



AERODYNAMIKA V ŽELEZNIČNÍCH TUNELECH

Ing. Emanuel Mergl

mergl@vukv.cz

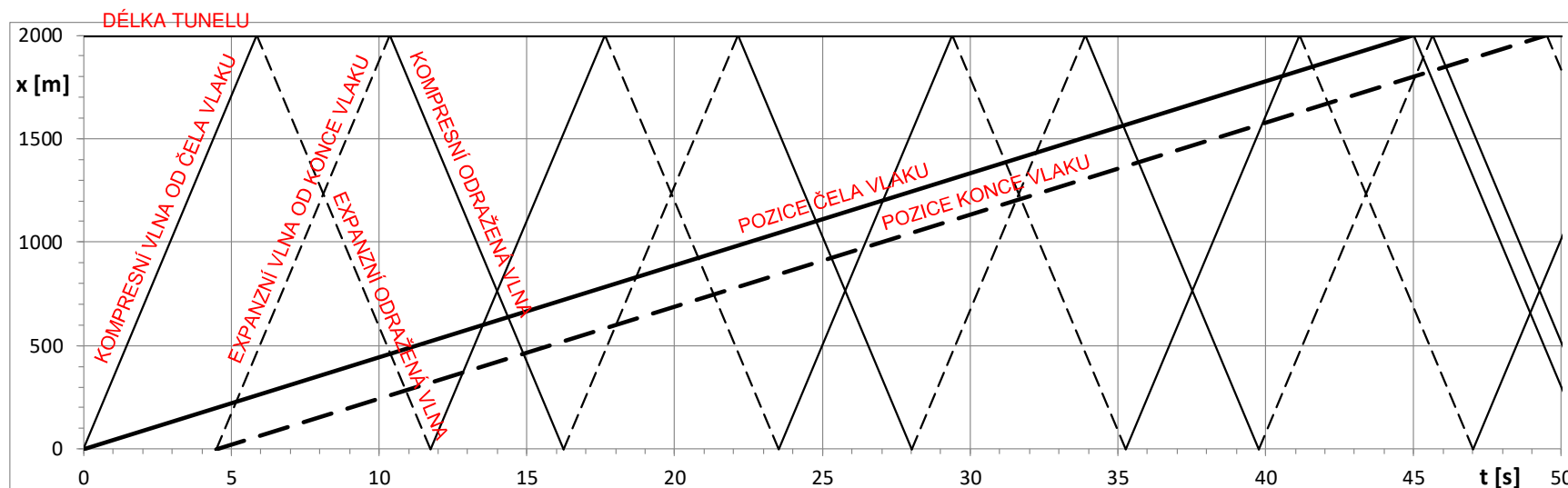
***VÚKV a.s., Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5
www.vukv.cz***

ÚVODEM – AERODYNAMIKA V ŽELEZNIČNÍ APLIKACI

Účinky na osoby podél trati (rychlost proudu v úplavu)	EN 14067-4	<i>Širá trať</i>
Tlaková vlna na čele vlaku (tlakové změny)		
Boční vítr (stabilita vozidel při účincích bočního větru)	EN 14067-6	
Aerodynamický účinek na šterkové lože (nadzvedávání balastu)	(WI=00256908)	
Účinky na sání a výdechy zařízení (tlakové a teplotní pole)	-	
Usazování ledu a sněhu na vozidle	-	
Kolísání tlaku v tunelu (charakteristické tlakové změny, zdravotní kritérium 10 kPa)	EN 14067-5	<i>Tunely</i>
Mikro-tlakové vlny (tlakový gradient při vjezdu vozidla do tunelu)		
Tlakový komfort cestujících (tlakotěsnost vozidla)		
Indukované proudění, ventilace, podzemní stanice		
Aerodynamické zatížení konstrukce vozidla i infrastruktury (vlivem tlakových vln na čele, tlakových změn v tunelu, působení větru)	EN 14067-4 EN 14067-5	<i>Širá trať & Tunely</i>
Aerodynamický odpor		

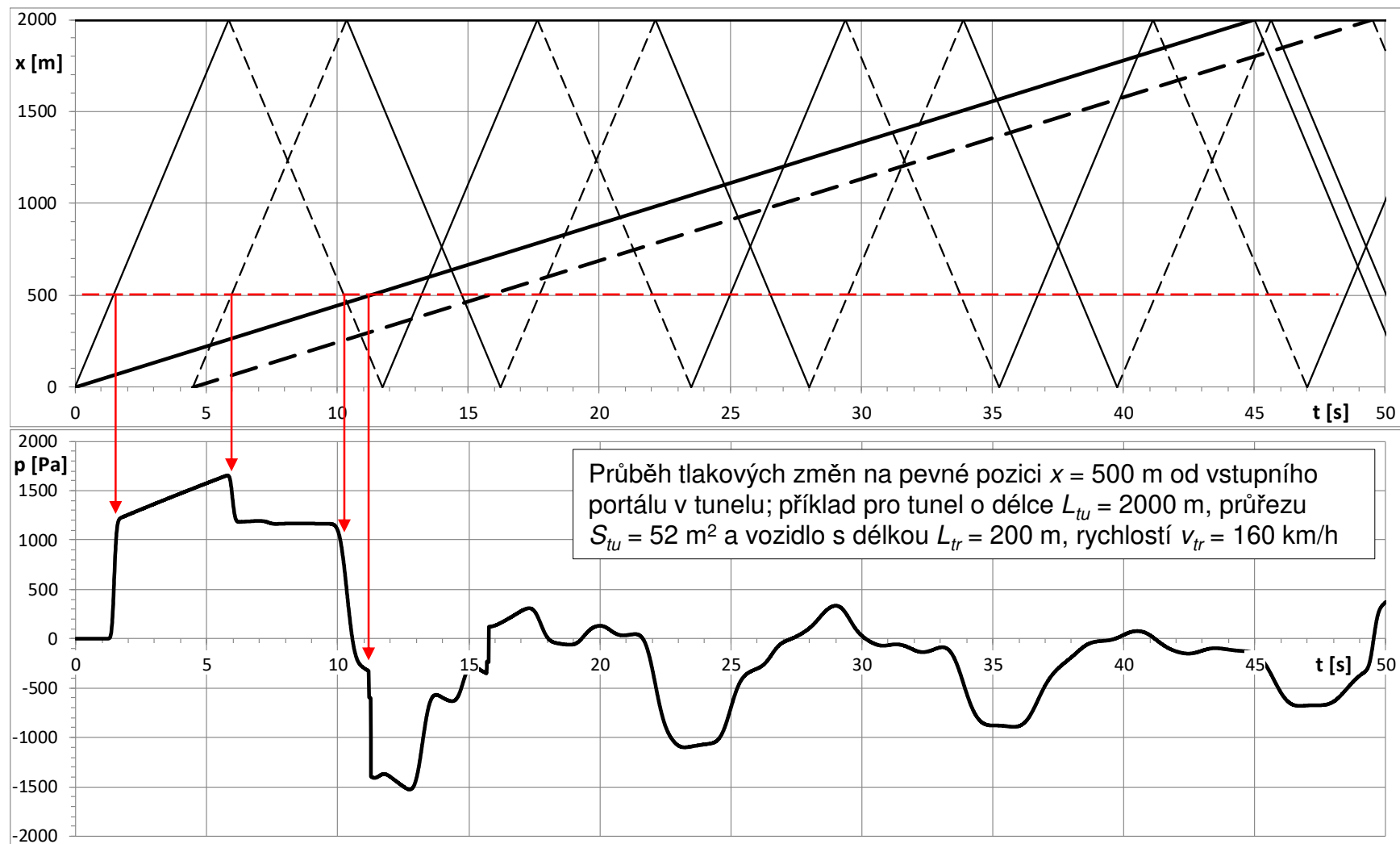
TLAKOVÉ VLNY V TUNELU

- Vlnový diagram šíření tlakových vln v tunelu při sólo průjezdu vozidla



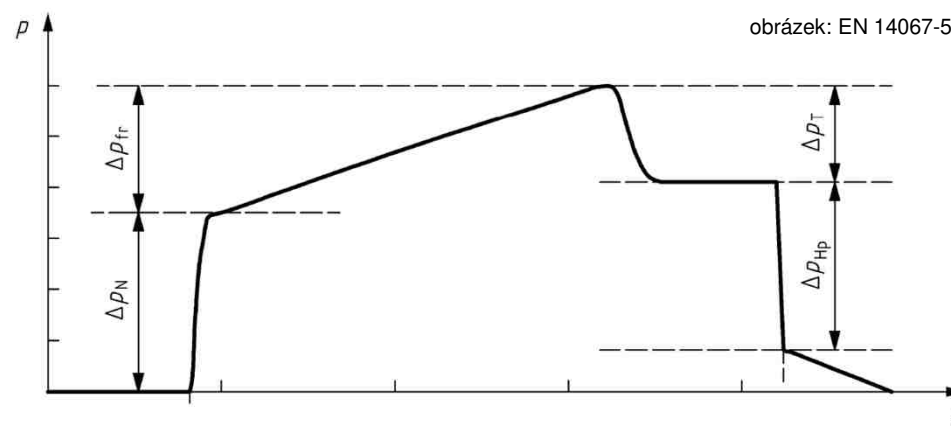
Příklad pro tunel o délce $L_{tu} = 2000$ m, průřezu $S_{tu} = 52$ m² a vozidlo s délkou $L_{tr} = 200$ m, rychlostí $v_{tr} = 160$ km/h; čas $t = 0$ s odpovídá vjezdu čela vlaku do tunelu

TLAKOVÉ ZMĚNY V TUNELU



CHARAKTERISTICKÉ SLOŽKY TLAKOVÝCH ZMĚN

- Tyto složky popisují základní efekty (tlakové vlny) v tunelu
- Závislost vozidla a infrastruktury v podobě **tlakové charakteristiky vlak-tunel při průjezdu vozidla tunelem** (zobrazuje průběh tlaku na daném místě v tunelu)



Δp_N ... prudký nárůst tlaku vyvolaný vjezdem čela vlaku do tunelu

Δp_{fr} ... pozvolný nárůst způsobený účinky tření podél hlavní části vlaku

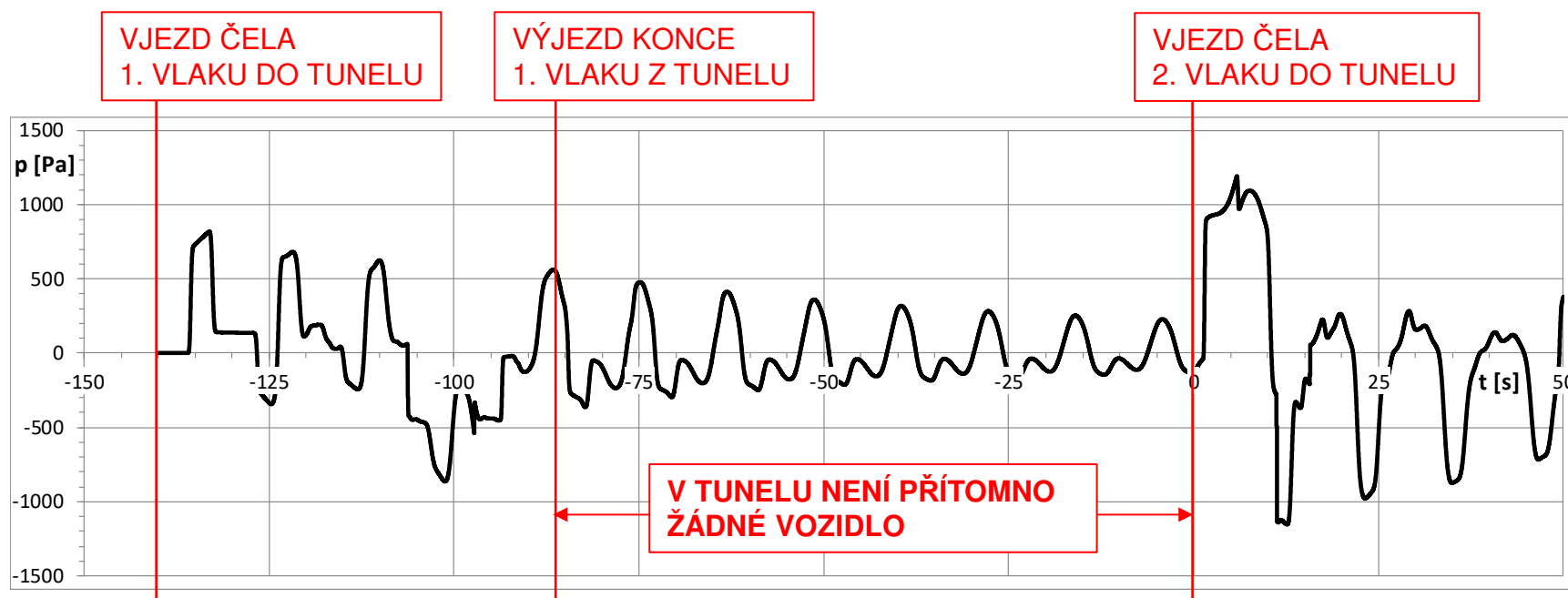
Δp_T ... pokles tlaku vyvolaný vjezdem konce vlaku do tunelu

Δp_{HP} ... náhlý pokles tlaku, který představuje průjezd čela vlaku kolem měřicího místa v tunelu

FIKTIVNÍ DÉLKA TUNELU

- Tlakové vlny přetrvávají v tunelu i v čase, kdy vozidlo již tunel opustilo, a to až doby, dokud nejsou zcela utlumeny vlivem třecích efektů
 - tzv. **aerodynamické míjení vozidel**, které se popisuje fiktivní délkou tunelu

$$L_{tu,fict} = L_{tu} + 2N \frac{L_{tu}}{c} v_{tr}$$



KRITICKÁ DÉLKA TUNELU

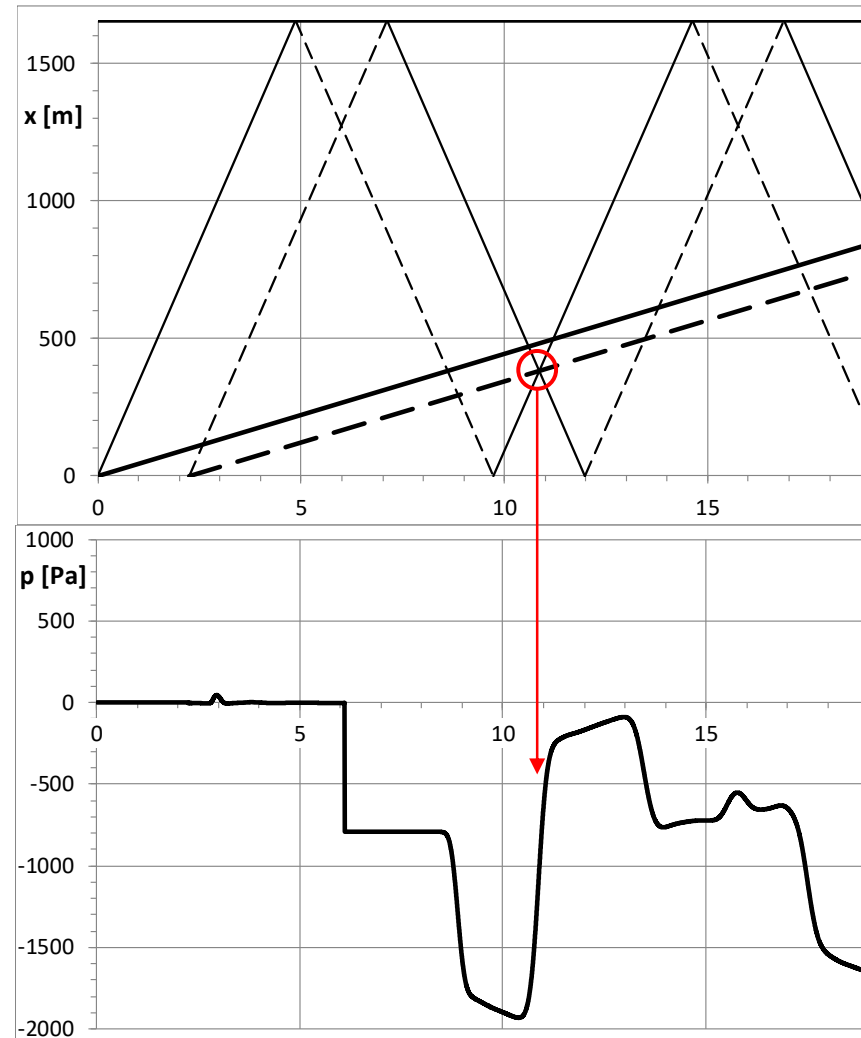
- Příklad jízdy vozidla tunelem, kdy na konci vozidla je **dosaženo největší záporné tlakové změny** z důvodu expanze kompletní tlakové charakteristiky
- Tato situace nastává při kritické délce tunelu, která je přibližně rovna

$$L_{tu,crit} \approx \frac{L_{tr}}{4} \frac{c}{v_{tr}} \left(1 + \frac{c}{v_{tr}} \right)$$

- Analogicky situace nastává i při míjení dvou vozidel v tunelu; existuje však více kombinací a kritická délka tunelu je funkcí

$$L_{tu,crit} \approx f(L_{tr,1}; L_{tr,2}; v_{tr,1}; v_{tr,2}; c; t_e)$$

Vlnový diagram a průběh tlakových změn na konci vozidla pro sólo průjezd tunelem o kritické délce; příklad pro kritickou délku tunelu $L_{tu,crit} = 1657$ m, vozidlo s délkou $L_{tr} = 100$ m a rychlost $v_{tr} = 160$ km/h

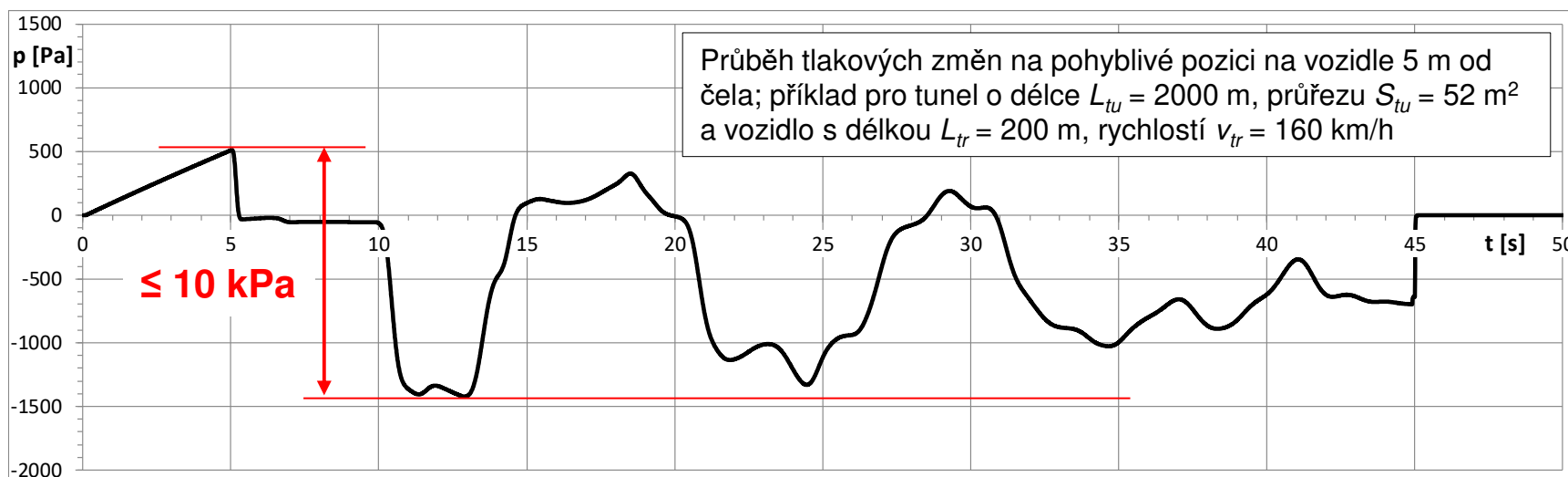


ZDRAVOTNÍ KRITERIUM 10 kPa

- Požadavek na **maximální tlakovou změnu 10 kPa** způsobenou průjezdem vozidla maximální dovolenou rychlostí, **měřenou na pohyblivé pozici na vnějšku vozidla**
- Kritérium se vyhodnocuje pro referenční vozidlo

		vyhodnocení
100 m < $L_{tu} \leq 12\,000$ m	$v_{\max, \text{line}} \leq 160$ km/h	ANO pro B > 33 %
	$v_{\max, \text{line}} > 160$ km/h	ANO
$L_{tu} > 12\,000$ m	bez omezení	ANO (specifické)

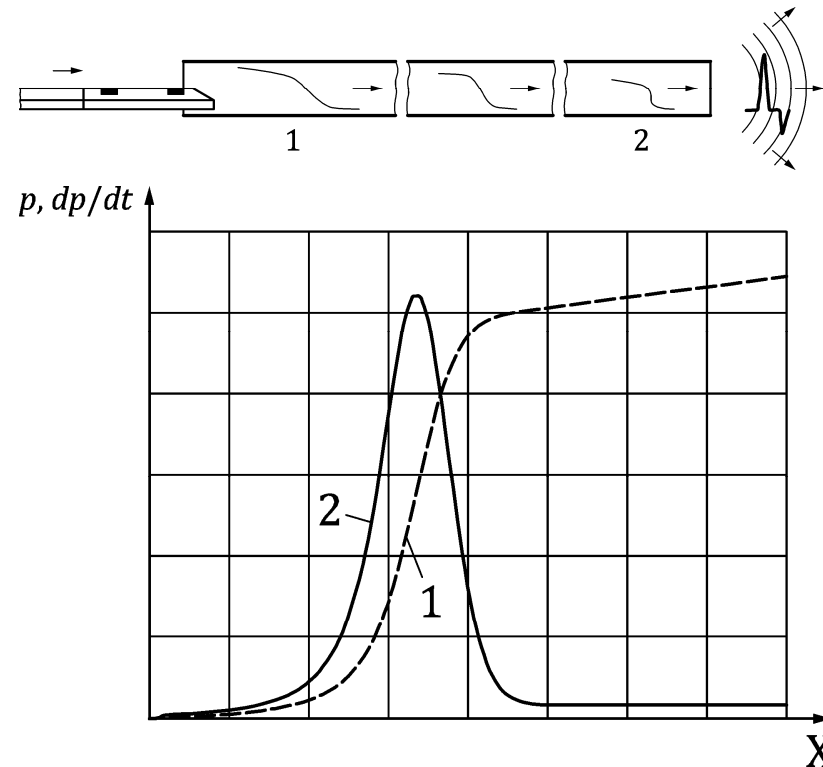
Rozsah vyhodnocení zdravotního kritéria s ohledem na délku a traťovou rychlost dle prEN 14067-5:2018



MIKROTLAKOVÉ VLNY

- Kompresní vlna, vygenerovaná při vjezdu vozidla do tunelu, se na výstupním portálu částečně odráží a částečně **emituje do okolního prostředí jako mikrotlaková vlna**
- Při šíření kompresní vlny tunelem dochází k postupnému navyšování jejího gradientu vlivem rozdílných vlastností prostředí (resp. rychlostí zvuku) před a za vlnou
- Emitovaná mikrotlaková vlna vytváří hlukové znečištění v okolí portálu tunelu
- EN 14067-5 definuje maximální tlakový gradient dp/dt při vjezdu vozidla do tunelu v rozsahu **8 800 Pa/s až 9 500 Pa/s**

obrázky: EN 14067-5



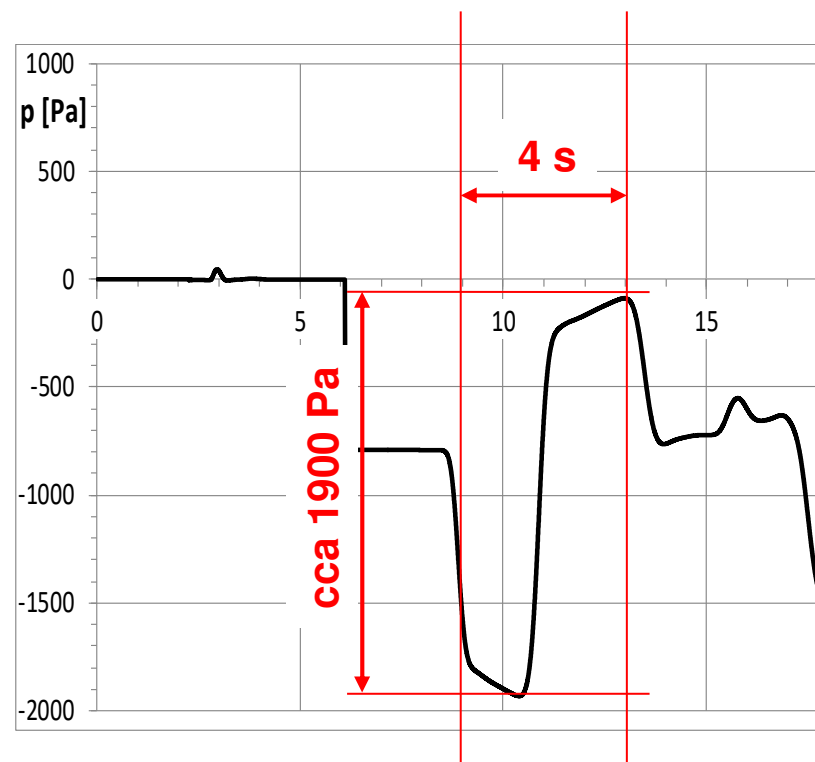
- 1 ... průběh tlaku $p(t)$ při vjezdu vozidla do tunelu
 2 ... průběh tlakového gradientu dp/dt

TLAKOVÝ KOMFORT CESTUJÍCÍCH

- Doporučené hodnoty tlakového komfortu například dle EN 14067-5, příloha B (ERRI C 218, 1999):

„...tlaková změna, které je vystaven cestující v netlakotěsném vozidle, by neměla překročit 4,5 kPa / 4 s (dvoukolejný tunel a situace kritického míjení dvou vozidel), 3,0 kPa / 4 s (jednokolejný tunel)“

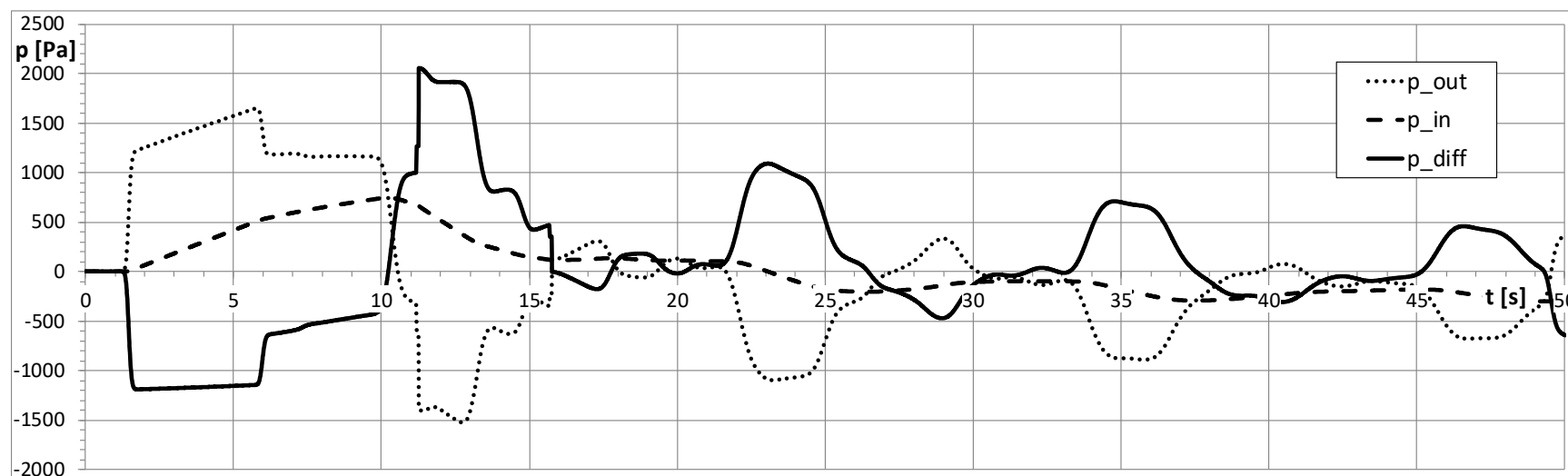
- Požadavek na **zajištění tlakového komfortu pro netlakotěsná vozidla lze zajistit pouze parametry tunelu nebo provozními podmínkami**



Průběh tlakových změn vně i uvnitř netlakotěsného vozidla pro sólo průjezd tunelem o kritické délce (dle předchozího příkladu, rychlost $v_{tr} = 160$ km/h)

AERODYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE

- Časově proměnné spektrum tlakových změn způsobuje i proměnné tlakové zatížení v čase, může působit jako přetlak i podtlak a je zdrojem pro **výjimečné (kvazi-statické) i únavové zatížení**
- Velikost zatížení je **ovlivněna tlakotěsností** (= míra přenosu tlakových změn z jedné na druhou stranu konstrukce)
- EN 14067-5 (a přeneseně i TSI LOC&PAS, TSI INF nebo EN 12663-1) požadují zohlednění těchto zatížení při návrhu konstrukcí



Průběh tlakových změn vně (p_{out}), uvnitř (p_{in}) a výsledného tlakového zatížení konstrukce (p_{diff}) při sólo průjezdu vozidla tunelem, uvažována tlakotěsnost konstrukce $\tau_{dyn} = 10$ s

PŘÍKLAD ŘEŠENÍ TUNELU

- Existence aerodynamických efektů v tunelu ovlivňuje jeho konstrukční řešení, např. provedení portálu u Wienerwaldtunnel (AT), kde je navržena specifická geometrie, podélné přesazení obou portálů, apod.

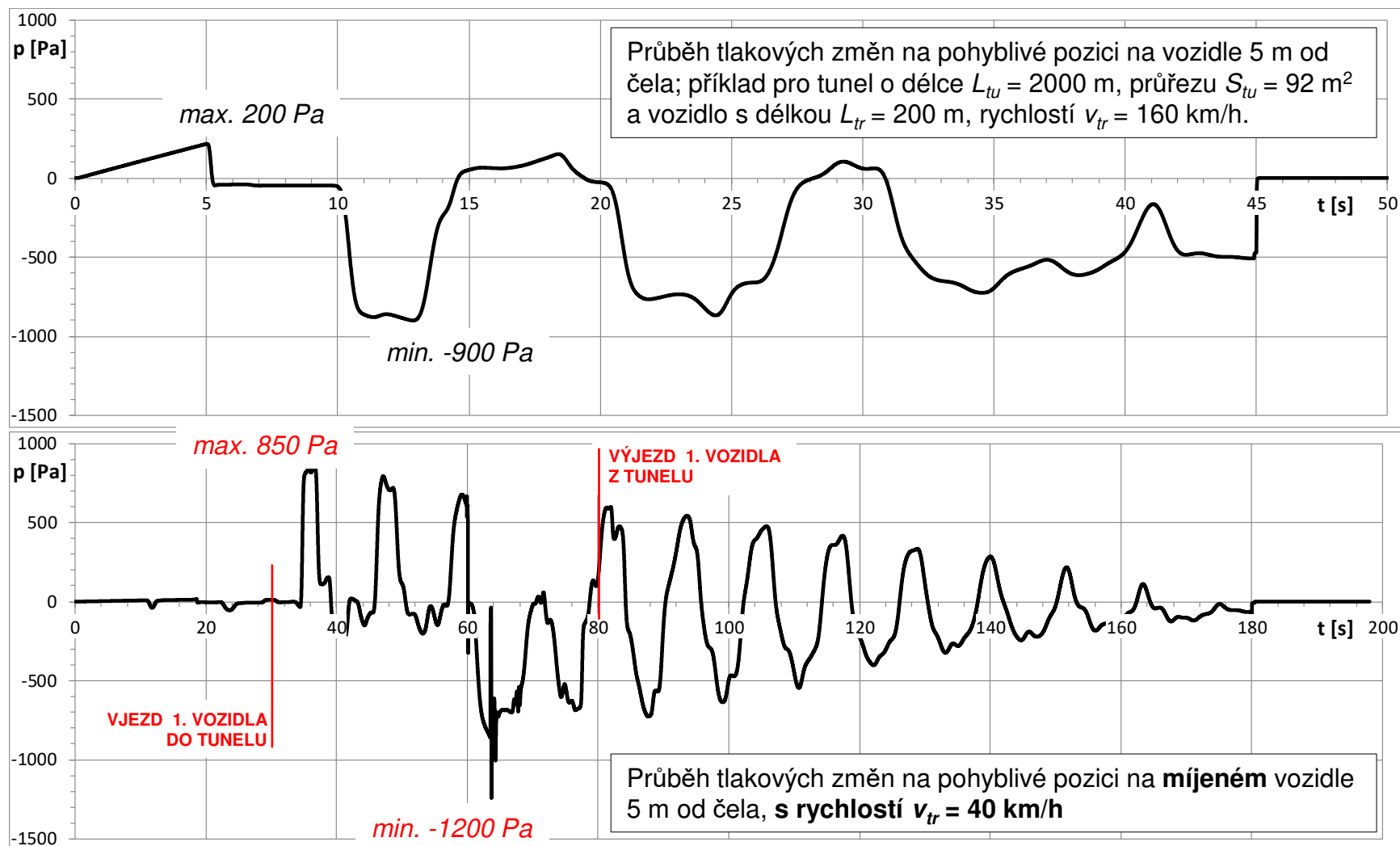


foto: igt-engineering.com



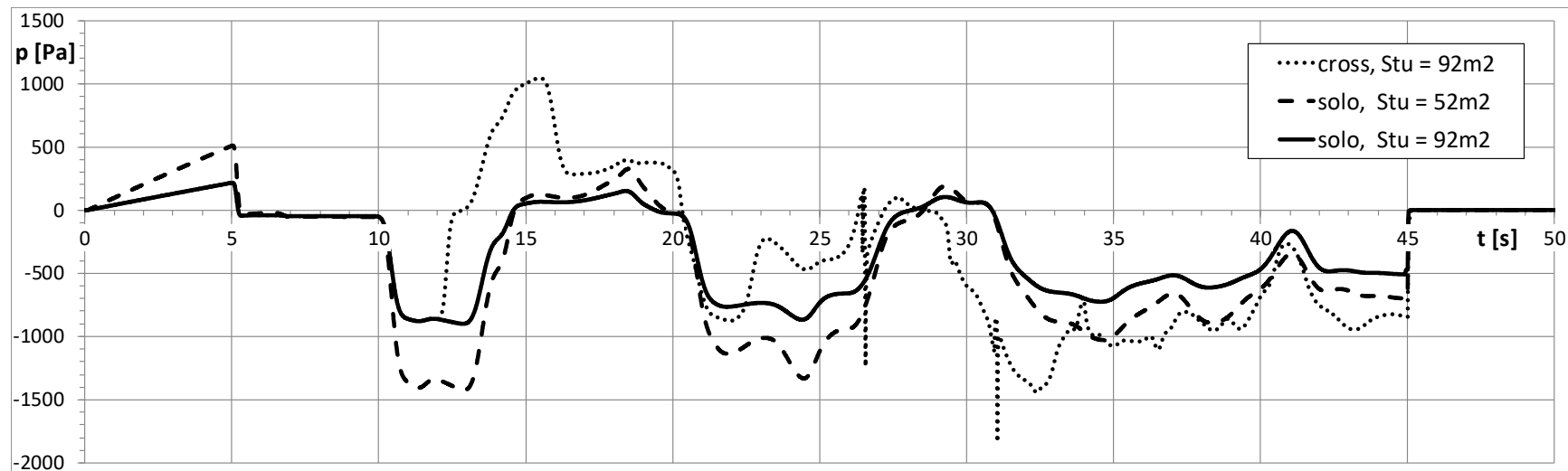
foto: de.wikipedia.org/wiki/Wienerwaldtunnel

SMÍŠENÝ PROVOZ



JEDNO- A DVOUKOLEJNÉ TUNELY

- **Tlakové změny ovlivňuje průřez tunelu**, tj. sólo průjezd jednokolejným tunelem je spojen s vyššími tlakovými změnami než sólo průjezd dvojkolejným tunelem
- U dvojkolejného tunelu existuje statisticky velmi málo pravděpodobný výskyt extrémních tlakových změn v případě míjení dvou vozidel, ale pro mnoho otázek (např. únavové zatížení konstrukce, běžné vnímání tlakového komfortu, atd.) jsou rozhodující situace vyskytující se při každém průjezdu tunelu
 - v určitém pohledu **jednokolejné tunely kladou vyšší nároky na konstrukci vozidel**



Srovnání tlakových změn vně vozidla při míjení s druhým vozidlem v tunelu o průřezu $S_{tu} = 92 \text{ m}^2$ a při sólo průjezdech tunely o $S_{tu} = 52 \text{ m}^2$ a $S_{tu} = 92 \text{ m}^2$; ve všech případech identická rychlost $v_{tr} = 160 \text{ km/h}$ i ostatní parametry

ZÁVĚREM

- Aerodynamika na železnici (nejen) v tunelech musí být posuzována pro celý **system vozidlo – infrastruktura – provoz** a klade požadavky v obdobné míře na všechny subsystemy
- Problematika zasahuje nejen oblast vysokorychlostní železnice, ale i **konvenční železniční system** (např. zatížení konstrukce)
- Jsou přítomna témata, která ovlivňují **bezpečnost** (odolnost konstrukce při aerodynamických zatíženích), **komfort** (tlakový komfort cestujících, efekty od mikrotlakových vln) nebo **ekonomičnost** (aerodynamický odpor)



Děkuji za pozornost!

***VÚKV a.s., Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5
www.vukv.cz***