

Tomáš Michálek¹, Jindřich Řezníček²

Rozbor vlivu odporu z jízdy tunelem na výsledky trakčních výpočtů

Klíčová slova: *odpor z jízdy tunelem, jízdní odpory, aerodynamický odpor, tunelový faktor, trakční výpočty, spotřeba energie*

Anotace

Tento článek se zabývá problematikou nárůstu jízdního odporu vlaku v důsledku jízdy tunelem pro potřeby zohlednění vlivu tunelu v trakčních výpočtech. V první části jsou představeny různé přístupy ke kvantifikaci odporu z jízdy tunelem a na modelovém příkladu rozjezdu vlaku jsou demonstrovány rozdíly ve výsledcích trakčních výpočtů při různých způsobech zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku. Dále je pozornost věnována konkrétnímu příkladu plánované přeložky trati Ústí nad Labem–Dražďany, jejíž součástí má být přibližně 26 km dlouhý Krušnohorský tunel. S využitím trakčních výpočtů je provedeno porovnání staré a nové trati z hlediska jízdních dob a spotřeby trakční energie vybraných vlaků osobní a nákladní dopravy.

Annotation

This article deals with the problem of running resistance increase caused by tunnels for the purposes of its application in traction calculations. At first, different approaches to the quantification of the tunnel resistance are presented and their influence on the traction calculation results is demonstrated on a model example of a train acceleration. Then, attention is paid to a specific case of the planned railway line Ústí nad Labem–Dresden, including the new – approximately 26 km long – Erzgebirge Base Tunnel. By using of the traction calculations, a comparison of the old and new railway lines is performed from the point of view of running time and traction energy consumption for selected passenger as well as freight trains.

Úvod

V současné době je v podmínkách české železnice připravována výstavba sítě tzv. rychlých spojení (RS), jež jsou tvořena kombinací modernizovaných tratí a novostaveb tratí vysokorychlostních. Součástí těchto tratí se mají stát i železniční tunely o délkách doposud v ČR nevídaných, s traťovou rychlostí 200 km/h nebo vyšší. Dlouhé tunely jsou prostředkem, jak i v nepříznivém terénu docílit směrových poměrů nutných pro provoz vysokými rychlostmi při zachování přijatelných hodnot podélných sklonů (které jsou ovlivněny provozním určením trati). Přínosem těchto tunelů je většinou výrazné

¹ Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.; odborný asistent na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice; adresa: Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová; e-mail: tomas.michalek@upce.cz.

² Bc. Jindřich Řezníček; absolvent studijního oboru Dopravní prostředky – zaměření Kolejová vozidla na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice; e-mail: jindrareznicek@seznam.cz.

zkrácení délky trati, které spolu s vyšší traťovou rychlostí přispívá ke zkrácení jízdních dob. Jejich negativem je naopak zvýšení aerodynamického odporu, které je umocněno vyšší rychlostí zde provozovaných vlaků. Konečným důsledkem překonávání vyššího odporu vzduchu při jízdě vlaku tunelem je pak zvýšená spotřeba trakční energie.

V roce 2020 byla na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice vypracována bakalářská práce [1], jež se zabývá právě rozbořem vlivu odporu z jízdy vlaku tunelem. V práci jsou jednak ukázány dva rozdílné přístupy k zohlednění odporu z jízdy tunelem v trakčních výpočtech a na modelovém příkladu plánovaného Krušnohorského tunelu je dále demonstrován vliv odporu z jízdy tunelem na výsledky těchto trakčních výpočtů, tedy na jízdní doby a zejména na spotřebu trakční energie. Výsledky a nejvýznamnější závěry práce jsou představeny v tomto článku.

1 Odpor z jízdy vlaku tunelem v trakčních výpočtech

Základní úlohy trakční mechaniky, tedy zejména výpočty tachogramů, díky kterým lze stanovit jízdní dobu a spotřebu trakční energie vyšetřovaného vlaku ve vyšetřovaném traťovém úseku, je možné řešit numerickým integrováním pohybové rovnice vlaku (viz [2]). Ta může být ve svém základním tvaru vyjádřena v jedné z následujících podob:

$$\sum_{(i)} (m_i \cdot (1 + \rho_i)) \cdot \frac{dv}{dt} = F_{ok} - B - O_v - O_t, \quad (1)$$

$$\sum_{(i)} (m_i \cdot (1 + \rho_i)) \cdot \frac{dv^2}{2 \cdot dx} = F_{ok} - B - O_v - O_t, \quad (2)$$

kde význam jednotlivých veličin je následující:

- m_i [kg] reprezentuje hmotnost jednotlivých vozidel řazených ve vlaku;
- ρ_i [-] reprezentuje součinitel rotačních hmot jednotlivých vozidel;
- v [m·s⁻¹] je aktuální rychlost jízdy vlaku;
- t [s] je čas (pohybová rovnice vlaku ve tvaru (1) se využívá pro řešení časového tachogramu, tedy závislosti rychlosti na čase);
- x [m] je ujetá dráha (pohybová rovnice vlaku ve tvaru (2) se využívá pro řešení dráhového tachogramu, tedy závislosti rychlosti na ujeté dráze);
- F_{ok} [N] je celková tažná síla na obvodu kol hnacích dvojkolí;
- B [N] je celková brzdná síla všech vozidel;
- O_v [N] je celkový vozidlový odpor vlaku;
- O_t [N] je celkový traťový odpor vlaku.

1.1 Kvantifikace jízdních odporů v trakčních výpočtech

Je zřejmé, že jízdní odpory (vozidlové a traťové) ovlivňují pohyb vlaku velmi významně. Pro **vyjádření vozidlového odporu** se přitom běžně používá tzv. Davisův vztah:

$$O_v = A + B \cdot V + C \cdot V^2, \quad (3)$$

kde V [km·h⁻¹] reprezentuje rychlost jízdy vlaku a konstanty A , B a C jsou buď získány experimentálně pro konkrétní sestavu vlaku, nebo se využívá tzv. typů jízdního odporu, které jsou definovány jako měrné vozidlové odpory o_v [N·kN⁻¹]:

$$o_v = \frac{O_v}{M \cdot g} = a + b \cdot V + c \cdot V^2, \quad (4)$$

kde M [t] je hmotnost vlaku, $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ je tíhové zrychlení a hodnoty konstant a , b a c opět vycházejí z výsledků experimentů, ale pro praktické použití jsou pro různé kategorie vlaků dány příslušným předpisem. V podmínkách české železnice se jedná o předpis V 7 *Trakční výpočty* [3], přičemž zatím poslední aktualizace vzorců měrného vozidlového odporu proběhla v roce 1992 na základě výsledků měření realizovaných v roce 1991 v podmínkách VÚŽ. Na potřebu další aktualizace stávajících vťahů pro vozidlové odpory pak poukazují například výsledky provozních výběhových zkoušek kontejnerových vlaků společnosti METRANS Rail, provedených v letech 2013 až 2016 na trati mezi Brnem a Břeclaví, které jsou shrnuté v příspěvku [4].

Traťový odpor, který zahrnuje odpor ze sklonu koleje O_s [N] a odpor z jízdy obloukem koleje O_R [N], může být určen pomocí vztahu:

$$O_t = O_s + O_R = s_n \cdot M \cdot g, \quad (5)$$

kde s_n [‰] je tzv. náhradní (redukovaný) sklon, který v sobě kromě podélného sklonu s [‰] zahrnuje i měrný odpor z jízdy obloukem o_R [$\text{N}\cdot\text{kN}^{-1}$]; tedy:

$$s_n = s + o_R = s + \frac{k_1}{R - k_2}, \quad (6)$$

kde R [m] je poloměr oblouku a konstanty k_1 a k_2 jsou závislé na volbě metody odhadu měrného vozidlového odporu.

1.2 Problematika odporu z jízdy tunelem – různé přístupy

Za povšimnutí stojí, že **odpor z jízdy vlaku tunelem** stojí poněkud mimo toto klasické dělení jízdních odporů na vozidlové a traťové. V oblasti trakčních výpočtů se tak dnes používají dva odlišné přístupy k zohlednění odporu z jízdy vlaku tunelem:

- odpor z jízdy tunelem je považován za odpor traťový a je formou (konstantní) přírážky přičítán k náhradnímu (redukovanému) sklonu;
- odpor z jízdy tunelem je zahrnut v odporu vozidlovém.

Logiku prvně uvedeného přístupu lze spatřovat v tom, že železniční tunel je typickou součástí infrastruktury, a tudíž by odpor vznikající při průjezdu vlaku měl být považován za odpor traťový. Tento (fyzikálně ne zcela korektní) přístup je zakotven i v příslušných českých předpisech. Například dobová odborná literatura [5] z roku 1966 k tomu uvádí: „*Odpor v tunelu vzniká silným vířením vzduchu při jízdě vlaku tunelem. Respektujeme ho podle praxe švýcarských drah zvýšením traťového odporu o 1 kp/Mp (resp. o 1 ‰) u dvoukolejného a o 2 kp/Mp u jednokolejného tunelu (vzhledem k menšímu průřezu tunelu je proudění vzduchu intenzivnější). V tunelu je navíc menší obsah kyslíku potřebného pro spalování paliva u parních a motorových lokomotiv, což může do jisté míry i ovlivnit jejich výkon. Rovněž u značného počtu tunelů se vyskytuje prosakování pramenů spodní vody, která zvyšuje náchylnost trakčních vozidel k prokluzu kol. Je-li tunel (v praxi postačí uvažovat tunely delší než 300 m) v úseku stoupání, je zapotřebí vzhledem k výše uvedenému uvažovat při výpočtech příslušně zvýšený odpor v délce tunelu.*“ Je tak zřejmé, že vliv tunelu na jízdu vlaku je zde hodnocen v širších – byť dobových – souvislostech. Předpis ČSD V 7 [3] z roku 1982 pak odpor z jízdy tunelem zahrnuje do redukovaného traťového profilu následujícím způsobem: „*V tunelech, jejichž délka je větší než 100 m, se ke skutečnému stoupání přidávají ještě +2 ‰, která se započtou obdobně jako odpor z oblouku.*“

Přestože může výše uvedený přístup v určitých případech poskytovat dobré výsledky, ve své podstatě není správný. Jak ostatně naznačuje i zdůvodnění vzniku odporu z jízdy tunelem, uvedené v [5], pravou příčinu je nutné hledat v oblasti aerodynamiky.

Podle Newtonova zákona odporu ve zobecněném tvaru je možné velikost odporové síly při pohybu tělesa v látkovém prostředí, v našem případě tedy ve vzduchu, stanovit s využitím známého vztahu jako:

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_{vzd} \cdot v_{rel}^2, \quad (7)$$

kde význam jednotlivých veličin je následující:

- C_x [-] je tvarový součinitel odporu vzduchu;
- S [m²] je čelní plocha tělesa, resp. vozidla/vlaku;
- ρ_{vzd} [kg·m⁻³] je hustota (měrná hmotnost) vzduchu;
- v_{rel} [m·s⁻¹] je velikost relativní rychlosti tělesa vůči vzduchu.

Klíčem k vyšetřování aerodynamického odporu při jízdě vlaku tunelem je právě tvarový součinitel odporu vzduchu C_x . Při jízdě vlaku tunelem dochází – v porovnání s jízdou otevřenou krajinou – vlivem stísněného prostoru k nárůstu jeho hodnoty, což lze pro potřeby trakčních výpočtů postihnout vztahem:

$$C_{x,tun} = \tau \cdot C_x, \quad (8)$$

kde τ [-] je tzv. **tunelový faktor**, vyjadřující právě nárůst tvarového součinitele odporu vzduchu v tunelu oproti stavu v otevřené krajině. Do detailu vzato je problematika aerodynamiky vlaku při jízdě tunelem, především při vysokých rychlostech, podstatně komplikovanější a úzce souvisí se vznikem a šířením tlakových vln (viz například [6]). Z nestacionární podstaty těchto dějů pak vyplývá mimo jiné i skutečnost, že tvarový součinitel odporu se reálně při průjezdu vlaku tunelem chová jako v čase proměnná veličina, závislá na mnoha faktorech (tvarová členitost a délka vlaku, tvar a délka tunelu atd.). Avšak pro běžné potřeby zohlednění vlivu tunelu v trakčních výpočtech si lze vystačit se střední hodnotou tunelového faktoru, zavedeného ve vztahu (8), což lze následně promítnout do Davisova vztahu (3), který je pak možné zapsat ve tvaru:

$$O_v = A + B \cdot V + \tau \cdot C \cdot V^2. \quad (9)$$

V tomto případě je tak odporu z jízdy tunelem začleněn do charakteristiky vozidlového odporu vlaku a otázka věrohodného zohlednění účinku tunelu na vozidlový odpor se redukuje na vhodnou volbu hodnoty tunelového faktoru τ .

1.3 Ukázka vlivu způsobu zohlednění odporu z jízdy vlaku tunelem na výsledky trakčních výpočtů

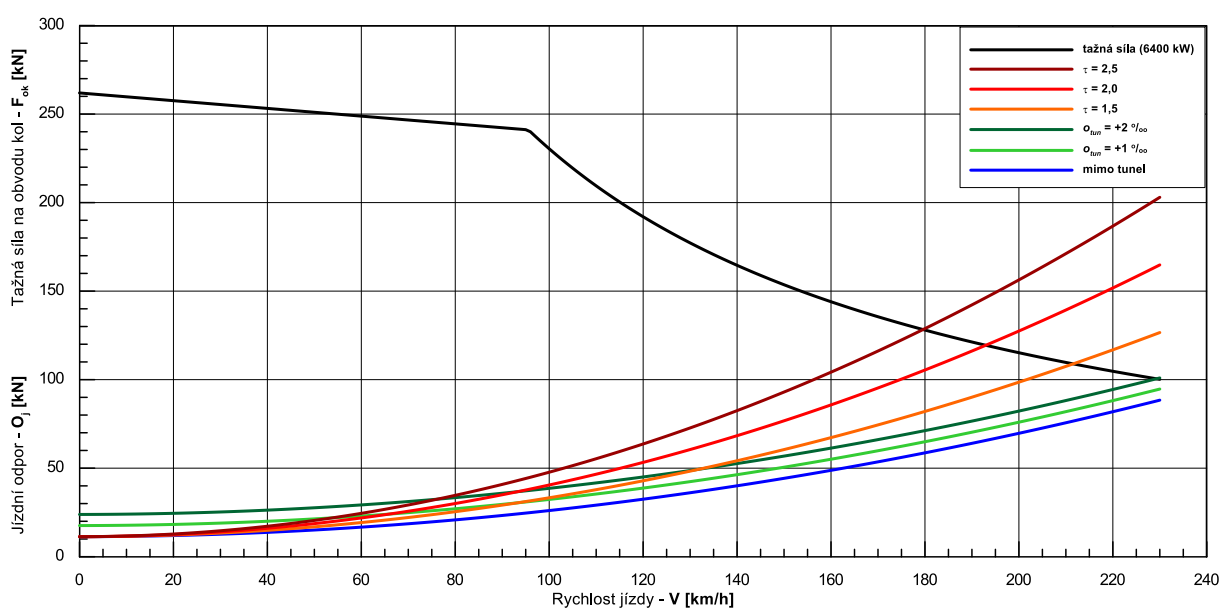
Aby bylo možné demonstrovat vliv způsobu zohlednění odporu z jízdy vlaku tunelem, byl proveden modelový výpočet rozjezdu vlaku na teoretické vodorovné přímé koleji v tunelu. Uvažovaný vlak byl tvořen moderní čtyřnápravovou elektrickou lokomotivou (hmotnost lokomotivy: 89 t, součinitel rotačních hmot: 0,1, trakční výkon: 6 400 kW), jejíž trakční charakteristika je znázorněna na obr. 1 (adhezní omezení je uvažováno v souladu s článkem 4.2.8.1.2., odst. 9 TSI LOC&PAS [7]), a deseti čtyřnápravovými rychlíkovými vozy (hmotnost soupravy vozů: 551 t, součinitel rotačních hmot: 0,04). Celková hmotnost uvažovaného vlaku tedy činí 640 t a pro jednoduchost je vozidlový odpor celého vlaku uvažován jako „typ jízdního odporu R“ pro případ vozů s podvozky GP 200 (kotoučová brzda, CZE) dle aktuálního znění předpisu V 7 [3]. Měrný vozidlový odpor celého vlaku je tak uvažován ve tvaru:

$$o_v = 1,8 + 0,000\ 5 \cdot V + \tau \cdot 0,000\ 23 \cdot V^2. \quad (10)$$

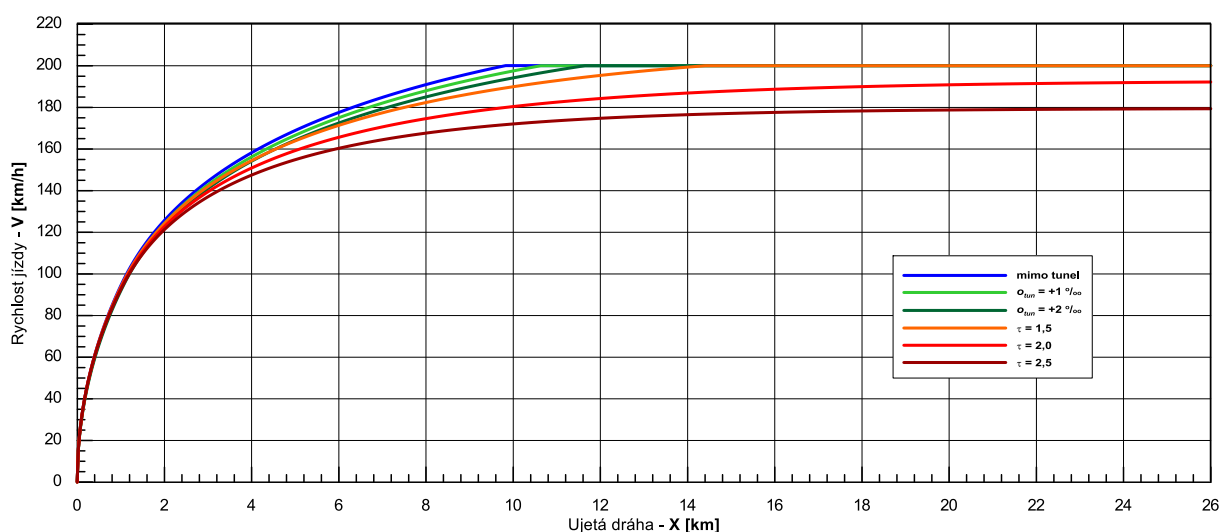
Příslušné výpočty byly provedeny jednak pro jízdu vlaku otevřenou krajinou ($\tau = 1$) a také pro jízdu tunelem, přičemž vliv tunelu byl uvažován:

- buď v podobě konstantní přírážky k měrnému jízdnímu odporu o hodnotě 1 ‰, resp. 2 ‰,
- nebo v podobě různých hodnot tunelového faktoru τ (byly uvažovány hodnoty 1,5, 2,0 a 2,5).

Charakteristiky celkového jízdního odporu takto uvažovaného vlaku jsou pro jednotlivé případy rovněž uvedeny v grafu na obr. 1. Z tohoto grafu je evidentní, že různé přístupy k zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor začínají poskytovat výrazněji rozdílné výsledky zhruba od rychlosti 100 km/h; v rychlostním pásmu kolem 200 km/h jsou pak příslušné rozdíly zcela zásadní. Zatímco v případě, kdy je účinek tunelu uvažován jako fixní přírážka k náhradnímu sklonu o hodnotě +2 ‰, představuje takto vzniklý odpor při rychlosti 200 km/h nárůst vozidlového odporu uvažovaného vlaku o necelých 20 %, tunelový faktor o hodnotě 2 pak za daných podmínek představuje zvětšení vozidlového odporu vlivem tunelu o více než 80 %.



Obr. 1 Trakční charakteristika lokomotivy uvažovaného vlaku a charakteristiky jízdního odporu tohoto vlaku ve vodorovné koleji při různých způsobech zohlednění odporu z jízdy tunelem.



Obr. 2 Dráhové tachogramy při rozjezdu uvažovaného vlaku na rychlost 200 km/h ve vodorovné koleji v tunelu při různých způsobech zohlednění odporu z jízdy tunelem.

Dopad této skutečnosti na jízdu vlaku je ukázán na obr. 2, kde jsou vykresleny dráhové tachogramy pro rozjezd uvažovaného vlaku na rovině v různých podmínkách, resp. pro různé způsoby zohlednění odporu z jízdy vlaku tunelem. Za pozornost jistě stojí skutečnost, že zatímco pro jízdu uvažovaného vlaku ve vodorovné koleji v otevřené krajině rychlostí 200 km/h postačuje trakční výkon cca 3 900 kW, tak při uvažování tunelového faktoru o hodnotě 2 ani využití plného trakčního výkonu 6 400 kW nestačí k dosažení této rychlosti. Při uvažování tunelového faktoru 2,5 pak uvažovaný trakční výkon postačuje za daných podmínek k dosažení ustálené rychlosti „jen“ 180 km/h. A různé způsoby zohlednění vlivu tunelu se v modelovém příkladu projeví i na dynamice rozjezdu. Zatímco v otevřené krajině je při plném využití trakční charakteristiky dle obr. 1 dosaženo rychlosti 160 km/h na dráze cca 4 km a konstantní přírážka k měrnému jízdnímu odporu +2 ‰ prodlužuje tuto dráhu cca o 400 m, tunelový faktor o hodnotě 2,5 má za následek prodloužení dráhy potřebné pro rozjezd vlaku na rychlost 160 km/h za jinak stejných podmínek až na 6 km.

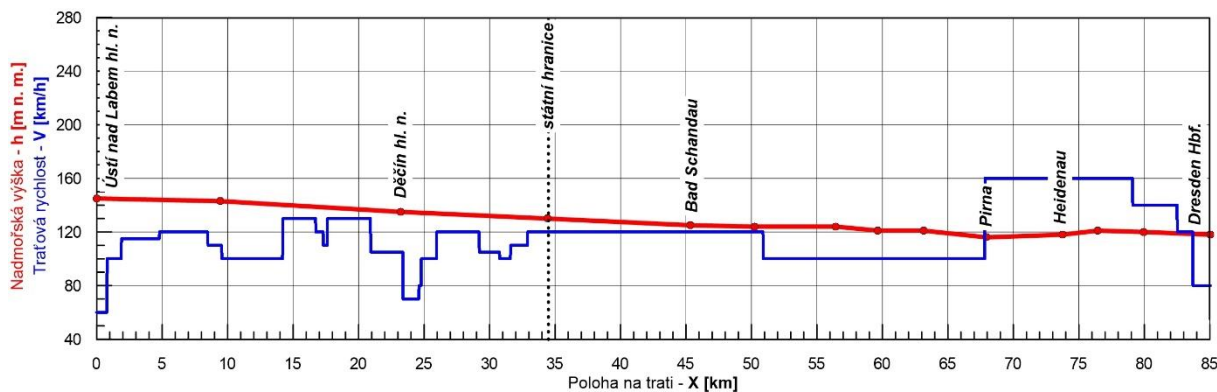
2 Praktický příklad: stará a nová trať Ústí nad Labem–Drážďany

S cílem ukázat důsledky výše uvedených zjištění v širších souvislostech byla vybrána trať, na které je ve střednědobém časovém horizontu plánována přeložka obsahující dlouhý tunel. Jedná se o plánované nové spojení Ústí nad Labem a Drážďan s využitím nového – cca 26 km dlouhého – tunelu pod Krušnými horami, jež je součástí tzv. RS4 (podrobnější informace k celému projektu lze najít například na stránkách [8, 9]). Nová trať má jednak umožnit výrazné zkrácení jízdní doby (jak vlivem zkrácení délky trati oproti jejímu původnímu trasování přes Děčín a Bad Schandau, tak i zvýšením traťové rychlosti), jednak zvýšit kapacitu železničního spojení ČR a Německa a v neposlední řadě také odvést nákladní dopravu z údolí Labe, a eliminovat tak hluk v této lokalitě. V rámci práce [1] proto byly provedeny výpočty jízdních dob a spotřeby trakční energie pro vybrané vlaky osobní a nákladní dopravy, a to jak na původní trati údolím Labe, tak na plánované trati, vedené Krušnohorským úpatním tunelem. Výsledky trakčních výpočtů, které jsou prezentovány dále v kap. 3, poukazují jak na přínosy, tak ale i na některé problematické aspekty převedení mezinárodní železniční dopravy mezi ČR a Saskem z Labského údolí do podzemí.

2.1 Popis stávající trati

Stávající trať z Ústí nad Labem do Drážďan je v provozu zhruba od poloviny 19. století a prakticky kopíruje levý břeh řeky Labe. Jedná se dvoukolejnou trať, která je od roku 1987 elektrifikována – na české straně stejnosměrným napájecím systémem 3 kV, na německé straně střídavou soustavou 15 kV 16,7 Hz. Celý úsek z Ústí nad Labem hl. n. do stanice Dresden Hbf. měří přibližně 85 km, z toho se 34,4 km nachází na území ČR.

S trasováním trati velmi úzce souvisí její výškový, ale i rychlostní profil (viz obr. 3), kdy trať ve směru do Německa klesá, převážně s absolutní hodnotou podélného sklonu do 1 ‰, což zde vytváří ideální sklonové poměry pro provoz nákladní dopravy. Rychlostní profil rovněž odpovídá poloměřům oblouků, jimiž trať kopíruje v přeshraničním úseku tok řeky Labe. Traťová rychlost se tak většinou pohybuje v rozmezí 100 až 120 km/h, pouze v úseku mezi Pirnou a Drážďany dosahuje traťová rychlost hodnoty 160 km/h. Při pohledu na rychlostní profil trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan, vyznačený na obr. 3, stojí za povšimnutí rozdílný přístup k návrhu rychlostního profilu na české a na německé straně. Zatímco německý úsek se vyznačuje poměrně dlouhými úseky s konstantní traťovou rychlostí, na české straně je rychlostní profil naopak velmi členitý a ke změnám traťové rychlosti zde dochází velmi často.



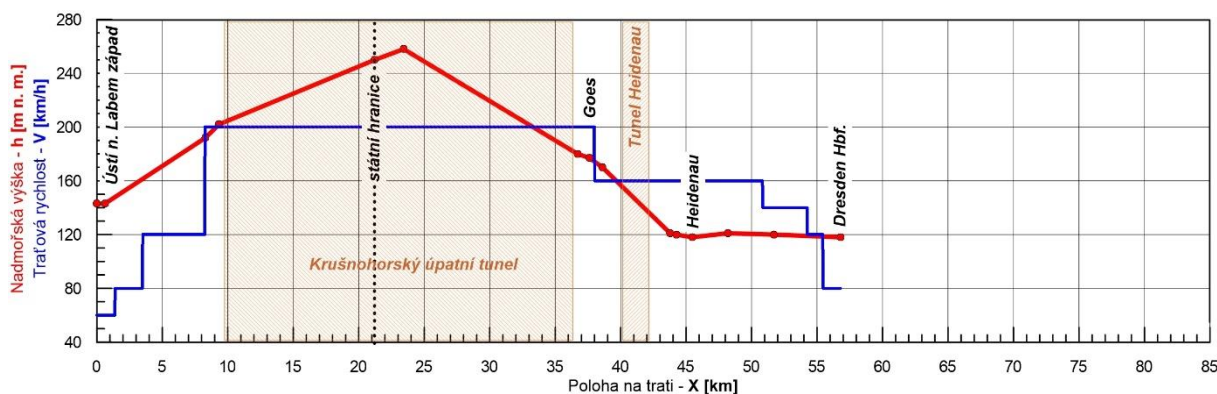
Obr. 3 Výškový a rychlostní profil stávající trati Ústí nad Labem–Drážďany.

2.2 Nová trať

Pro porovnání se stávajícím stavem byla v rámci řešení práce [1] vyšetřována jízda vybraných vlaků mezi stanicemi Ústí nad Labem západ a Dresden Hbf. Dominantou této trati je právě Krušnohorský tunel, jehož různé varianty jsou znázorněny na obr. 4. Pro příslušné trakční výpočty byla zvolena varianta G (na obr. 4 zcela nahoře červenou barvou), která sestává ze samotného – cca 26,5 km dlouhého – úpatního tunelu mezi českým portálem u obce Chlumeck (Stradov) a německým portálem u výhybny Goes a dále přibližně 2 km dlouhého tunelu mezi výhybnou Goes a napojením na stávající trať z Pirny do Drážďan u obce Heidenau. Pro potřeby porovnávacích trakčních výpočtů bylo na české straně až k odbočce na novostavbu trati u obce Chabařovice uvažováno využití stávající trati (případně souběžně vedené nové trati) ze stanice Ústí nad Labem západ do Teplic s předpokládanou traťovou rychlostí 120 km/h. Celý vyšetřovaný úsek ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf. měří v této variantě přibližně 57 km, z toho se 21,2 km nachází na českém území. Nová trať mezi Ústím nad Labem a Drážďany je tak asi o 28 km – tedy prakticky o celou třetinu – kratší.



Obr. 4 Varianty trasování novostavby trati Ústí nad Labem–Drážďany v úseku Chlumeck–Heidenau; zdroj: [10].



Obr. 5 Uvažovaný výškový a rychlostní profil trati Ústí nad Labem–Drážďany v nové trase.

Uvažovaný rychlostní profil nové trati je znázorněn modře na obr. 5. Jak již bylo řečeno, tak za výjezdem ze stanice Ústí nad Labem západ je zde až po nájezd na novostavbu uvažována traťová rychlost 120 km/h. Následuje úsek s traťovou rychlostí 200 km/h, který pokrývá celý Krušnohorský tunel a od výhybny Goes navazuje úsek s traťovou rychlostí 160 km/h, na níž je navrženo i napojení novostavby na stávající trať u obce Heidenau. V provedených výpočtech byla uvažována jednotná napájecí soustava na celém vyšetřovaném úseku. Vlivu možného umístění změny napájecího systému však bude dále rovněž věnována pozornost.

Červenou čarou je pak na obr. 5 vyznačen výškový profil nové trasy. Je na první pohled zřejmé, že v porovnání se sklonovými poměry staré trati je nová trasa podstatně méně příznivá, neboť dosahuje (ve variantě G) ve vrcholovém bodě tunelu nadmořské výšky téměř 260 m n. m. To je způsobeno faktem, že trať v tunelu musí být vedena v určitém minimálním podélném sklonu z důvodu, aby bylo zajištěno odvodnění tunelu. Tento minimální sklon zde představuje 4 ‰ na české straně tunelu, čemuž pak na německé straně odpovídá sklon téměř 6 ‰. Výhybna Goes se z důvodu snazšího rozjezdu zde zastavivších nákladních vlaků nachází ve sklonu jen 2,5 ‰. A mezi výhybnou Goes a odbočkou Heidenau pak převažuje sklon téměř 10 ‰.

2.3 Uvažované vlakové soupravy

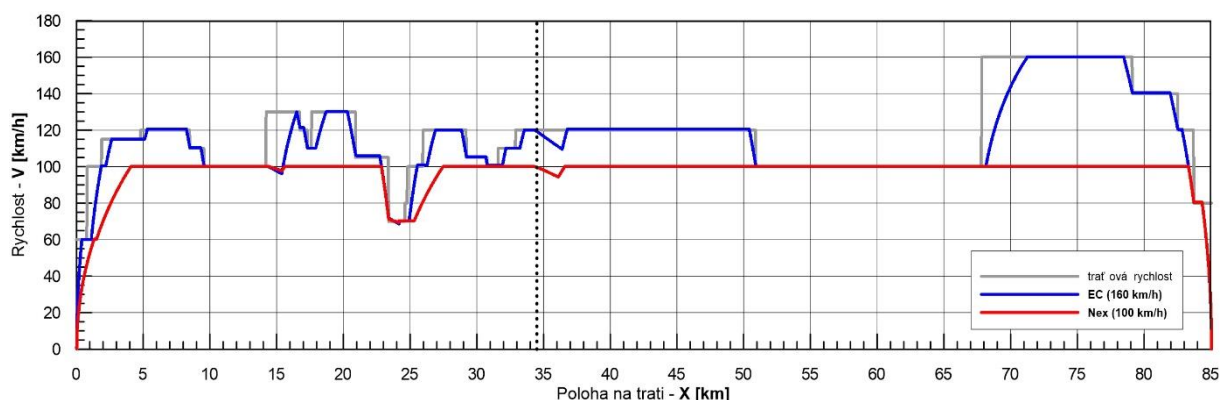
V rámci práce [1] byl vyšetřován pohyb dvou vlakových souprav. V prvním případě šlo o soupravu vlaku dálkové osobní dopravy, tvořenou lokomotivou a deseti rychlíkovými vozy typu UIC-Z. Druhý případ potom reprezentuje vlak kombinované dopravy, tvořený lokomotivou a 25 kontejnerovými vozy typů Sggrss a Sggns. Uvažovaná lokomotiva, jejíž trakční charakteristika je znázorněna na obr. 1, přibližně odpovídá typu Siemens Vectron, přičemž je zde pro potřeby realizace trakčních výpočtů aplikováno adhezní omezení tažné síly dle TSI LOC&PAS [7], tzn. maximální součinitel adheze $\mu_0 = 0,3$ při nulové rychlosti. V obou případech tedy byly předlohou typické soupravy vlaků (EC, Nex), které jsou na dané relaci v současnosti době provozované. Základní parametry uvažovaných souprav jsou uvedeny v tab. 1. Za zmínku stojí uvažovaná („výpočtová“) délka vlaku, která zde vychází z předpokladu uvažované délky každého vozidla 26 m, odpovídající délce integračního kroku pohybové rovnice vlaku (2), která byla zvolena tak, aby umožňovala jednoduše zohlednit délku vlaku a rozložení jeho hmotnosti.

Tab. 1 Základní parametry vyšetřovaných vlakových souprav.

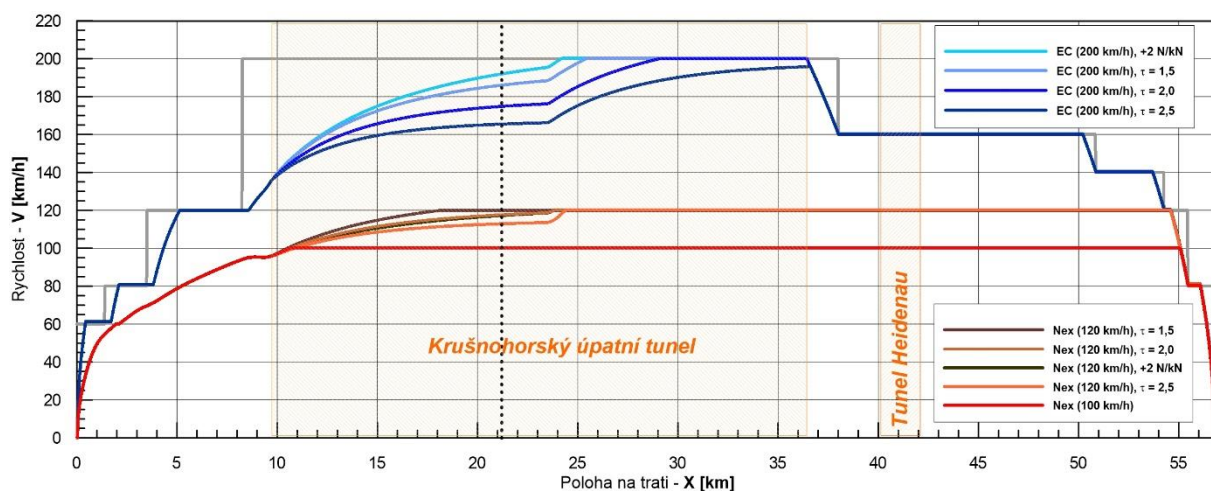
Souprava vlaku	Dálkový osobní vlak (EC)	Kontejnerový vlak (Nex)
Hmotnost soupravy vozů	551 t	1 911 t
Součinitel rotačních hmot vozů	0,04	0,03
Hmotnost lokomotivy	89 t	
Součinitel rot. hmot lokomotivy	0,1	
Trakční / brzdňý výkon lokomotivy	6 400 kW	
Maximální tažná síla lokomotivy	260 kN	
Maximální brzdňá síla EDB	150 kN	
Hmotnost vlaku vč. lokomotivy	640 t	2 000 t
Vzorec měřného jízdního odporu	$1,8 + 0,0005 \cdot V + 0,00023 \cdot V^2$	$1,3 + 0,00015 \cdot V^2$
Maximální rychlost	200 km/h	100 (120) km/h
Výpočtová délka vlaku	286 m	676 m
Počet náprav (včetně lokomotivy)	40 (44)	126 (130)
Prům. nápravové zatížení (vč. lok.)	13,8 t (14,5 t)	15,2 t (15,4 t)
Měřný výkon	10 kW/t	3,2 kW/t

3 Výsledky provedených trakčních výpočtů

Při modelování jízdy vyšetřovaných vlaků ve vyšetřovaných traťových úsecích v rámci řešení práce [1] bylo postupováno numerickou integrací pohybové rovnice vlaku (2), přičemž byl – jak již bylo zmíněno – zvolen integrační krok délky 26 m, který umožňuje snadné zohlednění délky vlaku, a to při zachování dostatečné přesnosti řešení. Tímto způsobem byly vypočteny dráhové tachogramy a následně i jízdní doby a ukazatele spotřeby trakční energie. Všechny výpočty byly provedeny za podmínky maximálního využití trakční charakteristiky lokomotivy (viz obr. 1) a maximálního využití rychlostního profilu (samozřejmě s ohledem na omezenou maximální rychlost vlaku). Oproti reálné situaci tak například nebyla modelována jízda výběhem před místem omezení traťové rychlosti. I z tohoto důvodu tak byla při výpočtech uvažována poměrně konzervativní hodnota brzdného zpomalení, a to $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obr. 6 Drahové tachogramy pro případ vyšetřovaného vlaku dálkové osobní dopravy a kontejnerového nákladního vlaku při jízdě po staré trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan.



Obr. 7 Drahové tachogramy pro případ vyšetřovaného vlaku dálkové osobní dopravy ($V_{\max} = 200 \text{ km/h}$) a kontejnerového nákladního vlaku ($V_{\max} = 100/120 \text{ km/h}$) při jízdě po nové trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan – výsledky trakčních výpočtů pro různé způsoby zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor.

Vypočtené tachogramy pro jízdu vlaků z Ústí nad Labem do Drážďan po staré trati jsou uvedeny na obr. 6, kde je modře znázorněn průběh rychlosti uvažovaného vlaku osobní dopravy a červeně průběh rychlosti kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 100 km/h. Uvažovaný traťový úsek obsahuje místo změny napájecí soustavy (3 kV DC – 15 kV 16,7 Hz) na státní hranici, které je v tachogramu zřetelné v důsledku mírného poklesu rychlosti. Tento pokles je zapříčiněn dobou, po kterou hnací vozidlo nemůže po stažení sběrače a změně systému vyvíjet tažnou sílu; zde je uvažována doba 60 s.

Dráhové tachogramy pro případ jízdy vyšetřovaných vlaků po novostavbě trati z Ústí nad Labem do Drážďan, vedené Krušnohorským úpatním tunelem (ve variantě G), jsou uvedeny na obr. 7. V případě trakčních výpočtů jízdy uvažovaného vlaku osobní dopravy (znázorněno v odstínech modré barvy) a kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 120 km/h (v odstínech hnědé barvy) jsou prezentovány výsledky pro různé způsoby zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor. Jen v případě kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 100 km/h je na obr. 7 (červenou čarou) vykreslen pouze tachogram odpovídající tunelovému faktoru o hodnotě $\tau = 2$, zohledněnému ve vzorci (měrného) vozidlového odporu; ostatní uvažované způsoby zohlednění vlivu tunelu (tunelový faktor o hodnotě 1,5, resp. 2,5, stejně jako použití konstantní přírážky +2 ‰ k náhradnímu sklonu) totiž v daném případě vedou k velmi podobným výsledkům.

Prezentované výsledky potvrzují, že způsob modelování vlivu tunelu hraje významnou roli zejména při vysokých rychlostech. Tvar vypočteného tachogramu vlaku kategorie EC je tak zvoleným přístupem ovlivněn zcela zásadně. Zatímco při uvažování přírážky +2 ‰ k náhradnímu sklonu (dle předpisu V 7 [3]) vlak dosáhne rychlosti 200 km/h v km 24,2, tedy přibližně 800 m za vrcholem tunelu, při zohlednění vlivu tunelu tunelovým faktorem o hodnotě 2,0 je rychlost 200 km/h dosažena až v km 29,1, cca o 5 km dále. Při uvažování tunelového faktoru o hodnotě 2,5 pak k rozjezdu vyšetřovaného vlaku na rychlost 200 km/h v tunelu nedojde vůbec, a to i přesto, že je plně využíván trakční výkon 6,4 MW a kolej se od vrcholu tunelu v km 23,4 nachází v klesání 6 ‰ (v tomto případě tak vlak opouští tunel v km 36,3 rychlostí 196 km/h a následně začíná brzdit).

Dráhové tachogramy stanovené pro kontejnerový vlak s maximální rychlostí 120 km/h pak ukazují, že v daném případě vede tunelový faktor o hodnotě 2,0 k téměř stejným výsledkům jako „klasický přístup“ dle předpisu V 7 [3] (tj. uvažování konstantní přírážky k náhradnímu sklonu o hodnotě +2 ‰). Oproti tomu zde tunelový faktor o hodnotě 1,5 vede k rozjezdu vyšetřovaného vlaku na rychlost 120 km/h již ve stoupání (konkrétně v km 18,1) a tunelový faktor o hodnotě 2,5 naopak omezuje rychlost vlaku, která je ve stoupání dosažitelná.

3.1 Výpočty jízdních dob

S výpočtem tachogramů úzce souvisí stanovení teoretických jízdních dob. Vypočtené jízdní doby vyšetřovaných vlaků jsou zde uvedeny (bez započítání jakýchkoliv přírážek k jízdním dobám a po zaokrouhlení nahoru na celé půlminuty) v tab. 2. Přínos tunelové přeložky původní trati, související s výrazným zkrácením a se zrychlením, je z hlediska jízdních dob naprosto zásadní. I přesto, že je v provedených výpočtech uvažováno využití stávající trati mezi Ústím nad Labem a nájezdem na novostavbu u Chabařovic (s maximální rychlostí 120 km/h), trvá jízda vlaku EC po nové trati téměř o polovinu kratší dobu než jízda po původní trati trasované labským údolím. Kontejnerový vlak s maximální rychlostí 100 km/h pak potřebuje pro jízdu z Ústí nad Labem do Drážďan (nebo obráceně) přibližně o třetinu kratší čas a využití maximální rychlosti 120 km/h může případně přinést zkrácení jízdní doby přibližně o další 4 minuty.

Tab. 2 Vypočtené teoretické jízdní doby vyšetřovaných vlaků po zaokrouhlení na celé půlminuty.

Směr jízdy	Trať	EC	Nex (100 km/h)	Nex (120 km/h)
Ústí nad Labem → Drážďany	stará trať	47,0 min.	55,0 min.	---
	nová trať (var. G)	24,5–25,0 min.	38,5 min.	34,0–34,5 min.
Drážďany → Ústí nad Labem	stará trať	47,5 min.	56,0 min.	---
	nová trať (var. G)	24,5–25,5 min.	38,0 min.	34,0–34,5 min.

Z hlediska vlivu způsobu zohlednění tunelu v trakčních výpočtech na vypočtené jízdní doby je možné konstatovat, že zatímco v případě jízdy nákladního vlaku s maximální rychlostí 100 km/h jsou rozdíly provedených variant výpočtu v řádu jednotek sekund, a tedy zanedbatelné, v případě uvažovaného vlaku kategorie EC se rozdíly v jízdních dobách pohybují zhruba do jedné minuty. To ostatně vyplývá i z výrazně rozdílného průběhu rychlosti jednotlivých výpočetních variant na obr. 7. V případě kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 120 km/h se pak rozdíly ve výsledcích pohybují přibližně v rozmezí jedné půlminuty.

3.2 Výpočty spotřeby energie

Kromě zkrácení jízdních dob byl sledován i vliv nové trati a způsobu zohlednění vlivu tunelu na spotřebu trakční energie. Pro každou variantu výpočtu byla vyčíslena trakční práce, vykonaná tažnou silou na obvodu kol, a práce brzdné síly elektrodynamické rekuperační brzdy. Zatímco výpočet trakční práce pracuje s trakční charakteristikou (viz obr. 1), při výpočtu práce brzdné síly byla využita teoretická brzdná charakteristika, která je limitována maximálním výkonem EDB 6,4 MW (na obvodu kol) a uvažovanou maximální brzdou silou EDB 150 kN (viz též tab. 1). Pro potřeby stanovení spotřeby trakční energie pak byly uvažovány následující hodnoty účinnosti vzájemné přeměny elektrické a mechanické energie:

- účinnost lokomotivy (resp. přeměny elektrické energie na trakční práci): 85 %;
- účinnost rekuperace (resp. přeměny práce brzdné síly na elektrickou energii): 70 %.

Sledovanými veličinami přitom byla jak spotřeba trakční energie, tak množství energie rekuperované, ale také rozdíl těchto hodnot, který je možné obecně vyjádřit jako:

$$E_v = E_{tr} - E_{rek} = \frac{1}{\eta_{lok}} \cdot \int_{(x)} F_{ok} \cdot dx - \eta_{rek} \cdot \int_{(x)} B_{ERB} \cdot dx, \quad (11)$$

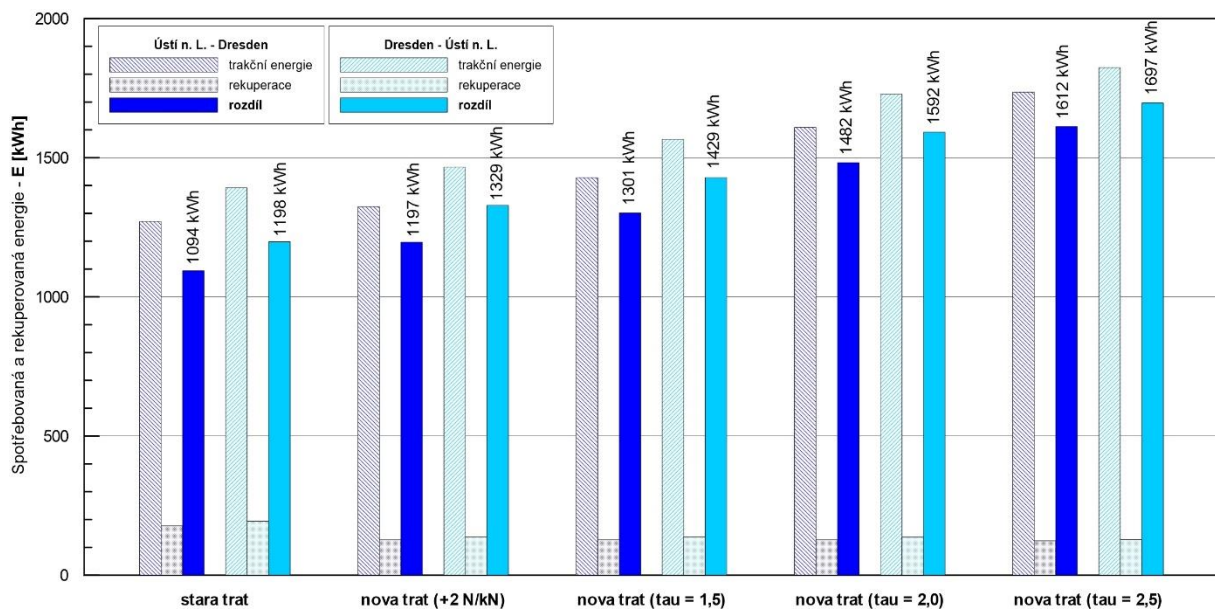
kde význam jednotlivých veličin je následující:

- E_v [J] je výsledná spotřeba trakční energie (tedy rozdíl energie spotřebované a rekuperované);
- E_{tr} [J] je spotřebovaná trakční elektrická energie (bez vlivu rekuperace);
- E_{rek} [J] je rekuperovaná elektrická energie;
- η_{lok} [-] je účinnost lokomotivy;
- η_{rek} [-] je účinnost rekuperace;
- F_{ok} [N] je tažná síla lokomotivy na obvodu kol;
- B_{ERB} [N] je brzdná síla elektrodynamické rekuperační brzdy na obvodu kol;
- x [m] je ujetá dráha.

Na obr. 8 jsou uvedeny výsledky výpočtů spotřeby energie pro případ vlaku kategorie EC. Pro jednotlivé výpočtové varianty jsou zde vždy znázorněny dvě trojice sloupců, pro každý směr jízdy jedna. V rámci této trojice sloupců vždy první sloupec (šrafovaný) reprezentuje spotřebu energie (bez vlivu rekuperace), druhý sloupec (tečkovaný) pak energii rekuperovanou a třetí sloupec (plný, s popiskem) výslednou spotřebu energie (tedy rozdíl energie spotřebované a rekuperované). Jednotlivé výpočtové varianty jsou reprezentovány jednak starou tratí a jednak novou tratí, pro níž jsou napočítány čtyři různé sady výsledků, lišící se právě způsobem zohlednění vlivu tunelu. Na základě prezentovaných výsledků trakčních výpočtů je možné konstatovat následující závěry:

- spotřeba energie vlaku EC (bez započtení i se započtením vlivu rekuperace) je vždy vyšší ve směru do ČR, a to přibližně o 5 až 10 %, což do určité míry souvisí i s rozdílem nadmořských výšek počátku a konce vyšetřovaného úseku;

- potenciál úspor energie rekuperací představuje za daných podmínek na staré trati zhruba 15 % spotřeby; na trati nové pak přibližně 7 až 10 %, přičemž vyšší tunelový faktor vede k nižším relativním úsporám, neboť roste celková spotřeba (absolutní rekuperovaná energie se přitom v závislosti na způsobu zohlednění vlivu tunelu téměř nemění a pohybuje se většinou cca do 130 kWh ve směru do Německa, resp. do 140 kWh ve směru opačném);
- všechny sledované výpočtové varianty jízdy vlaku po nové trati vykazují vyšší spotřebu energie, a to i přes zkrácení délky trati o třetinu oproti staré trati (např. při uvažování tunelového faktoru $\tau = 2$ jde o nárůst spotřeby přibližně o čtvrtinu, není-li započítán vliv rekuperace, resp. o třetinu v případě, že se hodnotí rozdíl spotřebované a rekuperované energie). Jedná se o důsledek méně příznivého výškového profilu nové trati v kombinaci s negativním ovlivněním aerodynamiky vlaku tunelem v podmínkách jízdy vyššími rychlostmi;
- je-li účinek tunelu modelován s využitím tunelového faktoru (viz též vztah (9)), vede pochopitelně vyšší hodnota tunelového faktoru k vyšší spotřebě energie; přístup dle předpisu V 7 [3], kdy je tunel v trakčním výpočtu zohledněn přírůzkou +2 ‰ k náhradnímu sklonu, vede v daném případě k (výrazně) nižším hodnotám spotřeby energie (v porovnání s variantami výpočtu pro všechny zde uvažované hodnoty tunelového faktoru).

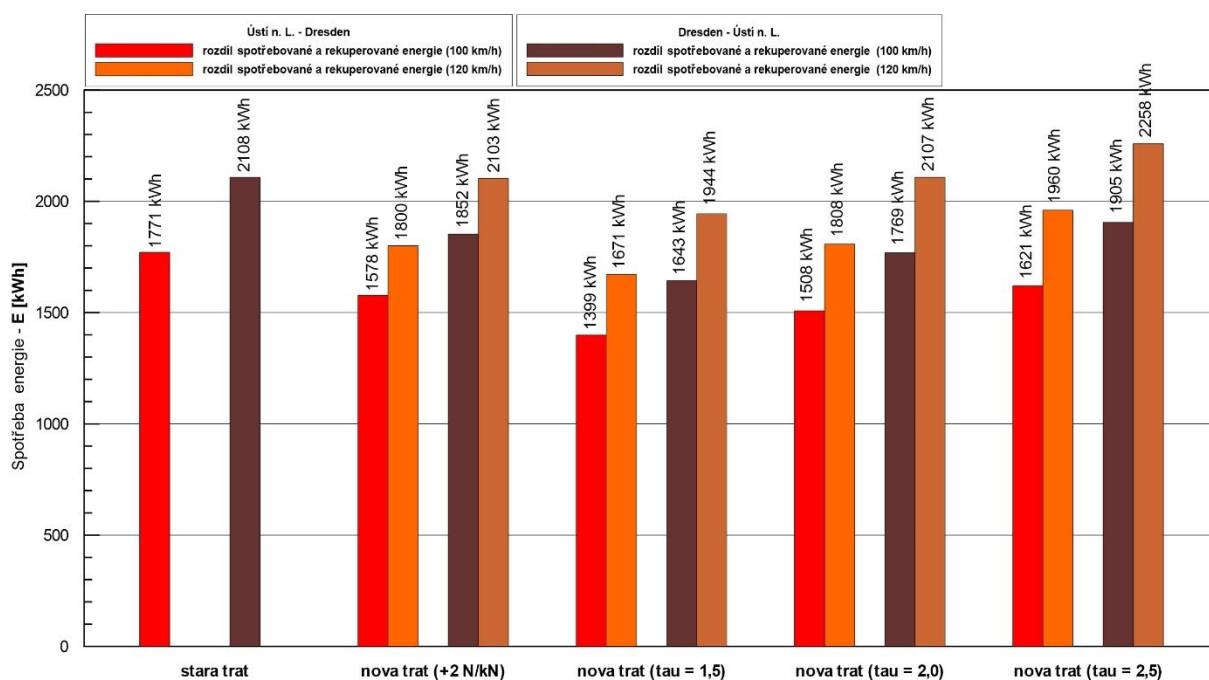


Obr. 8 Spotřebovaná a rekuperovaná energie a rozdíl těchto energií pro případ vyšetřovaného vlaku dálkové osobní dopravy při jízdě po staré trati ($V_{\max} = 160$ km/h) a po nové trati ($V_{\max} = 200$ km/h) při různých způsobech zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor.

Na obr. 9 jsou pak znázorněny výsledky výpočtů spotřeby energie pro uvažovaný vlak kombinované dopravy. Na nové trati je kromě základní varianty s maximální rychlostí 100 km/h uvažována i varianta s maximální rychlostí 120 km/h. V tomto případě jsou v grafu vykresleny pouze výsledky reprezentující výslednou spotřebu energie, určenou jako rozdíl energie spotřebované a rekuperované, a to pro oba směry jízdy, přičemž jsou na nové trati opět uvažovány varianty lišící se způsobem zohlednění vlivu tunelu. Zde je možné konstatovat následující závěry:

- výsledná spotřeba energie vlaku Nex je ve všech sledovaných případech opět vyšší ve směru z Německa, a to přibližně o 17 % v podmínkách nové trati, resp. o 19 % na trati původní;

- v případě jízdy vlaku s maximální rychlostí 100 km/h vede jízda po nové trati ve všech vyšetřovaných případech k nižší výsledné spotřebě trakční energie; tato úspora se v závislosti na použitém způsobu zohlednění vlivu tunelu pohybuje přibližně v rozmezí 10 až 20 %; v daném případě se tak pozitivně projevuje vliv zkrácení délky trati oproti původní trase, byť je značně degradován výškovým profilem nové trasy a aerodynamickými účinky jízdy vlaku tunelem;
- v případě jízdy vlaku maximální rychlostí 120 km/h dochází v podmínkách nové trati v porovnání s vlakem s maximální rychlostí 100 km/h k nárůstu výsledné spotřeby energie přibližně o 20 % v případě modelování vlivu tunelu tunelovým faktorem (a to téměř nezávisle na hodnotě tunelového faktoru), zatímco přístup dle předpisu V 7 [3] vede k nárůstu vypočtené výsledné spotřeby energie vlivem zvýšení rychlosti jen o cca 14 %;
- v případě modelování jízdy vlaku maximální rychlostí 120 km/h jsou již hodnoty výsledné spotřeby energie na nové trati (velmi) blízké hodnotám dosaženým na staré trati při maximální rychlosti 100 km/h;
- hodnoty výsledné spotřeby energie získané modelováním účinku tunelu jednak tunelovým faktorem o hodnotě $\tau = 2$ a jednak přirážkou k náhradnímu sklonu o hodnotě +2 ‰ jsou zde téměř totožné, a to jak při rychlosti jízdy 100 km/h, tak i při rychlosti 120 km/h.



Obr. 9 Rozdíl spotřebované a rekuperované energie pro případ vyšetřovaného kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 100 km/h a 120 km/h při jízdě po staré trati a po nové trati při různých způsobech zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdni odpor.

Jako poslední je potom sledována výsledná měrná spotřeba energie, tedy rozdíl mezi vypočtenou spotřebovanou a rekuperovanou energií, vztažený na jednotku hmotnosti vlaku a kilometr trati. Příslušné výsledky jsou prezentovány pro jednotlivé směry jízdy na obr. 10; tab. 3 obsahuje hodnoty výsledné měrné spotřeby, zprůměrované pro oba směry jízdy. Zatímco výsledky trakčních výpočtů jízdy vyšetřovaných vlaků po původní trati vedou k hodnotám výsledné měrné spotřeby energie přibližně 21 kWh/1000 hrtkm v případě vlaku kategorie EC, resp. cca 11 kWh/1000 hrtkm v případě kontejnerového vlaku, hodnoty získané modelováním jízdy vlaků po nové trati jsou výrazně vyšší. Jak

již bylo zmíněno, důvodem je kombinace několika faktorů, mezi které patří vedle vlivu tunelu také méně příznivý výškový profil nové trati a v případě vlaku osobní dopravy i výrazně vyšší rychlost. Pokud je např. vliv tunelu na jízdní odpor zohledněn tunelovým faktorem o hodnotě 2,0, je pro jízdu vlaku po nové trati v porovnání s jízdou po původní trati pozorován nárůst průměrné hodnoty výsledné měrné spotřeby energie o 100 % v případě vlaku kategorie EC, resp. přibližně o čtvrtinu v případě kontejnerového vlaku jedoucího maximální rychlostí 100 km/h. Využití rychlosti 120 km/h u tohoto vlaku pak znamená další nárůst měrné spotřeby, a to asi o 20 %.

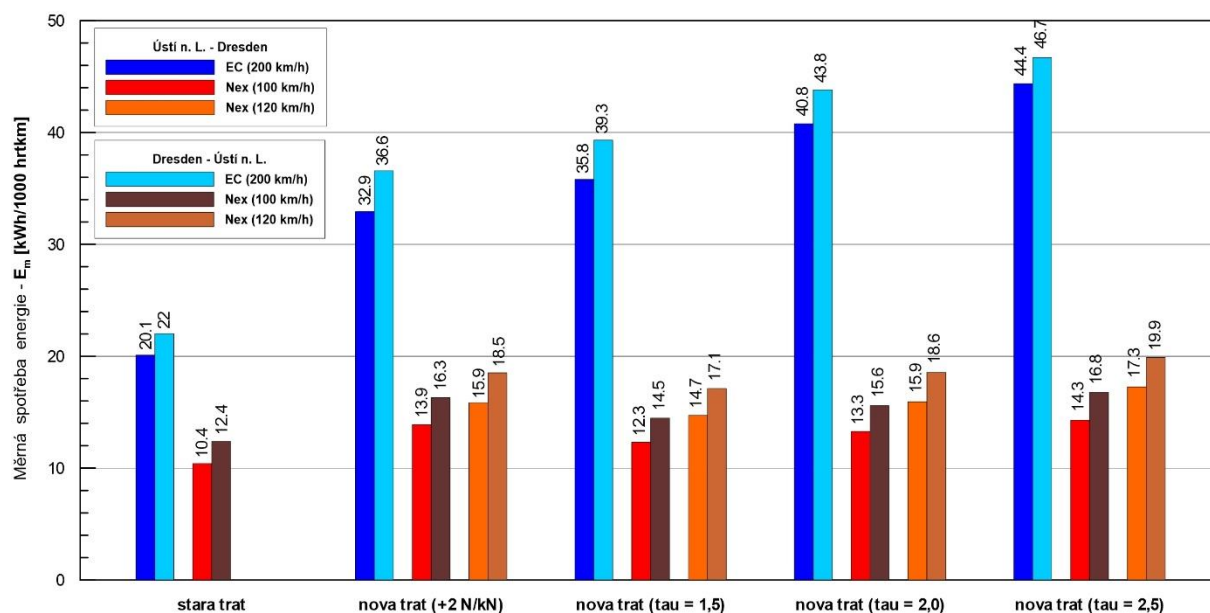
Tab. 3 Vypočtené hodnoty výsledné měrné spotřeby energie, zprůměrované pro oba směry jízdy.

Trat'	Vliv tunelu	EC	Nex (100 km/h)	Nex (120 km/h)
stará trať	---	21,1 Wh/(hrt·km)	11,4 Wh/(hrt·km)	---
nová trať (var. G)	+2 ‰ (V 7)	34,8 Wh/(hrt·km)	15,1 Wh/(hrt·km)	17,2 Wh/(hrt·km)
	$\tau = 1,5$	37,6 Wh/(hrt·km)	13,4 Wh/(hrt·km)	15,9 Wh/(hrt·km)
	$\tau = 2,0$	42,3 Wh/(hrt·km)	14,4 Wh/(hrt·km)	17,2 Wh/(hrt·km)
	$\tau = 2,5$	45,5 Wh/(hrt·km)	15,5 Wh/(hrt·km)	18,6 Wh/(hrt·km)

V kontextu uvedených výsledků stojí za povšimnutí referenční hodnoty měrné spotřeby energie, jež jsou v současné době na síti Správy železnic využívány u hnacích vozidel závislé trakce bez funkčního systému měření spotřeby za účelem rozúčtování trakční elektrické energie v rámci tzv. hybridního modelu. Dle údajů uvedených v příloze č. 1 dokumentu [11] jsou na střídavé napájecí soustavě aktuálně uvažovány následující paušální hodnoty:

- 24,5 kWh/1000 hrtkm pro vlaky kategorií Ex a R;
- 34,5 kWh/1000 hrtkm pro osobní zastávkové vlaky;
- 14,75 kWh/1000 hrtkm pro vlaky nákladní dopravy.

Zatímco v případě modelování jízdy na původní trati, ale i v případě nákladního vlaku jedoucího rychlostí do 100 km/h se výsledky výpočtů vejdu do těchto hodnot, dálkový vlak jedoucí vysokou rychlostí dlouhým tunelem tyto hodnoty velmi výrazně překračuje.



Obr. 10 Výsledná měrná spotřeba energie pro případ vyšetřovaného vlaku dálkové osobní dopravy a vyšetřovaného kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 100 km/h a 120 km/h při jízdě po staré trati a po nové trati při různých způsobech zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor.

3.3 Vliv umístění místa styku trakčních napájecích soustav

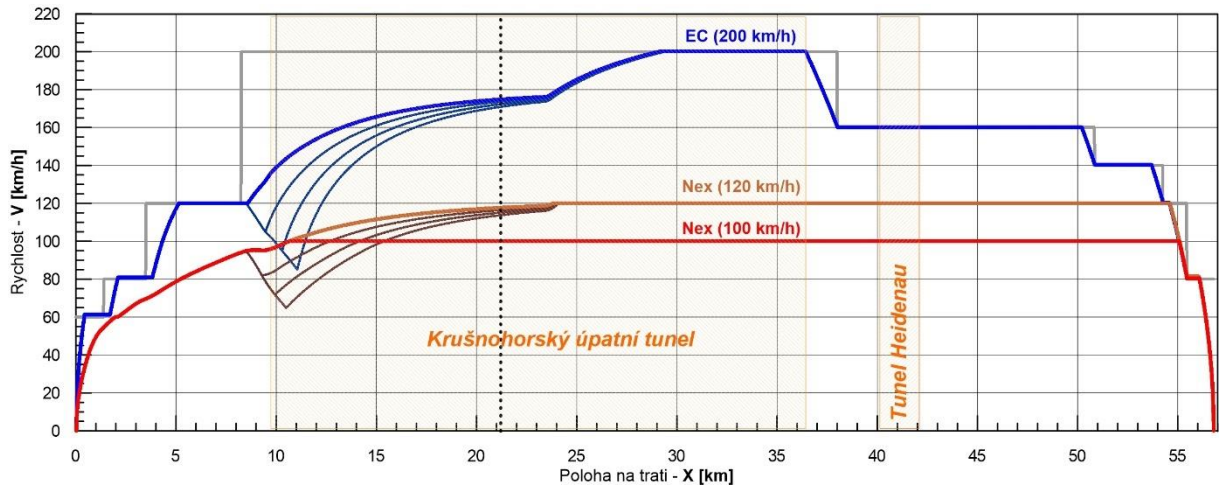
Výsledky práce [1] byly pro potřeby tohoto článku dále rozšířeny o odhad vlivu umístění místa styku trakčních napájecích soustav na tvar tachogramu, ale také především na jízdní dobu. V současné době jsou elektrizované tratě v severní části České republiky napájeny stejnosměrnou soustavou 3 kV. Protože jsou tratě v Německu elektrizovány střídavým systémem 15 kV 16,7 Hz, je při jízdě mezi oběma zeměmi nutné překonat změnu napájecích soustav. Na této skutečnosti v principu nic nezmění ani plánovaná konverze stejnosměrné napájecí soustavy 3 kV v ČR na střídavý systém 25 kV 50 Hz. Styk soustav bude i poté nutné překonat, avšak pro přeshraniční provoz budou nově postačovat pouze střídavá (dvoufrekvenční) vozidla, která jsou technicky jednodušší a také levnější. Nutno poznamenat, že přechod hranic neznamena jen změnu napájecí soustavy, ale též změnu rádiového spojení a zabezpečení (po přechodu na výhradní provoz pod plným dohledem ETCS L2 půjde o tzv. „handover“).

Z hlediska průjezdu vlaku přes styk napájecích soustav je významné, že hnací vozidlo závislé trakce jede po určitou dobu jako nečinné, neboť místo styku (neutrální pole) je nutné překonat výběhem – s vypnutým hlavním vypínačem, resp. staženým sběračem. Průjezd stykovým místem se tedy obecně skládá z těchto fází:

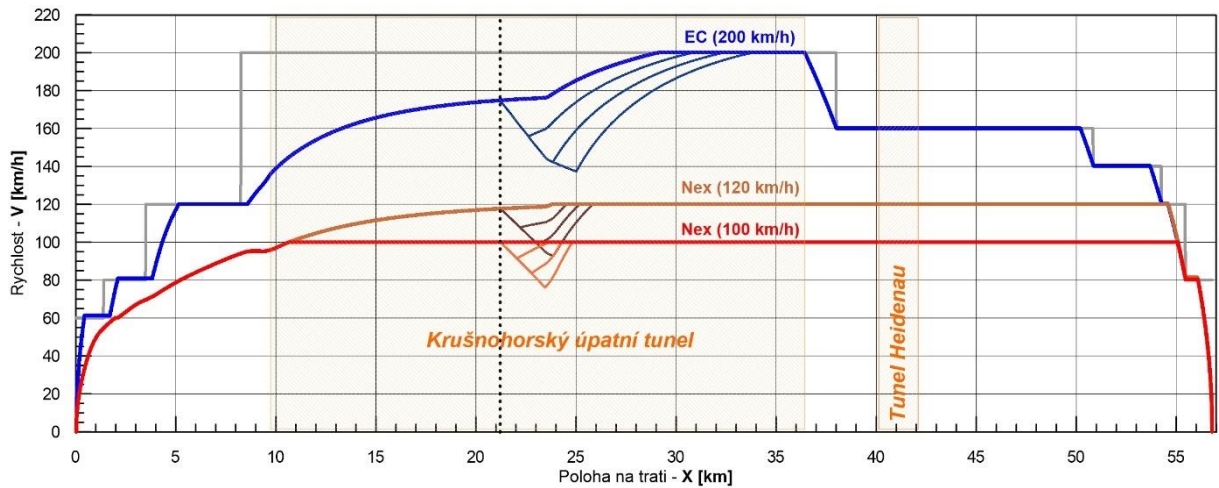
- snížení trakčního výkonu (resp. tažné síly) na nulu;
- vypnutí hlavního vypínače, resp. stažení sběrače;
- průjezd místem styku napájecích soustav výběhem;
- zvednutí sběrače a zapnutí hlavního vypínače;
- obnovení požadované tažné síly, resp. trakčního výkonu.

Především u moderních interoperabilních elektrických lokomotiv však ještě po změně napájecího napětí trvá určitý (nezanedbatelný) čas, než je povolena trakce, tedy než je vozidlo opětovně schopno vyvíjet tažnou sílu. Tento čas se pohybuje v řádu desítek sekund a konkrétní hodnota je závislá na konkrétním technickém řešení příslušného hnacího vozidla. Aby bylo možné posoudit vliv doby, po kterou jede vlak výběhem, na celkový průběh rychlosti a zejména na výslednou jízdní dobu, byly výsledky původních výpočtů (kde byla změna napájecího systému zanedbána) doplněny právě o varianty zohledňující toto specifikum. V rámci těchto výpočtů byly uvažovány jednak tři případy z hlediska doby jízdy výběhem a jednak tři různé varianty umístění styku napájecích soustav. Oproti původní variantě, jež nezohledňuje průjezd místem styku soustav, tak byly dopočítány případy, kdy byla uvažována doba přerušení tažné síly 30, 60 a 90 s. Pro jednoduchost je zde uvažováno skokové snížení tažné síly na nulu a stejně tak i opětovné skokové obnovení tažné síly. Tato doba přitom zahrnuje jak samotný průjezd místem styku soustav (neutrální pole), tak i následnou dobu do obnovení tažné síly. Co se týče uvažovaného umístění styku soustav, byly uvažovány následující případy:

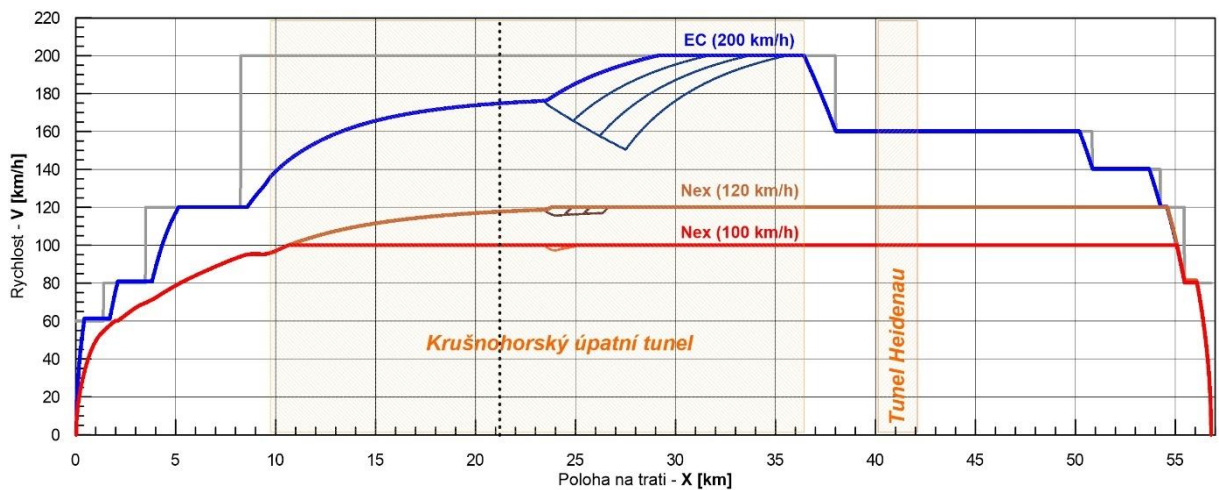
- varianta A – styk trakčních napájecích soustav v km 8,5, tedy v místě, kde se novostavba u Chabařovic odklání od stávající trati z Ústí nad Labem směrem na Teplice. Nevýhodou tohoto umístění styku soustav je skutečnost, že se zde trať ve směru do Německa nachází ve stoupání (cca 10 ‰) a navíc zde dochází k rozjezdu vlaků, zastavujících v Ústí nad Labem. Výhodou je naopak fakt, že se v tomto případě místo styku napájecích soustav nenachází v tunelu, což by představovalo zvýšené bezpečnostní riziko;
- varianta B – styk trakčních napájecích soustav v tunelu v km 21,2, tedy na státní hranici. Trať ve směru do Německa se v tomto místě nachází ve stoupání 4 ‰;
- varianta C – styk trakčních napájecích soustav ve vrcholovém bodě tunelu v km 23,4. Od tohoto místa trať ve směru do Německa klesá se sklonem cca 6 ‰.



Obr. 11 Dráhové tachogramy pro případ jízdy vyšetřovaných vlaků po nové trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan – vliv doby přerušení tažné síly po změně napájecího systému ($t_{akt} \in \{30; 60; 90\}$ s) při umístění styku soustav v km 8,5 (var. A) za podmínky, že lze vliv tunelu na jízdní odpor popsat tunelovým faktorem $\tau = 2$.



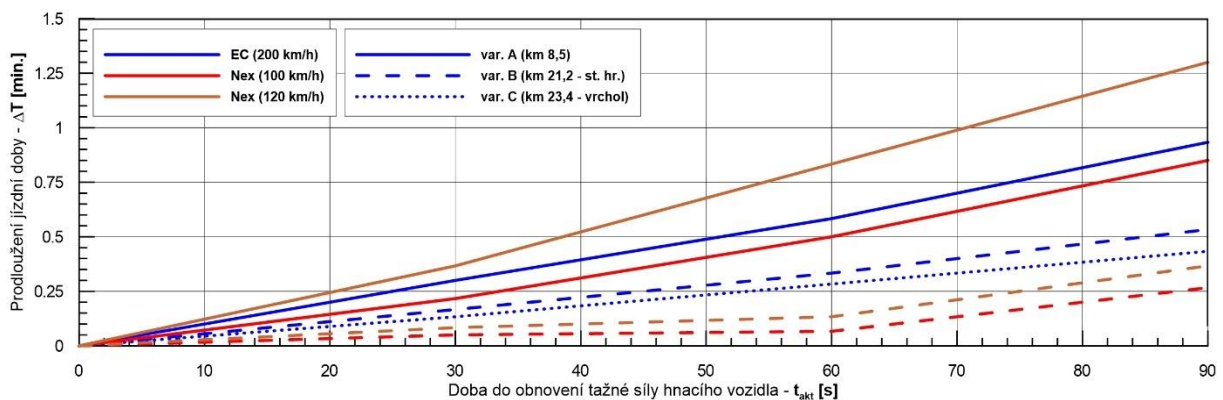
Obr. 12 Dráhové tachogramy pro případ jízdy vyšetřovaných vlaků po nové trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan – vliv doby přerušení tažné síly po změně napájecího systému ($t_{akt} \in \{30; 60; 90\}$ s) při umístění styku soustav v km 21,2 (var. B) za podmínky, že lze vliv tunelu na jízdní odpor popsat tunelovým faktorem $\tau = 2$.



Obr. 13 Dráhové tachogramy pro případ jízdy vyšetřovaných vlaků po nové trati ve směru z Ústí nad Labem do Drážďan – vliv doby přerušení tažné síly po změně napájecího systému ($t_{akt} \in \{30; 60; 90\}$ s) při umístění styku soustav v km 23,4 (var. C) za podmínky, že lze vliv tunelu na jízdní odpor popsat tunelovým faktorem $\tau = 2$.

V grafech na obr. 11 až 13 jsou znázorněny dráhové tachogramy vyšetřovaných vlaků jedoucích z Ústí nad Labem do Drážďan. Pro jednotlivé uvažované varianty umístění místa styku napájecích soustav jsou vždy vykresleny tachogramy jednak pro jízdu bez přerušení tažné síly (znázorněno silnějšími čarami) a dále pak pro případ přerušení působení tažné síly po dobu 30, 60 a 90 s. Ve všech případech byl vliv tunelu na jízdní odpor zohledněn pomocí tunelového faktoru o hodnotě 2,0. Odpovídající prodloužení jízdní doby je vykresleno v závislosti na době přerušení tažné síly v grafu na obr. 14. Dosažené výsledky je možné shrnout následujícím způsobem:

- nejvýraznější vliv na jízdní dobu (pro jízdu směrem do Německa) má umístění místa změny styku napájecích soustav ve variantě A (tedy v km 8,5). V tomto případě je pozorován největší relativní pokles rychlosti, k němuž navíc dochází v situaci, kdy se žádný z uvažovaných vlaků ještě nepohybuje svojí maximální rychlostí. K vyrovnání průběhu rychlosti s tachogramem stanoveným pro jízdu bez přerušení tažné síly ve všech sledovaných případech však dojde nejdříve ve vrcholovém bodě tunelu (a u kontejnerového vlaku s maximální rychlostí 100 km/h pak dokonce ještě v první části tunelu, tedy ve stoupání). Přerušení vyvíjení tažné síly po dobu jedné minuty zde přitom vede u vyšetřovaných vlaků k prodloužení teoretické jízdní doby zhruba o 0,5 až 1 minutu;
- pokud bychom uvažovali jízdu opačným směrem, bude mít umístění místa styku napájecích soustav ve variantě A naopak na jízdní dobu vliv minimální, resp. prakticky žádný. Negativem tohoto umístění však bude neschopnost hnacích vozidel závislé trakce využívat v dotčeném úseku (vyznačujícím se poměrně velkou hodnotou klesání) rekuperační elektrodynamickou brzdou;
- nejmenší vliv na jízdní dobu má umístění místa změny styku napájecích soustav ve variantě C (tzn. v km 23,4 ve vrcholovém bodě tunelu). To je dáno tím, že se zde mění znaménko podélného sklonu. V případě uvažovaných kontejnerových vlaků se takto situovaný styk soustav v teoretických jízdních dobách neprojeví prakticky vůbec, což je ostatně zřejmé také z tachogramů na obr. 13. V případě vlaku kategorie EC sice dochází i při takto umístěném styku soustav k poměrně významnému propadu rychlosti, avšak jím způsobené prodloužení jízdní doby se pohybuje pouze v řádu nízkých desítek sekund (viz čárkovanou čáru na obr. 14). Každopádně se v tomto případě značně omezuje délka úseku, na níž může vlak uvažovaných parametrů reálně využít rychlost 200 km/h. Velmi podobné závěry platí pro variantu C i v případě opačného směru jízdy;
- z hlediska spotřeby energie je ve všech případech vliv umístění styku soustav malý – dochází k mírnému poklesu spotřeby, maximálně v řádu desítek kWh.



Obr. 14 Vliv doby do obnovení tažné síly po změně napájecí soustavy na prodloužení teoretické jízdní doby jednotlivých vyšetřovaných vlaků jedoucích po nové trati Ústí nad Labem–Drážďany pro různá umístění místa styku trakčních napájecích soustav (varianta A: km 8,5; varianta B: km 21,2; varianta C: km 23,4).

Závěr

Tento článek je věnován problematice trakčních výpočtů, tedy výpočtů jízdních dob a spotřeby energie vlaků, v podmínkách dlouhých tunelů a vyšších rychlostí. Na příkladu konkrétního záměru (převedení dálkové dopravy mezi Českou republikou a Saskem z původní trati, trasované údolím Labe, na novostavbu vedenou tunelem pod Krušnými horami) byly provedeny trakční výpočty, jejichž výsledky jednak ukazují na zásadní vliv způsobu zohlednění vlivu tunelu při určování jízdního odporu na vypočtené ukazatele spotřeby trakční energie a také dávají rámcovou představu o přínosu plánované stavby z hlediska jízdních dob a energetické náročnosti. Pozornost je věnována rovněž vlivu potenciálního umístění styku trakčních napájecích soustav na jízdní doby. Na základě prezentovaných výsledků výpočtů a rozborů lze konstatovat následující závěry:

- Stávající přístup ke kvantifikaci odporu z jízdy vlaku tunelem podle předpisu V 7 [3], kdy je v délce tunelu uvažována fixní přírážka +2 ‰ k náhradnímu sklonu, ve své podstatě neodpovídá fyzikální realitě (tj. vliv tunelu na tvarový součinitel odporu vzduchu). Při použití přibližně do rychlosti 120 km/h však poskytuje pro vlaky běžných parametrů co do velikosti vypočteného jízdního odporu výsledky, jež jsou blízké výsledkům získaným s pomocí tunelového faktoru o hodnotě 2, zavedeného do Davisova vztahu pro vozidlový odpor (viz vztah (9)). Pro potřeby modelování jízdy nákladních vlaků se tak tento přístup jeví jako vyhovující.
- Vyšetřování jízdy vlaků v podmínkách dlouhých tunelů a vyšších rychlostí však vyžaduje odklon od „klasického“ přístupu dle předpisu V 7. Jako vhodný způsob zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor se přitom jeví právě zavedení tunelového faktoru do vzorce pro vozidlový odpor. V takovém případě je ovšem zcela zásadní úlohou určení velikosti tohoto faktoru pro dané podmínky. Jelikož jsou projevy aerodynamiky závislé na mnoha faktorech (tvarová členitost vlaku, poměr čelní plochy vlaku a plochy průřezu tunelové trouby, délka tunelu, ale též rychlost proudění vzduchu v tunelu, jež může být ovlivněno jízdou předchozího a/nebo následujícího vlaku apod.), jedná se o úlohu poměrně komplikovanou. Z tohoto důvodu se jeví jako velmi žádoucí využít např. i praktické zkušenosti z provozu v prvních delších železničních tunelech v ČR (tunely Ejpvovice).
- Výsledky porovnávacích trakčních výpočtů, provedených pro vybrané vlakové soupravy na stávající a nově plánované trati Ústí nad Labem–Drážďany ukazují, že výrazné zkrácení délky trasy – jakkoliv přínosné z hlediska zkrácení jízdních dob – nemusí být postačující podmínkou i pro snížení energetické náročnosti dopravy. Z tohoto hlediska se velmi negativně projevuje jednak podstatně méně příznivý výškový profil nové trati a jednak výrazně zhoršené aerodynamické poměry (dané kombinací jízdy tunelem v podstatné části trasy a vyšší rychlosti).
- Výsledky provedených výpočtů naznačují, že v případě provozu rychlých vlaků v dlouhých tunelech dochází ke značnému nárůstu měrné spotřeby energie, a to výrazně nad rámec v současnosti nastavených paušálních hodnot, užívaných na síti Správy železnic pro potřeby rozúčtování spotřeby energie. Pokud by tyto „paušály“ měly být využívány i v budoucnosti, jeví se jako nezbytné stanovit pro podmínky provozu v dlouhých tunelech, resp. obecně pro provoz na tratích sítě RS, nová směrná čísla.
- Výsledky provedeného rozboru dále také ukazují, že zdánlivý detail, kterým je umístění styku trakčních napájecích soustav, může mít nezanedbatelný vliv na jízdní doby. Problematiku umístění styku napájecích soustav je přitom potřeba

vnímat v širších souvislostech, zahrnujících nejen parametry hnacích vozidel, ale i požadavky na bezpečnost v tunelech nebo provozní potřeby související s (ne)možností využití rekuperačního brzdění při jízdě po spádu. Přitom je nutné mít na paměti, že v současné době navržené řešení nové trati bude ovlivňovat technologii vozby minimálně po dobu několika desítek let.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu ev. č. SGS_2021_010 „Vybrané aspekty z oblasti dopravních prostředků a infrastruktury řešené na DFJP“ Univerzity Pardubice.

Literatura

- [1] ŘEZNÍČEK, J.: *Trakční výpočty v podmínkách dlouhých tunelů*. Bakalářská práce, 73 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2020. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/75907> [cit. 2021-01-31].
- [2] MICHÁLEK, T. – ZELENKA, J.: *Trakční mechanika*. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta J. Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [3] FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY: *ČSD V 7. Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1979. (Účinnost od 23. 5. 1982.)
- [4] MICHÁLEK, T. – ŠIMRAL, P.: *Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků*. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: XXIII. konference s mezinárodní účastí, Sborník příspěvků*, s. 283–290. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta J. Pernera, 2017. ISBN 978-80-7560-085-1. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/69910> [cit. 2021-02-03].
- [5] SCHNEIDER, V. – KOLÁŘ, Z. – ONDRÁČEK, J.: *Dynamika železniční dopravy*. 2. přepracované vydání, 268 s. Praha: NADAS, 1966.
- [6] NIU, J. – SUI, Y. – YU, Q. – CAO, X. – YUAN, Y.: *Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research*. In: *Energy and Built Environment*, Vol. 1 (2020), Issue 4, s. 351–375. ISSN 2666-1233.
- [7] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1302/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii*. Brusel: EK, 2014.
- [8] *Eisenbahn-Neubaustrecke Dresden-Prag*. [on-line] Webová prezentace spolkové země Sasko. Dostupné z: <https://www.nbs.sachsen.de> [cit. 2021-02-05]
- [9] *Nové železniční spojení Drážďany – Praha*. [on-line] Webová prezentace Správy železnic, s.o. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/vrt/vrt-drazdany-praha> [cit. 2021-02-05].
- [10] DB NETZE: *Unterlagen zum Raumordnungsverfahren für die Eisenbahn-Neubaustrecke Dresden – Prag. Anlagen zu Teil B: Verkehrliche und technische Beschreibung*. Leipzig, 16. 12. 2019.
- [11] SPRÁVA ŽELEZNIC: *Smlouva o dodávkách trakční elektrické energie*. [on-line] Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50172200/sml-dodavky-tee-2019.pdf> [cit. 2021-03-03].

Lektorovali:

Ing. Rudolf Mrzena, Ph.D. (Správa železnic, státní organizace)

Ing. et Ing. Lumír Gregor, Ph.D. (ČD, a.s.)