot a tzv. zdravotního kritéria, emise mikrotlakových vln nebo zatížením konstrukce vozidla i tunelu.

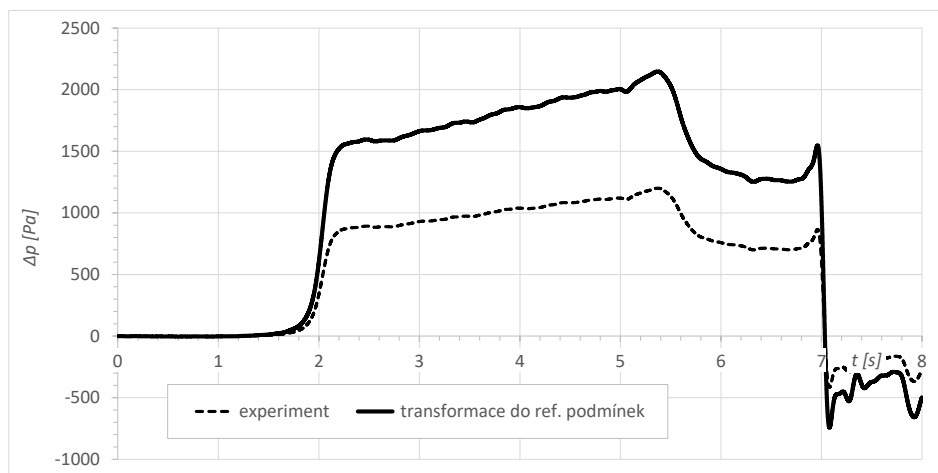
Ze vzniku a šíření tlakových vln vyplývá, že statický tlak se na pevné pozici v tunelu vyvíjí následovně – vjezd čela do tunelu vyvolá prudký nárůst tlaku Δp_N , poté následuje pozvolný nárůst Δp_{fr} způsobený účinky tření podél hlavní části vozidla a poté pokles tlaku Δp_T vyvolaný vjezdem konce vozidla do tunelu. Další charakteristický jev je náhlý pokles tlaku Δp_{HP} , který představuje průjezd čela vlaku kolem měřicího místa v tunelu. Základní požadavky jsou tedy v současnosti definovány formou limitů pro Δp_N , $\Delta p_N + \Delta p_{fr}$ a $\Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T$.

Referenční podmínky pro stanovení a hodnocení tlakových změn využívají referenční tunel s definovanou plochou jeho příčného průřezu, jak uvádí prEN 14067-5:2020. Jejich nedílnou součástí jsou dále referenční atmosférické podmínky, počáteční stav s nulovým prouděním vzduchu v tunelu a různé referenční rychlosti vozidla. Referenční vozidlo je obdobně jako v předchozích případech takové, které generuje mezní tlakové změny při průjezdu tímto referenčním tunelem při referenční rychlosti a dalších podmínkách.

Častou otázkou při provádění výpočtů a simulací je, jakým způsobem nahradit referenční vozidlo. Jelikož je toto vozidlo popsáno pouze maximálními tlakovými změnami Δp_N , Δp_{fr} a Δp_T , které v referenčních podmínkách generuje, je nutné se oprostit od definice jeho konkrétní geometrie. Geometrii lze nahradit tvarovými a dalšími součiniteli, které je možné odvodit na základě fyzikální podstaty vzniku tlakových změn. Výhodou tohoto přístupu je možnost využití zjednodušených nebo analytických nástrojů i při zachování požadované přesnosti výpočtu.

Při experimentu nezbývá než pracovat s daným vozidlem a existující infrastrukturou. Naměřená data je nutné následně transformovat do referenčních podmínek pomocí korekčních faktorů nebo

komplexní transformace včetně například simulace experimentu výpočetními metodami, jejich validace a následného určení hodnot validovaným výpočtem. Ukázka transformace naměřených dat do referenčních podmínek je uvedena na obrázku 5. Identický postup je možné aplikovat i při transformaci referenčního scénáře do nových podmínek odpovídající konkrétnímu řešení, což lze využít například při provádění simulací v průběhu návrhu a ohodnocení jednotlivých řešení.



Obr. 5 Příklad naměřeného kolísání tlaku (čárkovaně) na pevné pozici v tunelu o průřezu 78 m² při průjezdu vozidla rychlostí 192 km/h, při okrajových podmínkách hustoty vzduchu 1,175 kg/m³ a počátečního proudění v tunelu o rychlosti 1 m/s a transformovaný průběh (plnou čarou) do podmínek referenčního scénáře s tunelem o průřezu 53,6 m², s rychlostí vozidla 200 km/h a hustotou vzduchu 1,225 kg/m³

Další typický příklad referenčního scénáře se objevuje u problematiky vzniku a šíření mikrotlakových vln. Vozidlo při vjezdu do tunelu vytváří kompresní vlnu, jejíž tlakový gradient může dále narůstat vlivem rozdílných tlakových poměrů (rozdílné rychlosti zvuku) před a za vlnou. Tento jev je podpořen případnou malou disipací energie na hladkých površích stěn i jízdní dráhy v tunelu. Na druhém portálu se kromě odrazu v podobě expanzní vlny část energie vyzáří jako mikrotlaková vlna, která je spojena s emisí hluku do okolí.

Limitující kritérium je maximální tlakový gradient kompresní tlakové vlny. Pro vozidla nebo tunely (nad rychlosti 200 km/h) je požadováno, aby simulovaný maximální tlakový gradient s definovanou referenční geometrií tunelu nebo vozidla a při rychlosti 250 km/h nebo nižší nepřekračoval hodnoty stejným způsobem simulovaného referenčního případu. Oproti předchozím případům je zde tedy definována konkrétní referenční geometrie vozidla a infrastruktury i z důvodu, že ověřování návrhů probíhá především za pomoci simulací.

7 ZÁVĚR

Přesná definice a znalost okrajových podmínek při výpočtech nebo experimentu je důležitou součástí hodnocení aerodynamických efektů na železnici. To zajišťuje jednoznačný kontext pro dosažené výsledky a předpoklad pro jejich správné porovnání ke stanoveným mezním hodnotám. Tyto okrajové podmínky se souhrnně označují jako referenční scénář, který v různých případech definuje referenční vozidla, infrastrukturu, atmosférické podmínky nebo provozní situace. Správná aplikace referenčních scénářů je proto nezbytná při posouzení vhodnosti navrhovaného řešení a správné konstrukce vozidel nebo infrastruktury pro zajištění požadované bezpečnosti na železnici.



Literatura

- [1] ISO 2533. *Standard Atmosphere*. Geneva: ISO, 1975.
- [2] ČSN EN 14067-4+A1. *Železniční aplikace – Aerodynamika – Část 4: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku na širé trati*. Praha: ČAS, 2019.
- [3] prEN 14067-5. *Railway applications – Aerodynamics – Part 5: Requirements and assessment procedures for aerodynamics in tunnels*. Brussels: CEN, 2020.
- [4] ČSN EN 14067-6. *Železniční aplikace – Aerodynamika – Část 6: Požadavky a zkušební postupy pro hodnocení účinků bočního větru*. Praha: ČAS, 2019.