

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Trakční výpočty v podmínkách dlouhých tunelů

Bakalářská práce

2020

Jindřich Řezníček

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jindřich Řezníček**  
Osobní číslo: **D15179**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Kolejová vozidla**  
Téma práce: **Trakční výpočty v podmínkách dlouhých tunelů**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Zásady pro vypracování

V současné době je v podmínkách české železnice připravována výstavba sítě tzv. rychlých spojení (RS). Součástí nově budovaných tratí mají být i dlouhé tunely s traťovou rychlostí 200 km/h a vyšší. Přínosem nových traťových úseků je v některých případech výrazné zkrácení trati, avšak provoz vlaků vysokými rychlostmi v dlouhých tunelech se projevuje vyšším aerodynamickým odporem, a tudíž i vyšší energetickou náročností.

Zpracujte:

1. výběr a charakteristiku vytipovaného traťového úseku pro potřeby porovnání jízdních dob a spotřeby energie vybraných vlaků na původní trati a na nové trati, jejíž součástí je dlouhý tunel;
2. rešerši metod zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku, používaných v trakčních výpočtech;
3. výpočty jízdních dob a spotřeby energie vybraných vlaků na staré a na nové trati;
4. zhodnocení získaných výsledků.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího BP**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] MICHÁLEK T., ZELENKA J.: Trakční mechanika. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.  
[2] FMD: ČSD (SŽDC) V7. Trakční výpočty. Praha: NADAS, 1982.  
[3] HELDT P.: Schienenneubaustrecke (NBS) Dresden-Prag ausserhalb des Elbtals. In: ETR 12/2015, s. 28-32.  
[4] ČSN EN 14067-5+A1. Železniční aplikace – Aerodynamika – Část 5: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku v tunelech. Praha: ÚNMZ, 2011.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **18. února 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2020**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jakub Vágner, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Ve Lhotě za Červeným Kostelcem dne 21. 5. 2020

Jindřich Řezníček

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D., za doporučení, odborné připomínky a všestrannou pomoc. Též si cením jeho vstřícnosti, ochoty a času, který mi věnoval.

Nadále bych chtěl poděkovat studijním kolegům Bc. Adamu Bílkovi, Vojtěchu Beranovi, DiS., Bc. Martinu Králíkovi a Ondřeji Severovi, se kterými jsem mohl trávit nejenom studijní čas u odborných témat.

Poděkování patří rovněž Bc. Vojtěchu Vorlovi, Ing. Ondřeji Fojtů, členům Vysokoškolského katolického společenství v Pardubicích i dalším přátelům, kteří mě podporovali nejenom v časech lehkých, nýbrž i v časech velice náročných.

V neposlední řadě bych chtěl z celého srdce poděkovat mé rodině, především rodičům, kteří mi vytvořili nadstandardní zázemí, za jejich trpělivost a oporu. Zároveň si velice cením jejich silné podpory po celou dobu studia, bez které by studium nebylo možné.

## **Anotace**

Práce se zabývá rozborem jednotlivých metod zohledňujících odpor z jízdy tunelem v trakčních výpočtech. Pro srovnání jízdních dob a spotřeby energie vybraných vlaků je vytipován traťový úsek Ústí nad Labem – Drážďany, kde se plánuje vysokorychlostní trať, jejíž součástí má být dlouhý tunel pod Krušnými horami. V tomto úseku je provedeno modelování jízd vybraných osobních a nákladních vlaků na původní a nově plánované trati a následné zhodnocení získaných výsledků.

## **Klíčová slova**

modelování, odpor z jízdy tunelem, tunelový faktor, tunel, vysokorychlostní železnice

## **Title**

Traction calculations under conditions of long tunnels

## **Abstract**

The work deals with an analysis of individual methods taking into consideration the tunnel resistance in traction calculations. In order to compare the travel times and energy consumption of selected trains, Ústí nad Labem – Dresden line is selected. In this track section, a new high-speed line including a long tunnel under the Krušné mountains is planned. The modelling of rides of selected passenger and freight trains is performed on the current and newly planned line. Subsequently, the results of the calculations are evaluated.

## **Key words**

modelling, tunnel resistance, tunnel factor, tunnel, high-speed railway

# Obsah

<b>Seznam použitých symbolů.....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam zkratek.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>2 Charakteristika traťového úseku.....</b>	<b>14</b>
2.1 Stávající trať.....	14
2.1.1 Historie trati.....	14
2.1.2 Ústí nad Labem – státní hranice CZ/DE.....	16
2.1.3 Státní hranice CZ/DE – Dresden.....	16
2.1.4 Parametry sledovaného úseku trati.....	17
2.1.4.1 Traťová rychlost.....	17
2.1.4.2 Redukovaný a náhradní sklon.....	18
2.2 Nová trať.....	20
2.2.1 Drážďany – Ústí nad Labem.....	23
2.2.2 Ústí nad Labem – Litoměřice – Praha.....	24
2.2.3 Parametry sledovaného úseku trati.....	25
2.2.3.1 Traťová rychlost.....	26
2.2.3.2 Náhradní sklon.....	27
<b>3 Jízdní odpory.....</b>	<b>29</b>
3.1 Vozidlové odpory.....	29
3.1.1 Odpor prostředí.....	29
3.1.2 Vozidlové odpory ve výpočtech.....	31
3.2 Traťové odpory.....	32
3.2.1 Odpor z jízdy tunelem dle předpisu SŽDC V7.....	32
3.2.2 Odpor z jízdy tunelem zavedením „tunelového faktoru $\tau$ “.....	32
3.2.3 Srovnání přístupu obou metod.....	33

<b>4</b>	<b>Modelování jízd vlaků na staré a na nové trati .....</b>	<b>41</b>
4.1	Definice vstupních dat.....	42
4.1.1	Parametry hnacího vozidla.....	42
4.1.2	Parametry vlaku.....	44
4.2	Matematický model.....	45
4.2.1	Trat'ový odpor.....	46
4.2.2	Vozidlový odpor .....	46
4.2.3	Rychlostní profil tratě.....	47
4.2.4	Tažná síla .....	47
4.2.5	Zrychlení.....	48
4.2.6	Rychlost .....	48
4.2.7	Výkon.....	49
4.2.8	Jízdní doba .....	49
4.2.9	Trakční práce a energie.....	49
4.2.10	Brzdná síla .....	50
4.2.11	Brzdný výkon .....	50
4.2.12	Brzdná práce a energie.....	51
<b>5</b>	<b>Analýza získaných výsledků.....</b>	<b>52</b>
5.1	Profil tratí .....	52
5.2	Stávající trať .....	53
5.3	Nová trať.....	59
5.4	Porovnání jízd vlaků na staré a na nové trati .....	66
5.4.1	Osobní vlaky .....	66
5.4.2	Nákladní vlaky .....	67
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>69</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>72</b>



## Seznam použitých symbolů

$a$	[N.kN <sup>-1</sup> ]	koeficient konstantního členu vzorce pro měrný vozidlový odpor
$A$	[N]	koeficient konstantního členu vzorce pro vozidlový odpor
$b$	[N.kN <sup>-1</sup> .h.km <sup>-1</sup> ]	koeficient lineárního členu vzorce pro měrný vozidlový odpor
$B$	[N.h.km <sup>-1</sup> ]	koeficient lineárního členu vzorce pro vozidlový odpor
$B_{EDBmax}$	[N, kN]	maximální brzdná síla hnacího vozidla
$B_{EDBP}$	[N, kN]	brzdná síla ERB HV při využití max. brzdného výkonu HV
$B_{EDBskut}$	[N, kN]	skutečná brzdná síla ERB hnacího vozidla
$B_{potř}$	[N, kN]	potřebná brzdná síla
$B_{vl}$	[N, kN]	celková brzdná síla na obvodu kol
$B_{vzd}$	[N, kN]	brzdná síla samočinné tlakovzdušné brzdy vlaku
$c$	[N.kN <sup>-1</sup> .h <sup>2</sup> .km <sup>-2</sup> ]	koeficient kvadratického členu vzorce pro měrný vozidlový odpor
$C$	[N.h <sup>2</sup> .km <sup>-2</sup> ]	koeficient kvadratického členu vzorce pro vozidlový odpor
$C_x$	[-]	tvárový součinitel odporu vzduchu
$E_{Bcelk}$	[kWh]	celkové množství rekuperované energie
$E_{celk}$	[kWh]	celková spotřeba energie
$F_{adh}$	[N, kN]	adhezní tažná síla
$F_{ok}$	[N, kN]	celková tažná síla na obvodu kol
$F_{okskut}$	[N, kN]	skutečná tažná síla na obvodu kol
$F_{Pmax}$	[N, kN]	tažná síla při maximálním výkonu vozidla
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení (uvažována hodnota 9,81 m.s <sup>-2</sup> )
$G$	[kN]	tíha vlaku (vozidla)
$m_{dv}$	[kg]	hmotnost dopravovaných vozidel
$m_{hv}$	[kg]	hmotnost hnacího vozidla
$m_{vlred}$	[kg]	setrvačná (redukovaná) hmotnost vlaku
$M$	[t]	hmotnost vlaku (vozidla)
$M_{hv}$	[t]	hmotnost hnacího vozidla
$M_{dv}$	[t]	hmotnost dopravovaných vozidel
$M_{vl}$	[t]	hmotnost vlaku
$o_R$	[N/kN]	měrný odpor z jízdy obloukem
$o_s$	[N/kN]	měrný odpor ze sklonu koleje
$o_{tun}$	[N/kN]	měrný odpor z jízdy tunelem

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

$o_v$	[N/kN]	měrný vozidlový odpor
$o_{vzd}$	[N/kN]	měrný aerodynamický odpor
$O_t$	[N, kN]	traťový odpor
$O_v$	[N, kN]	vozidlový odpor
$O_{vl}$	[N, kN]	celkový jízdní odpor vlaku
$O_{vzd}$	[N, kN]	aerodynamický odpor
$P$	[kW]	výkon hnacího vozidla
$P_{EDBmax}$	[kW]	maximální brzdňý výkon ERB hnacího vozidla
$P_{EDBskut}$	[kW]	skutečný brzdňý výkon ERB hnacího vozidla
$P_{hvmax}$	[kW]	výkon hnacího vozidla
$R$	[m]	poloměr oblouku
$s$	[‰]	sklon koleje
$s_n$	[N/kN]	náhradní sklon
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha příčného průřezu vozidla
$t$	[s]	jízdní doba
$t_{celk}$	[h, min, s]	celková jízdní doba
$t_{akt}$	[s]	aktivační doba
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost jízdy
$V$	[km.h <sup>-1</sup> ]	rychlost jízdy
$W$	[kJ]	trakční práce
$W_B$	[kJ]	brzdňá práce ERB
$W_{Bcelk}$	[kWh]	celková brzdňá práce ERB
$W_{celk}$	[kWh]	celková trakční práce
$\ddot{x}$	[m.s <sup>-2</sup> ]	zrychlení vlaku ve směru jízdy
$\eta_{hv}$	[%]	účinnost hnacího vozidla
$\eta_{rek}$	[%]	účinnost rekuperace
$\mu_0$	[-]	součinitel adheze
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	měrná hmotnost (hustota) prostředí
$\rho_{dv}$	[-]	součinitel rotačňích hmot dopravovaných vozidel
$\rho_{hv}$	[-]	součinitel rotačňích hmot hnacího vozidla
$\tau$	[-]	tunelový faktor

## **Seznam zkratek**

Abstbf	Abstellbahnhof – odstavné nádraží
AC	střídavá trakční soustava
AVV	automatické vedení vlaku
Bft	Bahnhoftteil – část nádraží
CZ	Česko
CZE	centrální zdroj energie
ČR	Česká republika
DC	stejnoseměrná trakční soustava
DE	Německo
DV	dopravovaná vozidla
EDB	elektrodynamická brzda hnacího vozidla
ERB	elektrodynamická rekuperační brzda hnacího vozidla
ETCS	European Train Control System – jednotný evropský zabezpečovací systém
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Railway – komunikační systém
Hbf	Hauptbahnhof – hlavní nádraží
HV	hnací vozidlo
Hp	Haltepunkt – zastávka
LS	vlakový zabezpečovač
NBS	Neubaustrecke – novostavba trati
Nex	expresní nákladní vlak
SD	sběrač dole
SN	sběrač nahoře
Správa železnic	Správa železnic, státní organizace
TTP	Tabulka(ky) traťových poměrů
Üst	Überleitstelle – odbočka
VRT	Vysokorychlostní trať

## 1 Úvod

Česká železnice v posledních letech zaznamenává vysoký nárůst cestujících v osobních vlacích. K větší spokojenosti a oblibě pomohl vstup soukromých dopravců na železniční síť. Ostře sledovaným se stal první tranzitní koridor Praha – Ostrava, kde se výrazně zvýšil poskytovaný komfort v podobě nových či modernizovaných vozů a také poskytovaných služeb na palubě vlaku. S postupem času se však zlepšuje i pohodlí na regionálních tratích, a cestující si tudíž hledají cesty do vlaků ze silnic a dálnic, na kterých je dopravní situace často neúnosná. Již v dnešní době lze v běžném provozu potkat vlaky s maximální konstrukční rychlostí 200 km/h, jak dokazuje obr. 1, kterou ale v České republice zatím není možné využít. Železnice se stává komfortním, rychlým a bezpečným dopravním prostředkem.



*Obr. 1 EC 171 ze stanice Berlin Hbf do stanice Praha hl. n. dne 29. 9. 2018 nedaleko železniční stanice Praha-Podbaba, autor: Jiří Štembírek*

V nákladní dopravě působí několik desítek železničních dopravců, jež zajišťují vozbu ucelených vlaků či vozových zásilek. Nárůst přepravy v nákladní dopravě není tak velký jako u dopravy osobní, avšak může se předpokládat, že v následujících letech dojde k většímu politickému tlaku na ekologičnost přepravy s ohledem na rychlost přepravení zboží z místa A na místo B. Železnice tyto dva konkrétní požadavky kombinuje ze všech možných druhů doprav nejlépe, proto je třeba počítat dopředu a zajistit kvalitní dopravní infrastrukturu jak pro osobní, tak nákladní železniční dopravu.

## **TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

---

S vyšším počtem spojů na tratích se začíná projevovat problém v propustnosti železniční sítě (vysvětleno v [1]), který je třeba urychleně řešit. Tato situace má řešení v podobě omezování přístupu železničních dopravců na infrastrukturu, což nepovede k velkému úspěchu. Zároveň se tím zakonzervuje problém pro další generace. Je třeba přemýšlet dopředu a začít budovat nová železniční spojení. Některé tratě jsou již za hranicí kapacity, a tak je potřeba jednat. Tím pádem vyvstává otázka, jakým způsobem vést výstavbu nových tratí. Je potřeba brát v potaz, zda problém vyřeší nová konvenční železniční síť či zda začít stavět vysokorychlostní železnici. S druhým navrhovaným se pojí i další otázka, zda vpustit na tratě s vyšší rychlostí právě i pomalejší nákladní vlaky nebo novou síť využít jen pro osobní dopravu a uvolněnou kapacitu na starých tratích použít pro nákladní vlaky.

S použitím rychlých spojení vzniká potřeba stavět tratě s velkými poloměry oblouků pro vysoké rychlosti. Vzhledem k tomu, že se Česká republika nachází ve velmi členité krajině, vzniká potřeba výstavby dlouhých tunelů. Přínosem nových traťových úseků je v některých případech výrazné zkrácení trati, avšak provoz vlaků vysokými rychlostmi v dlouhých tunelech se projevuje vyšším aerodynamickým odporem, a tudíž i vyšší energetickou náročností.

Práce je nejprve věnována výběru a charakteristice vytipovaného traťového úseku pro potřeby porovnání jízdních dob a spotřeby energie vybraných vlaků na původní a na nové trati, jejíž součástí je dlouhý tunel. Následuje zpracování rešerše metod zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku používaných v trakčních výpočtech. Dále jsou realizovány výpočty jízdních dob a spotřeby energie vybraných vlaků na staré a na nové trati. V závěru práce je provedeno zhodnocení získaných výsledků.

## **2 Charakteristika traťového úseku**

Jelikož se v českých podmínkách nevyskytuje žádný dlouhý tunel s maximální povolenou rychlostí 200 km/h vhodný pro provedení potřebného výpočtu a zhodnocení, bylo potřeba zvolit traťový úsek, který se nachází alespoň ve fázi přípravy. Konkrétně byl vybrán úsek Ústí nad Labem – Drážďany, kde se v nejbližších letech plánuje realizace nového spojení. Součástí připravovaného železničního úseku má být dlouhý tunel o délce 26,53 km s navrhovanou maximální rychlostí pro osobní vlaky 200 km/h (výhledově až 230 km/h), pro nákladní vlaky 120 km/h, jak uvádí [2]. Tyto faktory dostačují k provedení zadaného úkolu.

Vytipovaný železniční úsek Ústí nad Labem – Děčín – státní hranice – Bad Schandau – Dresden je součástí páteřní trasy do Německa jak pro osobní, tak nákladní železniční dopravu. Navíc se jedná o jediné elektrifikované spojení ČR a Německa. Dle [3] je tento úsek součástí evropských nákladních železničních koridorů RFC 7 (Východní a východo-středomořský koridor) a RFC 8 (Severomořský-baltský koridor). Na českém území vytipovaný úsek tvoří část I. tranzitního koridoru (hranice Německa – Děčín – Ústí nad Labem – Praha – Česká Třebová – Brno – Břeclav – hranice Rakouska a Slovenska).

Již v roce 2015 mluví článek [4] o přetíženém železničním spojení, které vede údolím Labe a turisticky významnými saskými regiony, včetně Saského Švýcarska. Česká republika je nejenom pro Sasko významným zahraničním obchodním partnerem. Dle prognóz je třeba počítat s nárůstem nákladní železniční dopravy, což je důvod mít vybudované kvalitní přeshraniční železniční spojení. Z topografických i ekologických důvodů není možné vybudování dalších kolejí ke stávající dvoukolejné trati, proto je třeba hledat nové trasy.

### **2.1 Stávající trať**

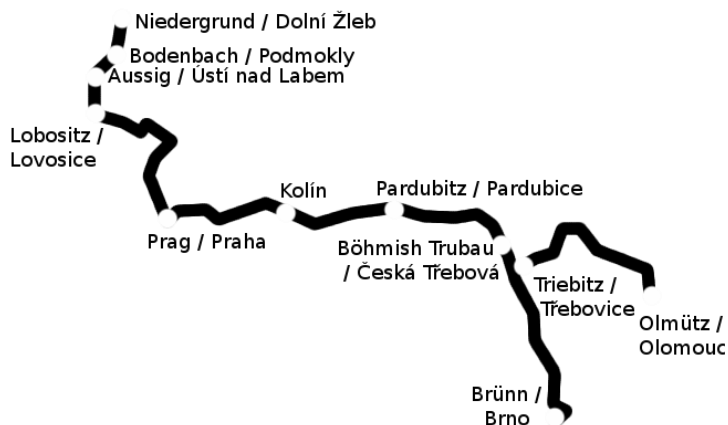
Tato kapitola se věnuje popisu stávajícího traťového úseku mezi Ústím nad Labem hlavním nádražím a Dresden Hbf.

#### **2.1.1 Historie trati**

Historie trati se začala psát v 19. století. Severní státní dráha byla první železniční trať na českém území v rukou Rakouského císařství. Jak je vidět na obr. 2, trať vedla z Olomouce a Brna přes Českou Třebovou, Prahu, Ústí nad Labem, Podmokly (dnes Děčín hlavní nádraží) až do Drážďan. Císař Ferdinand I. vydal souhlas se stavbou 26. listopadu 1842 a do konce roku byla uzavřena dohoda mezi Saskem a Rakouskem. [5]

## TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ

Nejprve je však vybudován úsek z Olomouce do Prahy. Dokončení tohoto úseku je datováno do roku 1845, avšak již v roce 1842 začíná Jan Perner hledat trasy pro navazující spojení Prahy a Drážďan. Výsledkem jeho snažení je volba vést trať podél řek Vltavy a Labe. I přesto trať prochází náročným terénem, a tak dělníci nepokračují ve stavbě dle plánovaného harmonogramu. Z tohoto důvodu není trať zprovozněna najednou v celé délce. Mezi Prahou a Lovosicemi se začíná jezdit 1. června 1850. Do Ústí nad Labem se pravidelní cestující podívali o čtyři měsíce později. Zahájení provozu sledované části trati je datováno k 6. 4. 1851. [6]



Obr. 2 Severní státní dráha, upraveno dle [7]

Dle [8] je elektrifikace z Drážďan do Schöny realizována v sedmdesátých letech 20. století, avšak český úsek je dokončen až v roce 1987. Poté, co se trať stala součástí prvního tranzitního koridoru, je postupně modernizována a umožňuje provozovat vlaky maximální rychlostí až 160 km/h.

V úseku Praha Masarykovo nádraží – Děčín hlavní nádraží si trať do historie zapsala pravidelný zkušební provoz jednotek řady 680 s cestujícími. Z rozhodnutí Drážního úřadu se první jízda uskutečnila 23. prosince 2004. Konkrétně se jednalo o jednotku 680.003, která byla nasazena na rychlíky 772/777. Na obr. 3 je zachycen pravidelný zkušební provoz pendolin na této trati. [9]



Obr. 3 R 772 ze stanice Praha Masarykovo nádraží do stanice Děčín hlavní nádraží dne 10. 3. 2005, jednotka 680.003 vyjela z tunelu u zastávky Mlčechovstý, autor: Jiří Konečný, upraveno dle [10]

### **2.1.2 Ústí nad Labem – státní hranice CZ/DE**

Sledovaný úsek se nachází v Ústeckém kraji. Začíná významným železničním uzlem Ústí nad Labem hlavní nádraží a pokračuje po levém břehu Labe přes Děčín hlavní nádraží až na státní hranici se Spolkovou republikou Německo. V jízdním řádu pro cestující je vybraný úsek součástí tratě 130 (Kadaň-Pruněřov – Děčín) a 083 (Děčín – Bad Schandau – Dolní Poustevna – Rumburk). Pro služební potřebu zaměstnanců pracujících na železnici je veden pod číslem 527A (Praha-Bubeneč – Děčín hl. n.) a 544A (Děčín hl. n. – Děčín st. hr.). V celém úseku je trať dvoukolejná, elektrifikovaná, napájena stejnosměrnou trakční soustavou o napětí 3 kV s povolenou rekuperací, vybavená traťovým zabezpečovacím zařízením typu obousměrný tříznaký automatický blok, vlakovým zabezpečovačem LS a traťovým rádiovým systémem GSM-R. V budoucnu se zde plánuje implementace evropského zabezpečovacího zařízení ETCS L2. Na trati smí být provozovány vlaky s největší povolenou délkou vlaku o hodnotě 695 m. Dovolená traťová třída zatížení je D4, což znamená zatížení 22,5 t na nápravu a 8 t na běžný metr. Trať umožňuje provoz vlaků maximální rychlostí až 130 km/h v úseku Ústí nad Labem hlavní nádraží – Děčín a až 120 km/h v úseku Děčín – státní hranice CZ/DE. Dle [11] se v prvním úseku nacházejí tři stanice a sedm zastávek. Na druhém úseku se nachází jedna stanice, výhybna, čtyři zastávky a dva železniční tunely (Ovčí stěna a Červená skála), jak je uvedeno v [12]. Při uvažování relativní vzdálenosti s počátečním bodem ve stanici Ústí nad Labem hlavní nádraží měří sledovaný úsek na státní hranici 34,4 km. [3]

### **2.1.3 Státní hranice CZ/DE – Dresden**

Navazující úsek se nachází na německé straně. Konkrétně se jedná o Svobodný stát Sasko s hlavním městem Drážďany. I v Německu trať kopíruje řeku Labe na jejím levém břehu. Český jízdní řád pro cestující uvádí traťový úsek pod číslem 083 (Děčín – Bad Schandau – Dolní Poustevna – Rumburk). V Německu je to trať 241.1 S1 (Meißen Triebischtal – Coswig (b Dresden) – Dresden – Pirna – Schöna), 241.2 S2 (Dresden Flughafen – Dresden – Heidenau – Pirna) a 247 U28 (Rumburk – Sebnitz – Bad Schandau – Schöna – Děčín hl. n.). Celá trať je elektrifikovaná jednofázovou střídavou trakční soustavou o napětí 15 kV s frekvencí 16,7 Hz. Ke změně napěťové soustavy ze stejnosměrné na střídavou dochází na státní hranici. Maximální rychlost, které mohou vlaky dosáhnout, je 160 km/h. Do stanice Pirna je trať dvoukolejná. V úseku Pirna – Dresden jsou vedle sebe položeny čtyři koleje a provoz dálkových a příměstských vlaků systému S-Bahn může být oddělen. Koleje systému S-Bahn obsluhují jednotlivé zastávky, kdežto dálkové koleje jen větší stanice. Každý dálkový vlak má zkonstruován jízdní řád i pro jízdu na trati pro příměstské vlaky jako tzv. alternativní trasu. V celém úseku se nachází devět zastávek a devět stanic včetně poslední stanice sledovaného úseku, tedy Dresden Hbf. Relativní vzdálenost sledovaného úseku s počátečním bodem na státní hranici do Dresden Hbf je 50,65 km. [8]



**2.1.4 Parametry sledovaného úseku trati**

Sledovaný úsek začíná v traťovém kilometru 516,628 ve stanici Ústí nad Labem hlavní nádraží. Dále pokračuje do kilometru 540,209, kde dochází ke změně staničení na 1,074 a končí v kilometru 62,508 ve stanici Dresden Hbf. Celková relativní délka úseku je 85,05 kilometru. Uvažována je jízda vlaku po správné („pravé“) koleji pro jízdu tam (2. traťová kolej) a zpět (1. traťová kolej). Následující tab. 1 a tab. 2 udávají významné body vzhledem k relativní vzdálenosti pro snadnější orientaci v následujících grafech.

Tab. 1 Relativní vzdálenost významných bodů sledovaného úseku ve směru do Drážďan

směr Ústí nad Labem – Drážďany	
významný bod	relativní vzdálenost [km]
Ústí nad Labem hlavní nádraží	0,00
Děčín hlavní nádraží	23,22
státní hranice	34,42
Bad Schandau	45,34
Pirna	67,94
Dresden Hbf	85,05

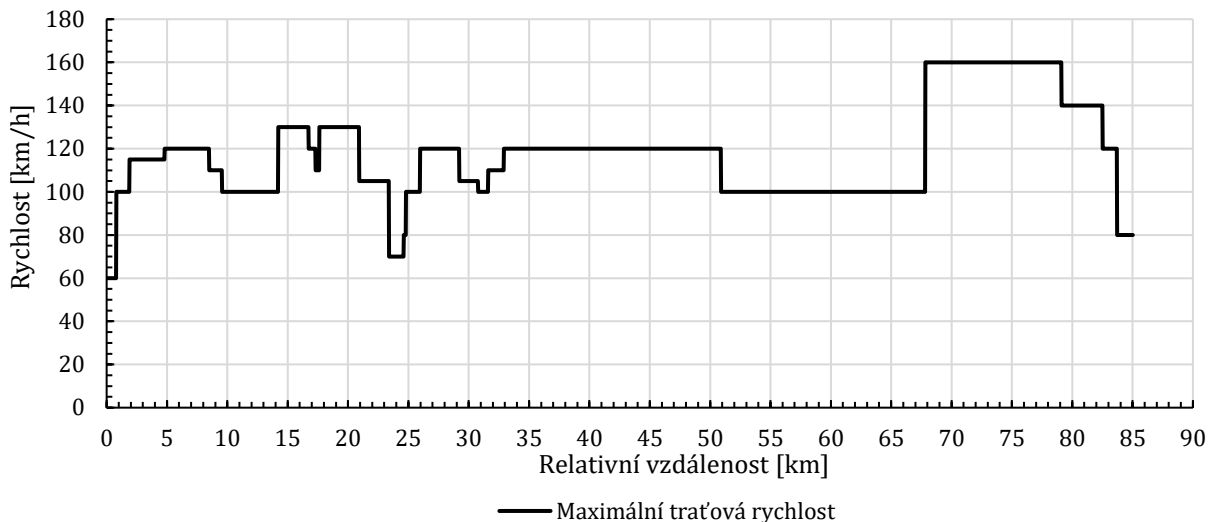
Tab. 2 Relativní vzdálenost významných bodů sledovaného úseku ve směru do Ústí nad Labem

směr Drážďany – Ústí nad Labem	
významný bod	relativní vzdálenost [km]
Dresden Hbf	0,00
Pirna	17,11
Bad Schandau	39,71
státní hranice	53,63
Děčín hlavní nádraží	61,83
Ústí nad Labem hlavní nádraží	85,05

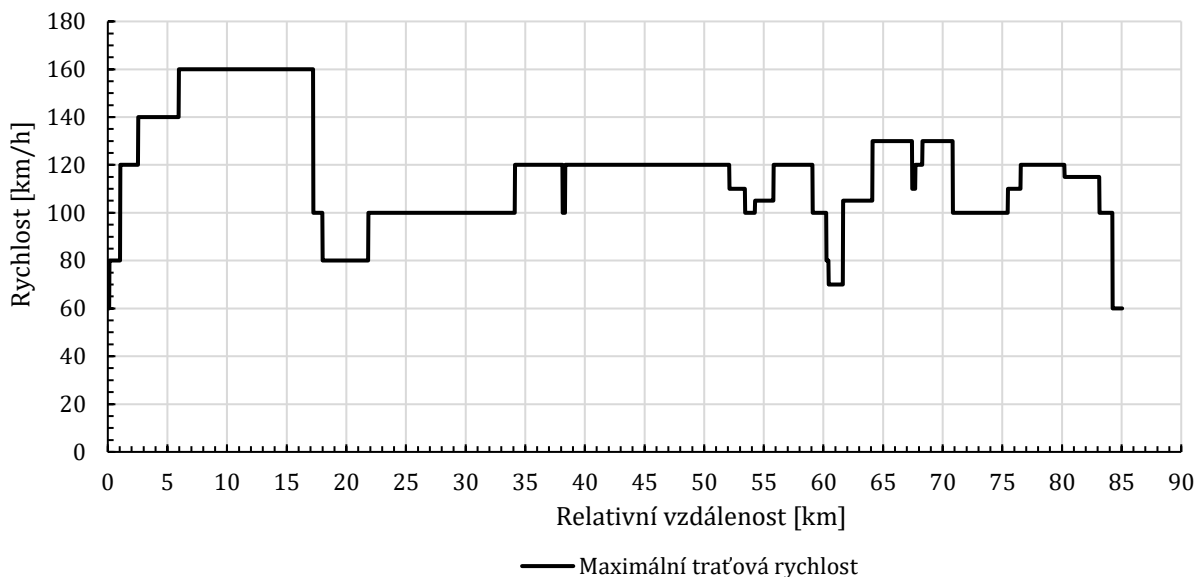
**2.1.4.1 Traťová rychlost**

Na českém území jsou traťové rychlosti odečteny z TTP Správy železnic 527A, změna číslo: 27, účinnost od: 15. 10. 2019 a 544A, změna číslo: 15, účinnost od: 15. 7. 2019. Na německé straně jsou údaje použity z tabelárního jízdního řádu pro strojvedoucí vlaků (Děčín) – Bad Schandau – Dresden s platností od 10. 6. 2018 do 8. 12. 2018. Rychlostní profil tratě je pro jednotlivé směry vyobrazen na obr. 4 a obr. 5.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 4 Grafické znázornění průběhu maximální traťové rychlosti ze stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží do stanice Dresden Hbf



Obr. 5 Grafické znázornění průběhu maximální traťové rychlosti ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží

**2.1.4.2 Redukovaný a náhradní sklon**

Údaje s redukovaným sklonem od začátku sledovaného úseku až do traťového kilometru 22,65 byly pro potřeby řešení bakalářské práce získány z podkladů Správy železnic.

Ze stanice Bad Schandau do stanice Dresden Hbf bylo potřeba nejprve stanovit náhradní sklon. K tomuto účelu byl využit program Google Earth Pro, ze kterého byla odečtena za pomoci GPS nadmořská výška vybraných stanic, zastávek a odboček. Tento údaj se dále využil pro stanovení průměrné hodnoty stoupání, resp. klesání jednotlivých úseků, jak ukazuje tab. 3. Hodnota sklonu byla zaokrouhlena na čtyři desetinná místa. Pro směr Dresden – Bad Schandau byla použita hodnota sklonu s opačným znaménkem.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Tab. 3 Průměrný sklon jednotlivých úseků ve směru do Drážďan

stanice/zastávka/odbočka	nadmořská výška [m n. m.]	traťový kilometr [km]	délka úseku [m]	průměrný sklon [‰]
Bad Schandau	125	22,65	5 050	-0,1980
Königstein Hp	124	27,70		
Königstein Hp	124	27,70	6 200	0,0000
Kurort Rathen	124	33,90		
Kurort Rathen	124	33,90	3 200	-0,9375
Stadt Wehlen Hp	121	37,10		
Stadt Wehlen Hp	121	37,10	3 500	0,0000
Úst Obervogel Hp	121	40,60		
Úst Obervogel Hp	121	40,60	4 800	-1,0417
Bft Pirna	116	45,40		
Bft Pirna	116	45,40	5 800	0,3448
Bft Heidenau	118	51,20		
Bft Heidenau	118	51,20	2 700	1,1111
Bft Dresden-Niedersedlitz	121	53,90		
Bft Dresden-Niedersedlitz	121	53,90	3 500	-0,2857
Dresden-Reick Abstbf	120	57,40		
Dresden-Reick Abstbf	120	57,40	5 100	-0,3922
Bft Dresden Hbf	118	62,50		

Dále bylo potřeba stanovit poloměry oblouků. Pro odečtení poloměrů oblouků tratě z Google Earth Pro se využilo nástroje Pravítko s funkcí Kruh. Jednotlivé kružnice byly postupně přikládány k trati s takovým poloměrem, aby co nejvíce kopírovaly oblouky traťového úseku.

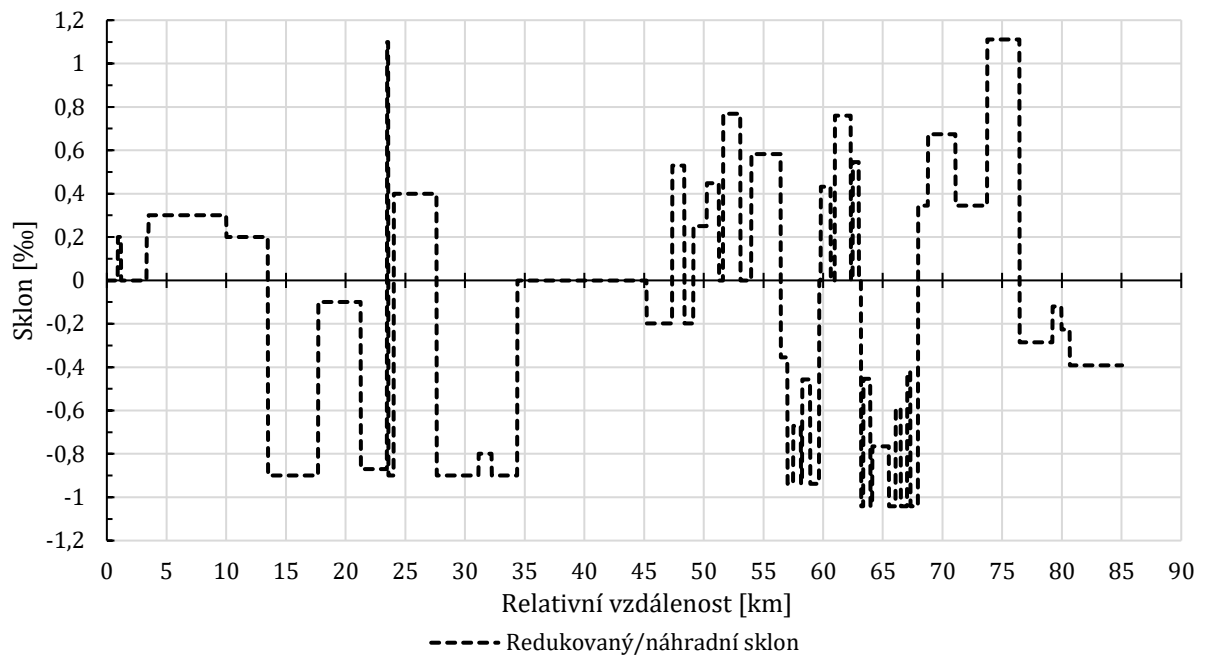
Po zjištění požadovaných údajů byl sestaven náhradní sklon tratě. Pro začlenění vlivu oblouku koleje do náhradního sklonu byl využit vztah (1), který udává měrný odpor z jízdy obloukem koleje v [N/kN]:

$$o_R = \frac{600}{R}, \quad (1)$$

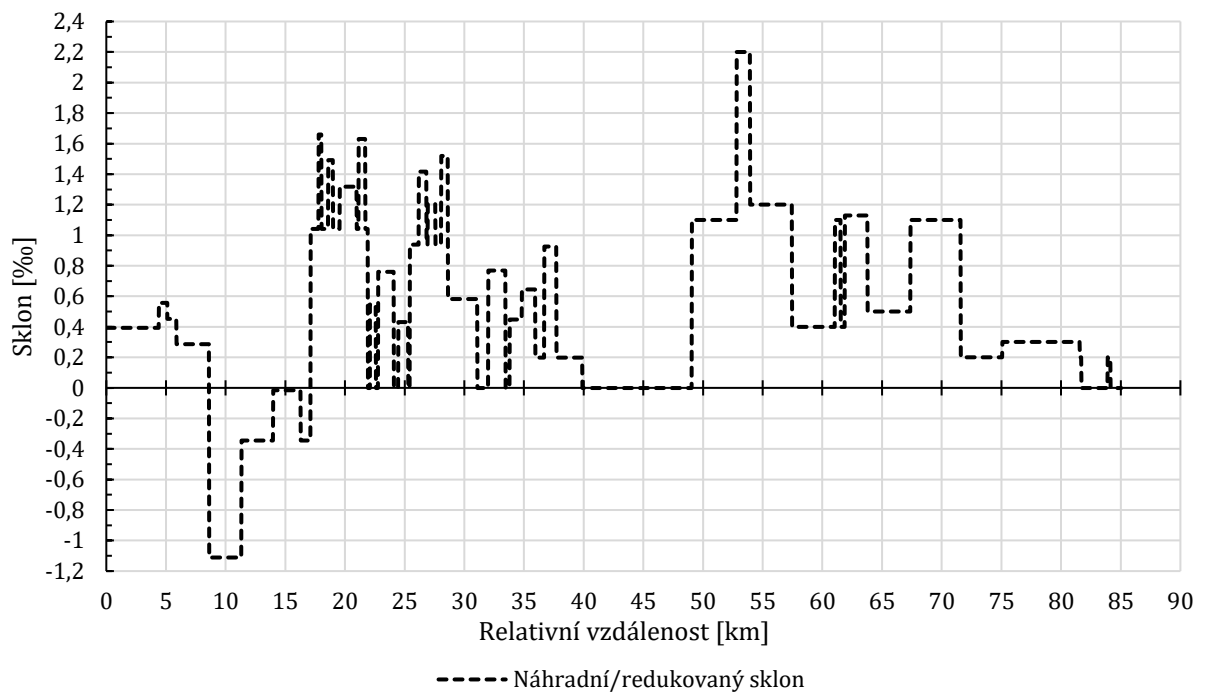
kde  $R$  [m] je poloměr oblouku.

Vysvětlení náhradního a redukovaného sklonu je uvedeno v [13], kde je také interpretován způsob užití při numerickém výpočtu jízdy vlaku. Na obr. 6 a obr. 7 je znázorněn průběh redukovaného a náhradního sklonu sledovaného traťového úseku v jednotlivých směrech.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 6 Grafické znázornění průběhu redukovaného a náhradního sklonu ze stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží do stanice Dresden Hbf



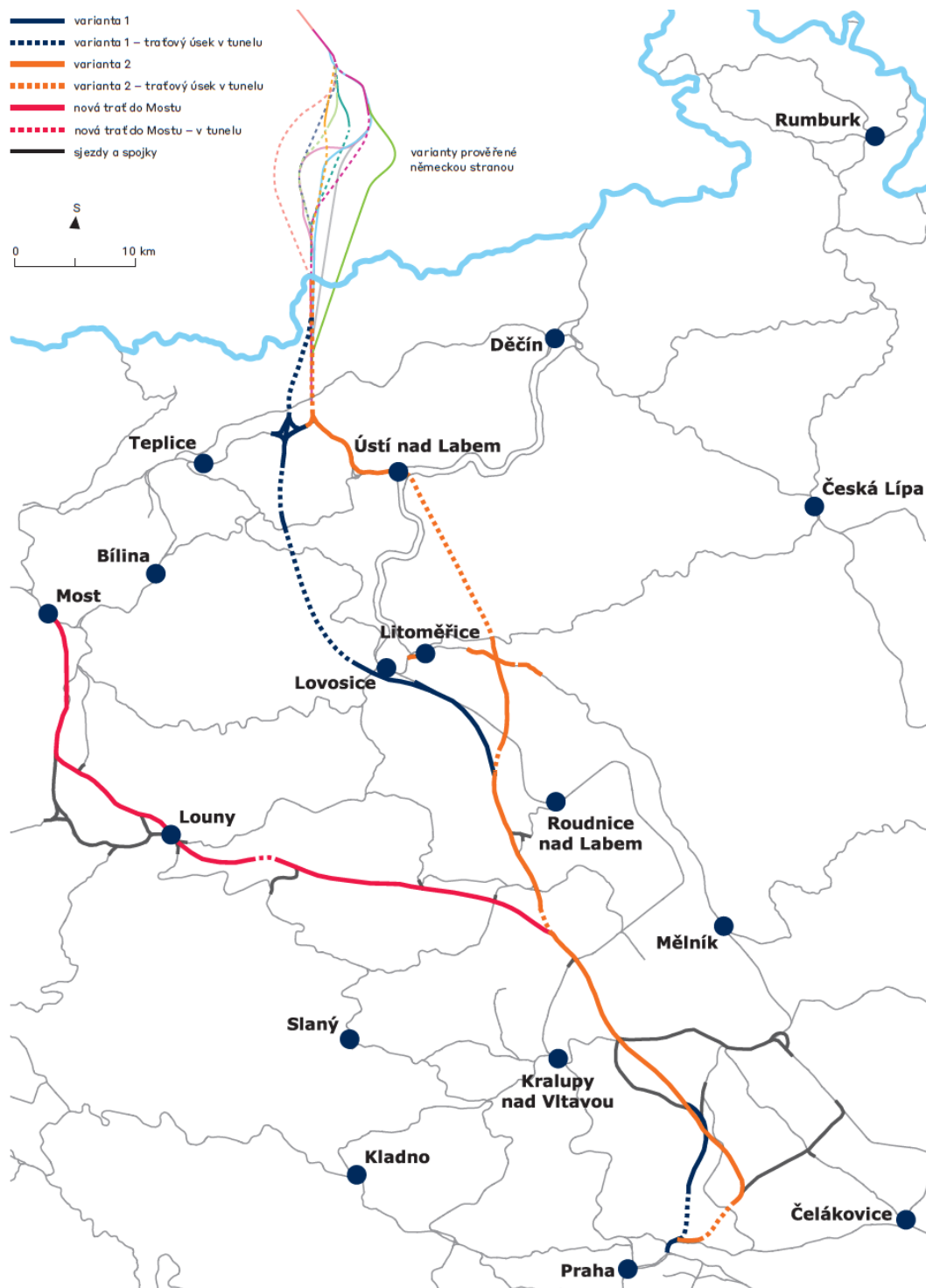
Obr. 7 Grafické znázornění průběhu náhradního a redukovaného sklonu ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží

## 2.2 Nová trať

Sledovaný úsek je součástí přípravy vysokorychlostních tratí v České republice pod označením RS4 spojující Prahu s Drážďany. Stavba celého úseku tratě je rozdělena na tři části. Pro potřeby této práce je nejzajímavější první úsek, který bude v následujících kapitolách více okomentován. Nejprve zde bude stručně představen projekt nového železničního spojení Drážďany – Praha.

## TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ

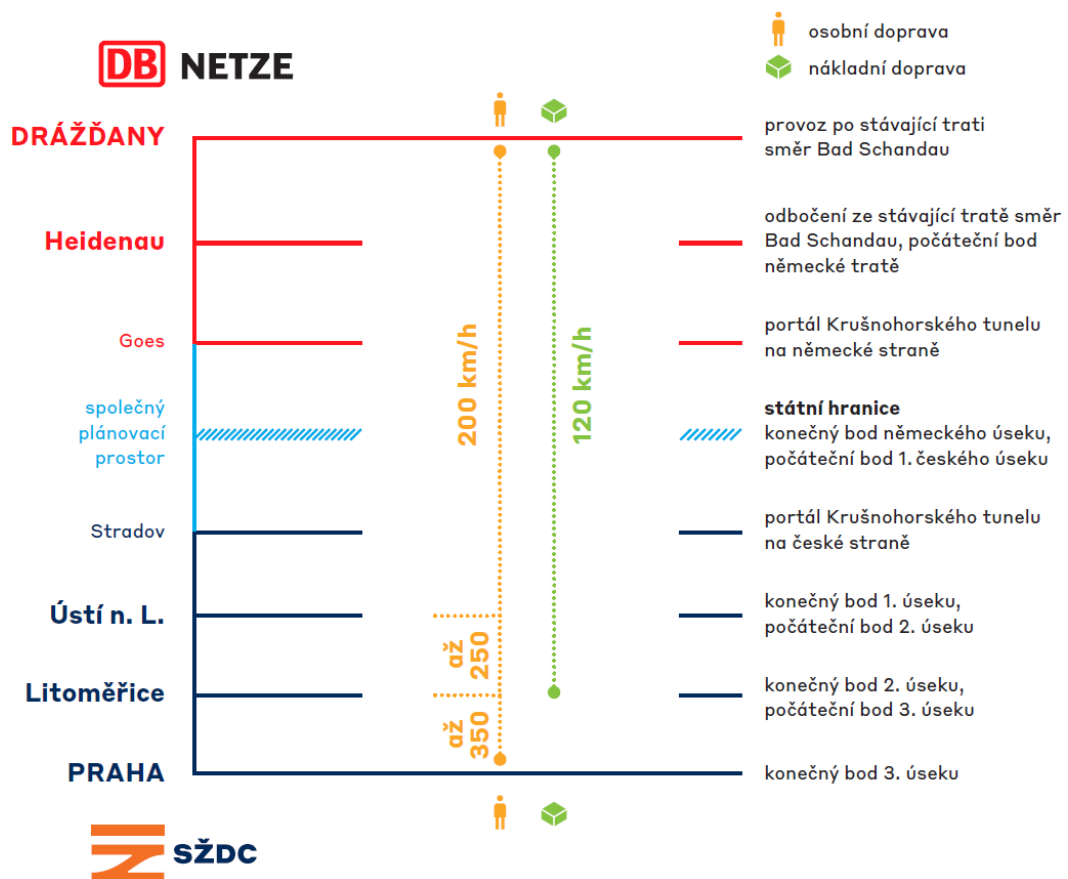
Nová trať bude mít významný přínos ve zkrácení cestovní doby mezi Drážďany a Prahou z 2,5 na 1 hodinu. Bude sloužit ke snížení hlukové zátěže odvedením nákladní dopravy v přeshraničním úseku z údolí Labe. Taktěž dojde ke zvýšení kapacity tratě jak pro osobní, tak nákladní železniční dopravu. Součástí je i připravovaná nová trať do Mostu. Na obr. 8 jsou znázorněny varianty nového železničního spojení. [14]



Obr. 8 Nové železniční spojení Drážďany – Praha, upraveno dle [14]

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Dle informací získaných z interaktivní konference Správy železniční dopravní cesty (v současné době Správy železnic) v Praze o VRT a ETCS konané dne 27. 11. 2019 se již varianta 1 nevažuje z důvodu nulového přínosu pro vnitrostátní osobní dopravu. Pro ekonomickou efektivitu výstavby bylo potřeba zajistit využití veškerých částí tratě. Aktuální přípravy probíhají na variantě 2, která umožní napojit Ústí nad Labem na vysokorychlostní trať. V úseku Ústí nad Labem – Praha má trať vysoký potenciál v osobní dopravě. Dojezdový čas je plánován na 30 minut. Po zprovoznění tratě lze předpokládat, že dojde k nárůstu počtu přepravených cestujících, kteří se nebudou za prací stěhovat, nýbrž využijí vysokorychlostní vlaky. Obyvatelům se tím rozšíří pracovní možnosti. To zároveň nepovede k odlivu občanů z regionů, ale pomůže k rozvoji odlehlých částí České republiky. Při zvoleném dojezdovém čase 30 minut vznikne z Prahy a Ústí nad Labem pocitově jedno velké město. Pro okolní města v Ústí nad Labem bude též VRT velkým přínosem. Cestující již nebudou muset řešit individuální dopravu do hlavního města. U terminálu v Ústí nad Labem zaparkují automobil či využijí jiné hromadné dopravní prostředky a dále budou pokračovat vysokorychlostní železnicí. U přeshraničního úseku Drážďany – Ústí nad Labem se počítá především s nákladní dopravou. Potenciál osobní dopravy je nižší. Úsek je proto projektován pro kombinovanou osobní a nákladní dopravu s rychlostí do 200 km/h. Obr. 9 ukazuje významné body na trati, plánované maximální traťové rychlosti a možnosti využití úseků pro osobní a nákladní dopravu.



Obr. 9 Charakteristika stavby VRT Drážďany – Praha, upraveno dle [14]

## **TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

---

Parametry projektované tratě jsou zejména založeny na předpisech společnosti DB Netz AG. Základními charakteristikami této navrhované tratě se smíšeným provozem jsou:

- maximální rychlost 200/230 km/h pro osobní a 120 km/h pro nákladní dopravu;
- minimální osová vzdálenost kolejí 4,5 m při maximálních rychlostech;
- maximální podélný sklon trasy 10 ‰;
- minimální poloměr oblouku 1 630 m při rychlosti 200 km/h pro osobní dopravu s přípustným nedostatkem převýšení 130 mm;
- minimální podélný sklon v tunelu 3 ‰, podle českých předpisů 4 ‰.

Tunel je navrhován v podobě dvou jednokolejných tunelů s pevnou jízdni dráhou. Předjízdne stanice jsou projektovány na německé straně bezprostředně před tunelem, na české straně v Ústí nad Labem. Z důvodu plánovaného odklonu většiny nákladních vlaků s celkovou hmotností až 2 200 tun a délky až 740 metrů do tunelu jsou předjízdne stanice sklonově uspořádány maximálně do 2,5 ‰. Úseky předcházející předjízdne stanicím jsou projektovány maximálně do 7 ‰ pro zastavení před návěstí zakazující jízdu, a zejména následnému rozjezdu vlaku do stoupání po změně návěstí na návěst dovolující jízdu. [15]

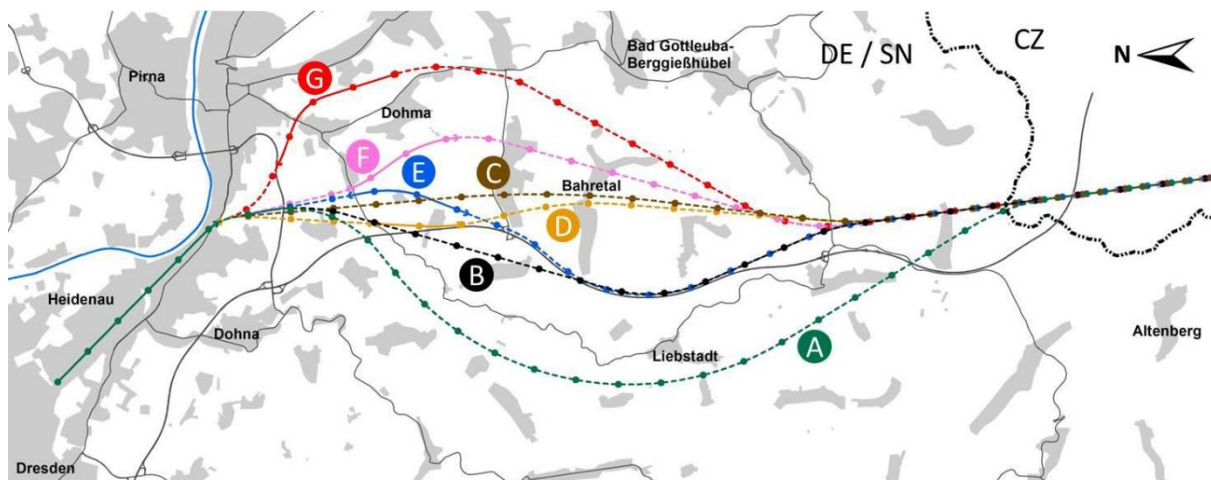
### **2.2.1 Drážďany – Ústí nad Labem**

Jedná se novostavbu trati v úseku Heidenau – Ústí nad Labem v délce cca 43 km. Úsek Drážďany – Heidenau bude modernizován. Navrhovaná rychlost pro osobní dopravu je až 200 km/h a pro nákladní dopravu až 120 km/h. Součástí tohoto úseku bude Krušnohorský tunel dlouhý cca 25 km. Na české straně bude portál tunelu ústit u obce Stradov, kde je navržena odbočka do stávající trati směrem do Teplic. Trať bude zabezpečena jednotným evropským vlakovým zabezpečovacím zařízením ETCS. [14]

Na německé straně se již začaly hledat varianty spojení do Čech od roku 2004. V roce 2008 vznikly první možné varianty trasy, které byly nadále připomínkovány. Na základě studie proveditelnosti bylo rozhodnuto stavět trať se smíšeným provozem pro efektivnější využití úseku. Pro docílení maximálního podélného sklonu 12,5 ‰ bylo rozhodnuto razit tunel v oblasti Krušných hor. V roce 2012 byl projekt aktualizován a byly upřesněny trasy vzhledem ke geologickým a hydrologickým podmínkám. Též byly poskytnuty odhadované investiční náklady. Rok 2015 byl dalším velkým milníkem. Byla provedena analýza trati s ohledem na geologii, hydrologii, technologii výstavby tunelů, protipožární ochranu, ochranu před katastrofami a vyhodnocení environmentálních aspektů. Též byl zpracován plán železničního provozu. V rámci studie proveditelnosti bylo omezeno maximální podélné stoupání na hodnotu menší než 10 ‰, aby se zvýšila výkonnost nové tratě pro nákladní dopravu a zajistila se srovnatelnost všech možných variant. Rok 2018 posunul plánování o krok dále. Do plánování byly přidány nové varianty

## TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ

a současně byly začleněny trasy navrhované občanským sdružením *Basistunnel nach Prag*. Aktuální varianty jsou na obr. 10. Trasy A-C jsou vedené jedním bázovým tunelem, D-G jsou částečně otevřené v terénu před bázovým tunelem. [15]



Obr. 10 Přehled možných variant na německém území, rok 2019, upraveno dle [15]

Pro výpočet byla vybrána varianta G, která zahrnuje kratší tunel a přeshraniční bázový tunel. Za stanicí Heidenau trasa vstupuje do přibližně 2 km dlouhého tunelu Heidenau a podchází historickou oblast Großsedlitz. Dále trať překonává údolí Seidewitzu v Pirna-Zehista mostem a pokračuje na terénu k předjízdne stanici Goes před bázovým tunelem. Délka předjízdne stanice je plánována v délce 1 km. Trasa nadále vede pod zemí východně od Gersdorfu a Breitenau k hraničnímu přechodu v oblasti Petrovic a ústí u obce Chlumec konkrétně v městské části Stradov. Celková délka trasy G je 55,0 km s délkou bázového tunelu 26,8 km. Nouzové zastavení je plánováno v záchranném tunelu na vrcholu trasy jihovýchodně od Börnersdorfu. Varianta G byla vybrána pro výpočet, protože se jedná o trasu s kratším bázovým tunelem a již dřívější studie tuto trasu blíže zpracovávaly. [15]

Prostřednictvím odkazu [16] je možné blíže zhlédnout vedení nové vysokorychlostní tratě ve výsledku studie z roku 2015 spojující Drážďany a Prahu, momentálně označované jako varianta G.

### 2.2.2 Ústí nad Labem – Litoměřice – Praha

Navazující úsek Ústí nad Labem – Litoměřice je novostavbou vysokorychlostní tratě v délce přibližně 20 kilometrů. Významnou stavbou tohoto úseku je realizace podzemní železniční stanice Ústí nad Labem centrum, která je situována do blízkosti dnešní železniční stanice Ústí nad Labem západ. Dále trať pokračuje Litoměřickým tunelem o délce cca 18 kilometrů a ústí poblíž města Litoměřice. Zde je navrhováno propojení s železniční tratí vedoucí z Kolína do Děčína po pravém břehu Labe přes Nymburk, Mělník a Ústí nad Labem-Střekov. Úsek nové trati je plánován



**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

pro smíšený provoz vlaků s maximální rychlostí pro osobní vlaky až 250 km/h a pro nákladní vlaky až 120 km/h. Na rozdíl od přechozího úseku se zde počítá s vyšším využitím tratě pro osobní dopravu. Úsek Litoměřice – Praha je též novostavbou trati v délce cca 60 kilometrů. Počítá pouze s provozováním vysokorychlostních vlaků osobní dopravy. Navrhovaná maximální rychlost je až 350 km/h. Zapojení tratě do železničního uzlu Praha není blíže specifikováno. Závisí však na přepravní poptávce a dalším rozvoji železniční infrastruktury v okolí hlavního města Prahy. V celé trase se počítá s využitím vlakového zabezpečovacího zařízení ETCS. [14]

**2.2.3 Parametry sledovaného úseku trati**

Sledovaný úsek začíná v traťovém kilometru 1,098 na nádraží Ústí nad Labem západ a dále pokračuje ve stávající stopě trati směrem na Teplice. V traťovém kilometru 9,34 opouští trať stávající těleso a napojuje se do novostavby vysokorychlostní trati (dále jen „NBS“) v uvažované variantě G v kilometru 35,07. Portál tunelu na české straně se nachází v kilometru 33,62 NBS. Tunel protíná státní hranici v kilometru 22,16 NBS a ústí v kilometru 7,09 NBS na německém území. Předjízdna stanice Goes je situována mezi kilometrem 6,74 a 5,71 NBS. Tunel Heidenau začíná v kilometru 3,30 NBS a končí v kilometru 1,35 NBS. Trať se napojuje na stávající trať (traťový kilometr 49,97) v Heidenau v -0,87 kilometru NBS. Do stanice Dresden Hbf pokračuje ve stávající stopě beze změn. Zdroj [15] uvažuje několik variant zapojení nové vysokorychlostní tratě v Heidenau na stávající infrastrukturu. Pro výpočet je uvažováno přímé zapojení tratě do stávající v kilometru uvedeném výše bez omezení rychlosti. Celková délka uvažovaného úseku je 56,78 km. Pro jízdu do Drážďan je při výpočtu rozhodující 2. traťová kolej, pro jízdu do Ústí nad Labem 1. traťová kolej. V následující tab. 4 a tab. 5 jsou zobrazeny významné body tratě vzhledem k relativní vzdálenosti pro snadnější orientaci v následujících grafech.

Tab. 4 Relativní vzdálenost významných bodů sledovaného úseku nové trati ve směru do Drážďan

směr Ústí nad Labem – Drážďany	
významný bod	relativní vzdálenost [km]
Ústí nad Labem západ	0,00
začátek NBS	8,29
vjezdový portál bazového tunelu	9,75
státní hranice	21,22
vrchol tunelu	23,43
výjezdový portál bazového tunelu	36,30
Goes	37,13
vjezdový portál tunelu Heidenau	40,04
výjezdový portál tunelu Heidenau	42,04
nápojení na stávající trať (konec NBS)	44,25
Heidenau	45,47
Dresden Hbf	56,78

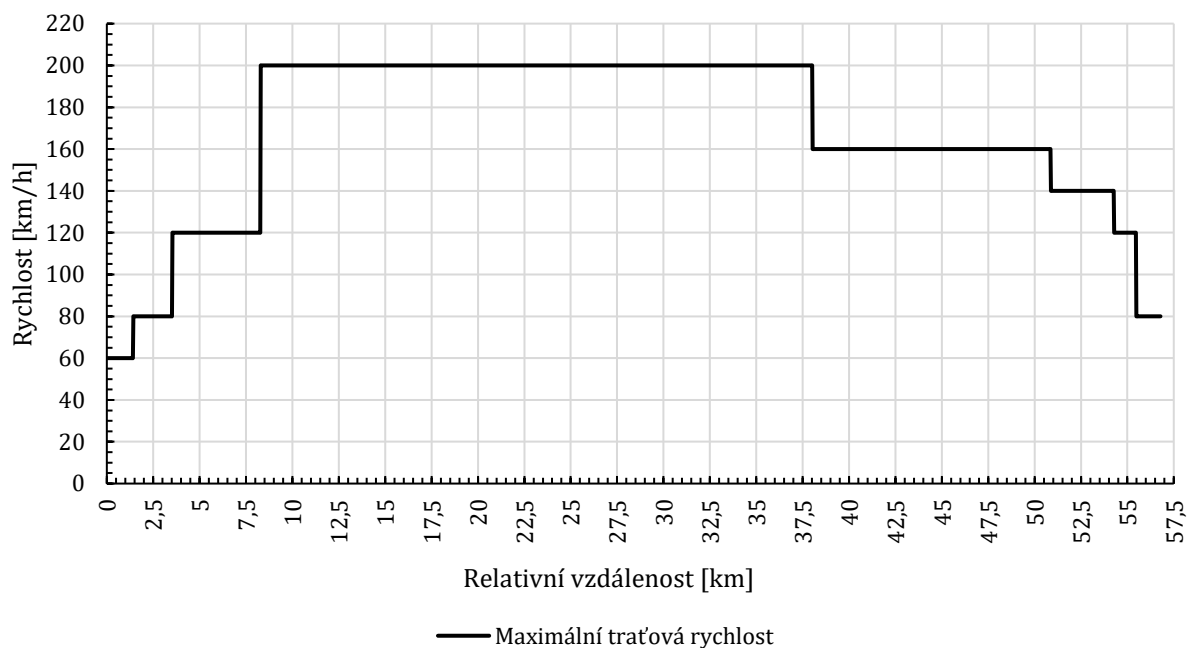
**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Tab. 5 Relativní vzdálenost významných bodů sledovaného úseku nové trati ve směru do Ústí nad Labem

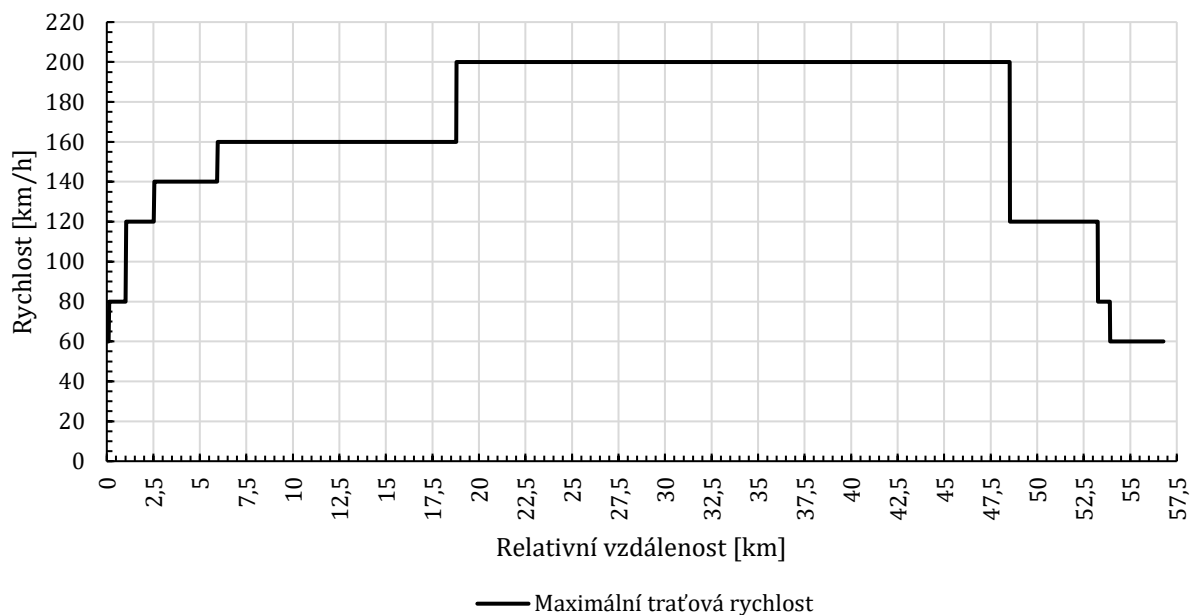
směr Drážďany – Ústí nad Labem	
významný bod	relativní vzdálenost [km]
Dresden Hbf	0,00
Heidenau	11,34
začátek NBS	12,56
vjezdový portál tunelu Heidenau	14,77
výjezdový portál tunelu Heidenau	16,77
Goes	19,66
vjezdový portál bazového tunelu	20,51
vrchol tunelu	33,38
státní hranice	35,59
výjezdový portál bazového tunelu	40,06
napojení na stávající trať (konec NBS)	48,54
Ústí nad Labem západ	56,78

**2.2.3.1 Traťová rychlost**

Na české straně jsou traťové rychlosti odečteny z TTP Správy železnic 504A, změna číslo: 54, účinnost od: 15. 12. 2019. Maximální rychlost 200 km/h je zvolena od začátku NBS ve směru do Drážďan až po relativní kilometr 38,01; kde následující oblouk o poloměru 1202,25 m nedovoluje průjezd vlaků touto rychlostí. Pro potřeby této práce je od tohoto kilometru uvažována maximální rychlost 160 km/h, která odpovídá aktuální maximální rychlosti v místech napojení nové tratě na stávající, a dále do Drážďan je uvažován stávající rychlostní profil tratě. Na obr. 11 a obr. 12 jsou znázorněny průběhy maximální traťové rychlosti v obou směrech.



Obr. 11 Grafické znázornění průběhu maximální traťové rychlosti nové trati ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

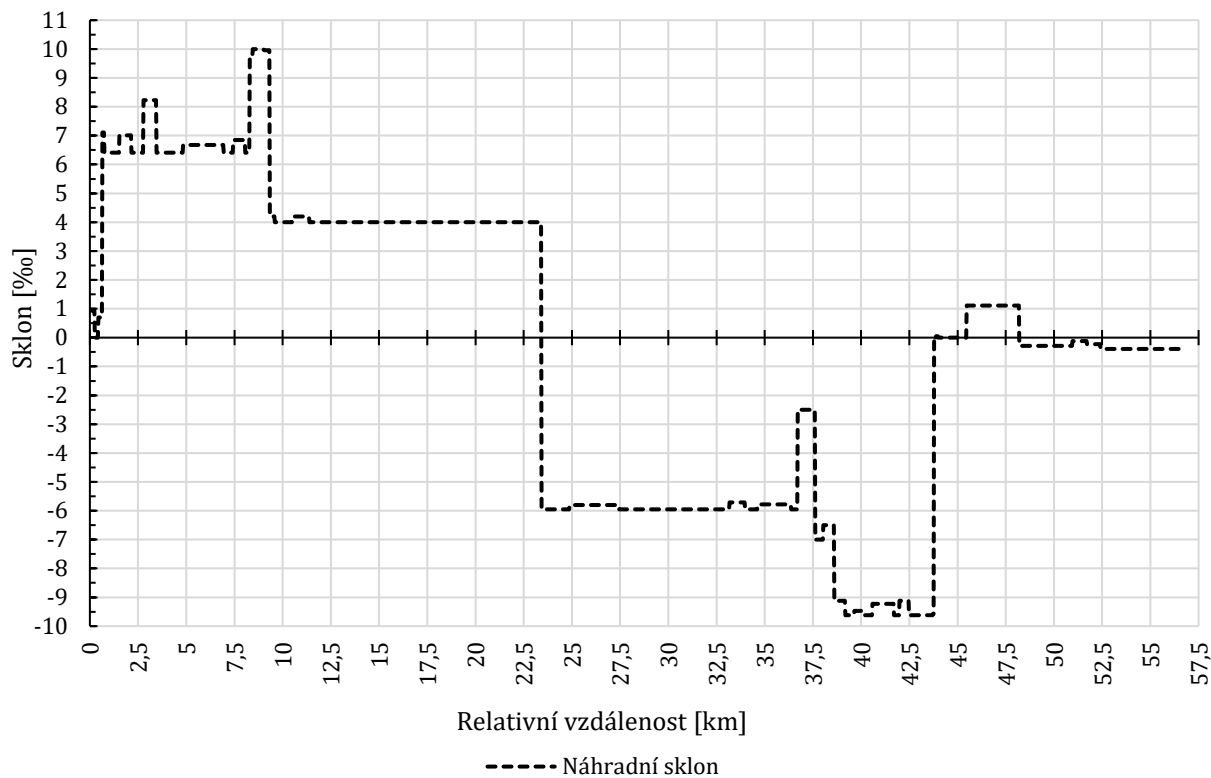
Obr. 12 Grafické znázornění průběhu maximální traťové rychlosti nové trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem západ

**2.2.3.2 Náhradní sklon**

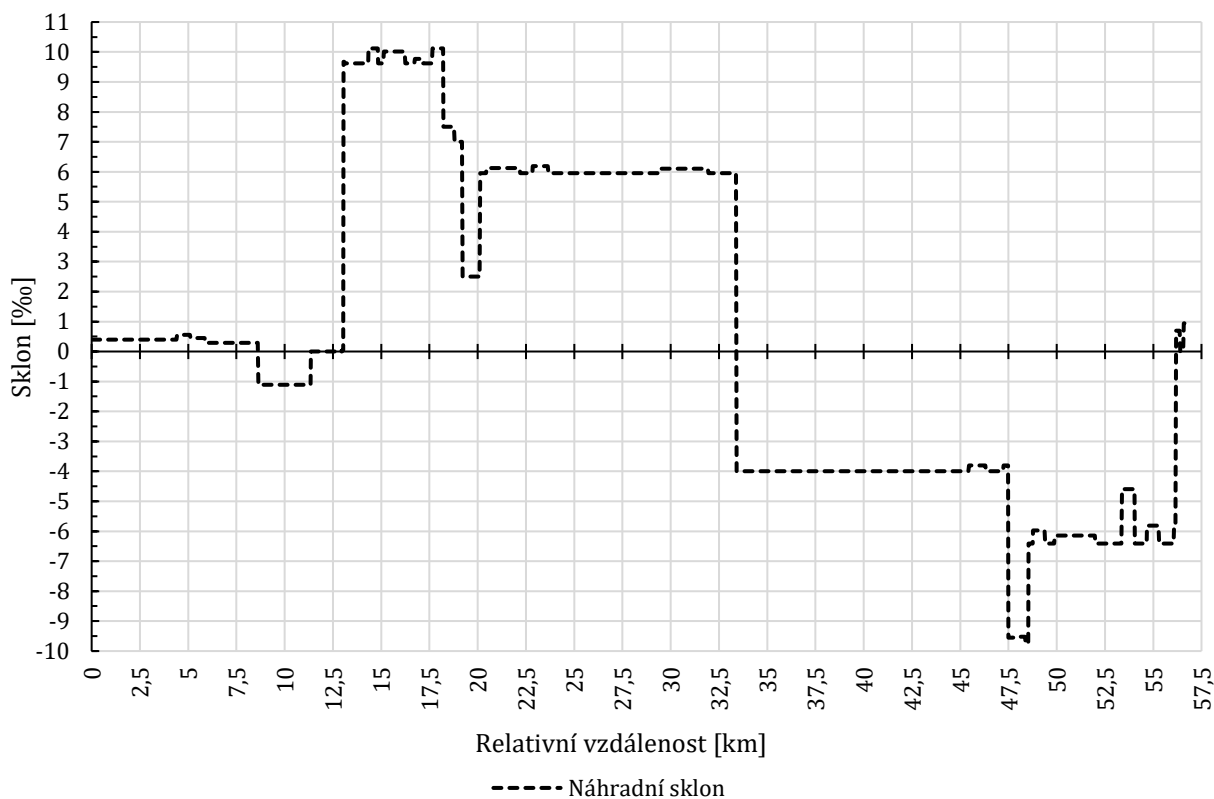
Stanovení náhradního sklonu na českém území proběhlo podobně jako v bodě 2.1.4.2 za pomoci programu Google Earth Pro. Do relativního kilometru 0,62 se uvažuje nulový sklon v nadmořské výšce 143 metrů nad mořem. V relativním kilometru 8,29; kde trať přechází na NBS, je nadmořská výška 192 metrů nad mořem. Pro výpočet je uvažován průměrným sklon 6,4094 ‰ do tohoto kilometru. Dále jsou použity údaje z výkresu varianty G [15] a na německé straně v úseku Heidenau – Dresden je využit shodný popis tratě jako v řešení stávající tratě.

Obr. 13 a obr. 14 neuvažuje vliv tunelu z důvodu různých přístupů k výpočtu odporu z tunelu. Znázorněn je pouze náhradní sklon tratě bez tunelu, avšak sklonové poměry a poloměry oblouků jsou uvažovány dle odečtených hodnot z Google Earth Pro a dle výkresové dokumentace nové trati ve variantě G. V kapitole 3 je zpracována rešerše metod zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku. Konkrétní výpočty a výsledné porovnání přístupu jednotlivých metod zohledňující tunel v trakčních výpočtech jsou zpracovány a výsledky znázorněny v následujících kapitolách.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 13 Grafické znázornění průběhu náhradního sklonu nové trati (bez uvažování tunelu) ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf



Obr. 14 Grafické znázornění průběhu náhradního sklonu nové trati (bez uvažování tunelu) ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem západ

## **3 Jízdní odpory**

Úkolem této práce je také zpracování rešerše metod zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku používaných v trakčních výpočtech. Pro pochopení jednotlivých informací je třeba se nejprve seznámit s jednotlivými druhy jízdních odporů, které brání v jízdě vlaku a nejsou úmyslně vyvolány. Rozbor jízdních odporů je zpracován v literatuře [13]. Do této práce je alespoň zařazen přehled jednotlivých odporů. Jestliže se konkrétní jízdní odpor výrazně projevuje na jízdním odporu vlaku při jízdě tunelem, je dále rozvinut.

### **3.1 Vozidlové odpory**

Konkrétně jsou uvažovány:

- odpor z valení;
- odpor v ložiskách;
- odpor z neklidné jízdy;
- odpor prostředí;
- odpor nedokonale odlehlých brzdových zdrží;
- odpor nabíjecího generátoru;
- výběhový odpor hnacího vozidla.

Je však potřeba zmínit, že jednotlivé vozidlo při pohybu nemusí vykazovat všechny uvedené vozidlové odpory. Toto záleží na technickém stavu a konstrukci kolejového vozidla. [13]

#### **3.1.1 Odpor prostředí**

Odpor prostředí charakterizuje všechny síly, které způsobí sám plyn nebo sama kapalina proti pohybu tělesa v daném látkovém prostředí. Při kontaktu tělesa s prostředím vzniká tření, které se projevuje jako již zmíněný odpor prostředí. Ten je charakterizován silami, které se nazývají odporové síly. Pohyb tělesa a plynu nebo kapaliny je třeba brát jako pohyb relativní. Těleso buď vykonává pohyb v nehnutém plynu nebo kapalině, anebo je těleso v klidu a kolem něj proudí plyn nebo kapalina. Druhá možnost definuje pojem obtékání tělesa. Významnou veličinou charakterizující pohyb mezi tělesem a plynem nebo kapalinou je relativní rychlost. Výsledný smysl relativního pohybu je důležitý z hlediska určování smyslu odporové síly, která vždy působí proti smyslu pohybu. Tzn. těleso, které vykonává pohyb v nehnutém plynu nebo kapalině je zpomalováno, a naopak těleso, které je v klidu a kolem něj proudí plyn nebo kapalina, je urychlováno. [17]

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Z hlediska jízdy kolejového vozidla jde o odpor vzduchu označovaný jako aerodynamický odpor  $O_{vzd}$  [N]. Velikost odporové síly prostředí lze stanovit pomocí vztahu (2):

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2, \quad (2)$$

kde:

- $C_x$  [-] je tvarový součinitel odporu vzduchu;
- $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je měrná hmotnost (hustota) prostředí;
- $S$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha příčného průřezu vozidla;
- $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je relativní rychlost vozidla vůči proudícímu vzduchu.

Dle literatury [13] je dále zpracován rozbor jednotlivých veličin vyskytujících se ve vztahu (2).

Hodnota **tvarového součinitele odporu vzduchu**  $C_x$  popisuje tvar vlakové soupravy z hlediska obtékání proudícím vzduchem. Na konkrétní hodnotě se projevuje řešení tvaru čela lokomotivy, jednotlivých komponent na střeše, sběračů elektrického proudu, provedení mezivozových přechodů, spodku vozidel, podvozků a brzdových kotoučů. Též je třeba zmínit, že hodnota tvarového součinitele odporu vzduchu u vybraných vozů vzrůstá s naložením vozů – např. plošinové vozy, klesá s naložením – např. nekryté vysokostěnné vozy (v prázdném prostoru vozu vznikají vzdušné víry a zvyšují  $C_x$ ) a nemění se v závislosti na naložení – např. kotlové a kontejnerové vozy). U osobních vlaků je vcelku logické, že tvarově přizpůsobené jednotky pro vysoké rychlosti budou mít při jízdě nižší aerodynamický odpor než lokomotiva a několik běžných vozů. Při jízdě vlaku tunelem vzniká pístový efekt (rychlost proudění vzduchu mezi vozidlem a tunelem je podstatně vyšší), který se projevuje vyšší hodnotou tvarového součinitele odporu vzduchu. Tento jev charakterizuje tzv. **tunelový faktor**  $\tau$  ( $C_{x,tun} = \tau \cdot C_x$ ).

Hodnota **hustoty prostředí** závisí na teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu.

Velikost **plochy příčného průřezu vozidla** obvykle souvisí s obrysem pro vozidlo, který zpravidla vyjadřuje horní mez této plochy. Z hlediska aerodynamického odporu umožňuje železniční doprava přepravovat velké množství nákladu nebo osob za jedinou čelní plochou. Toto nejlépe splňují vysokorychlostní jednotky. Avšak u nákladní dopravy může docházet vlivem řazení jednotlivých vozů k vytvoření několika čel v soupravě. Typickým příkladem jsou kontejnerové vlaky, kdy několik vozů je ložených kontejnery, poté jsou řazeny prázdné vozy, a nakonec opět ložené (vzniknou zde dvě čela). Podobným způsobem je možné vytvořit na jediné soupravě vlaku i několik čel, které se podepíší na zvýšeném aerodynamickém odporu.

Jak již bylo řečeno výše, **rychlost** uvedená ve vzorci (2) je rychlostí relativní. Je třeba porovnat rychlost jízdy vozidla s rychlostí a smyslem proudění větru. Ze vzorce též vyplývá, že aerodynamický odpor roste s druhou mocninou rychlosti. To se projeví na zvýšené spotřebě energie především u vlaků pohybujících se vyššími rychlostmi.

Měrný aerodynamický odpor vyjádřený vztahem (3) je udáván jako podíl absolutní hodnoty odporu vzduchu (aerodynamického odporu)  $O_{vzd}$  v [N] a tíhy vlaku  $G$  v [kN].

$$o_{vzd} = \frac{O_{vzd}}{G} = \frac{1}{2 \cdot G} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (3)$$

### 3.1.2 Vozidlové odpory ve výpočtech

Pro výrazné zjednodušení trakčních výpočtů se využívá Davisův vztah (4), který v sobě zahrnuje jednotlivé složky vozidlového odporu. Pro konkrétní vozidla jsou koeficienty A, B a C zjištěny experimentálně pomocí výběhové zkoušky. Literatura [13] blíže uvádí popis stanovení hodnot jednotlivých koeficientů.

$$O_v = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (4)$$

Význam jednotlivých členů ve vzorci (4) je následující:

- $V$  [km/h] je rychlost;
- $A$  [N] je koeficient vozidlového odporu zahrnující odpor z valení, pasivní odpory v ložiskách a nedokonale odlehle brzdové zdrže (nezávislý na rychlosti);
- $B$  [ $\text{N} \cdot \text{h} \cdot \text{km}^{-1}$ ] je složka vozidlového odporu lineárně závislá na rychlosti představující vliv neklidné jízdy;
- $C$  [ $\text{N} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ ] zahrnuje aerodynamickou složku vozidlového odporu.

Pro užití ve výpočtech se však používá měrný vozidlový odpor  $o_v$  (5), který udává absolutní hodnotu vozidlového odporu  $O_v$  v [N] vztaženou na jednotku tíhy vlaku  $G$  v [kN].

$$o_v = \frac{O_v}{G} = \frac{O_v}{M \cdot g} = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (5)$$

Jednotlivé členy ve vzorci (5) jsou následující:

- $G$  [kN] – tíha vlaku (vozidla);
- $M$  [t] – hmotnost vlaku (vozidla);
- $g$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] – tíhové zrychlení;
- $a$  [ $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$ ] – měrné vyjádření koeficientu A;
- $b$  [ $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1} \cdot \text{h} \cdot \text{km}^{-1}$ ] – měrné vyjádření koeficientu B;
- $c$  [ $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ ] – měrné vyjádření koeficientu C.

## TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ

---

Předpis SŽDC (dříve Č(S)D) V7 „Trakční výpočty“ [18] zařazuje vozy do jednotlivých kategorií, ke kterým uvádí vzorce měrného vozidlového odporu. Pro příklad jsou uvedeny vzorce (6) a (7), se kterými je dále pracováno:

- nákladní vlaky – T4 (čtyřnápravové nákladní vozy, ložené):

$$o_v = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2; \quad (6)$$

- osobní vlaky – R (rychlíkové vozy s podvozky GP 200 s CZE):

$$o_v = 1,8 + 0,0005 \cdot V + 0,00023 \cdot V^2. \quad (7)$$

### 3.2 Traťové odpory

Konkrétní trasování tratě v krajině přímo ovlivňuje hodnotu traťových odporů. Při požadavku na výpočet odporů je proto třeba znát profil traťového úseku. Jako traťové odpory se udávají:

- odpor ze sklonu koleje;
- odpor z jízdy obloukem;
- odpor z jízdy tunelem.

#### 3.2.1 Odpor z jízdy tunelem dle předpisu SŽDC V7

Tato metoda, která je stále platná a v praxi se využívá, je dána předpisem SŽDC (dříve Č(S)D) V7 „Trakční výpočty“ [18]. V současné době ji však můžeme považovat za zastaralou, jelikož nereflektuje aktuální požadavky na zvyšování rychlostí na železnici a výstavbu nových dlouhých tunelů s vyššími maximálními rychlostmi, než tomu bylo v minulosti. Daný předpis udává hodnotu měrného odporu z jízdy tunelem:

- $o_{tun} = 2 \text{ N/kN}$  pro jednokolejný tunel;
- $o_{tun} = 1 \text{ N/kN}$  pro dvoukolejný tunel.

Jak je vidět, předpis nezohledňuje rychlost průjezdu vlaku tunelem a stanovuje pouze navýšení měrného traťového odporu o konstantní hodnotu podle typu tunelu. Předpis tak nebere v úvahu fyzikální hledisko aerodynamického odporu měnícího se v závislosti na rychlosti.

#### 3.2.2 Odpor z jízdy tunelem zavedením „tunelového faktoru $\tau$ “

Metoda stanovení odporu z jízdy tunelem zavedením tunelového faktoru  $\tau$  více odpovídá fyzikální podstatě dějů při průjezdu vlaku tunelem. Konkrétně dochází ke změně hodnoty tvarového součinitele odporu vzduchu  $C_x$ . Bezrozměrný tunelový faktor charakterizuje změnu aerodynamického odporu vlaku při průjezdu tunelem oproti situaci v otevřené krajině. Na základě



výše uvedeného hlediska nelze brát odpor z jízdy tunelem zavedením tunelového faktoru pouze jako odpor traťový, ale spíše vozidlový. Uvedený vztah (8) ukazuje zavedení tunelového faktoru do Davisova vztahu (4) pro vozidlový odpor:

$$O_v = A + B \cdot V + \tau \cdot C \cdot V^2. \quad (8)$$

Konkrétní hodnota závisí na poměru plochy průřezu vlaku k ploše průřezu tunelu a také na délce tunelu. Hodnota tunelového faktoru je střední hodnotou z nestacionárních dějů – šíření tlakových vln. Též je ovlivňována dalšími vlaky v tunelu a jejich rychlostmi. V železničních podmínkách se udává kolem hodnoty 2, pro tunely metra nabývá hodnoty vyšší. [13]

Metoda výpočtu odporu z jízdy tunelem zavedením tunelového faktoru je dále rozebírána v příspěvku [19] s ohledem na návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků.

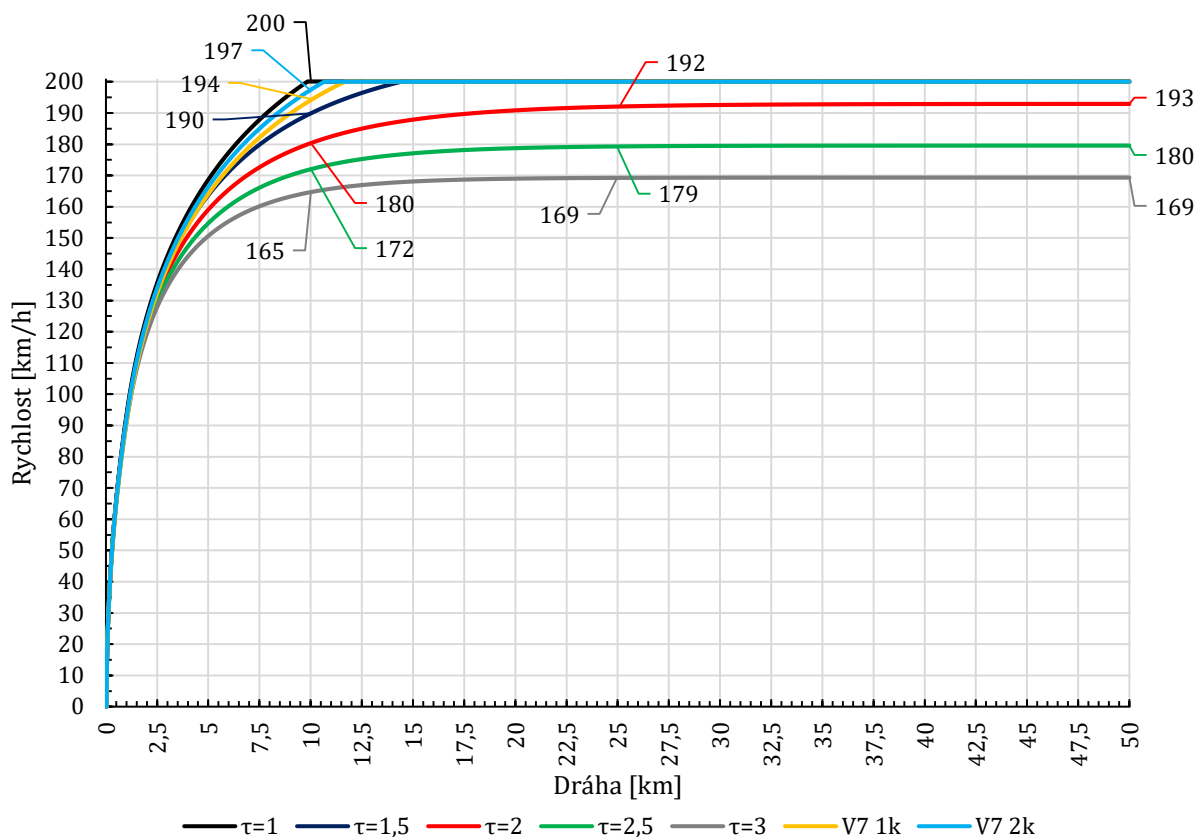
### 3.2.3 Srovnání přístupu obou metod

Nově stavěné tunely pro vyšší rychlosti jsou výrazně prostornější, avšak předpis SŽDC (dříve Č(S)D) V7 „Trakční výpočty“ [18] nezohledňuje prostorovost tunelu, ale hodnotí tunel pouze z hlediska počtu kolejí. Toto může vést k výpočtům jízdních odporů, které jsou vzdálené reálné situaci. Vyšetřování jízdních odporů pomocí tunelového faktoru závisí především na konkrétní zvolené hodnotě. Následující příklad demonstruje rozdíl v přístupu obou metod.

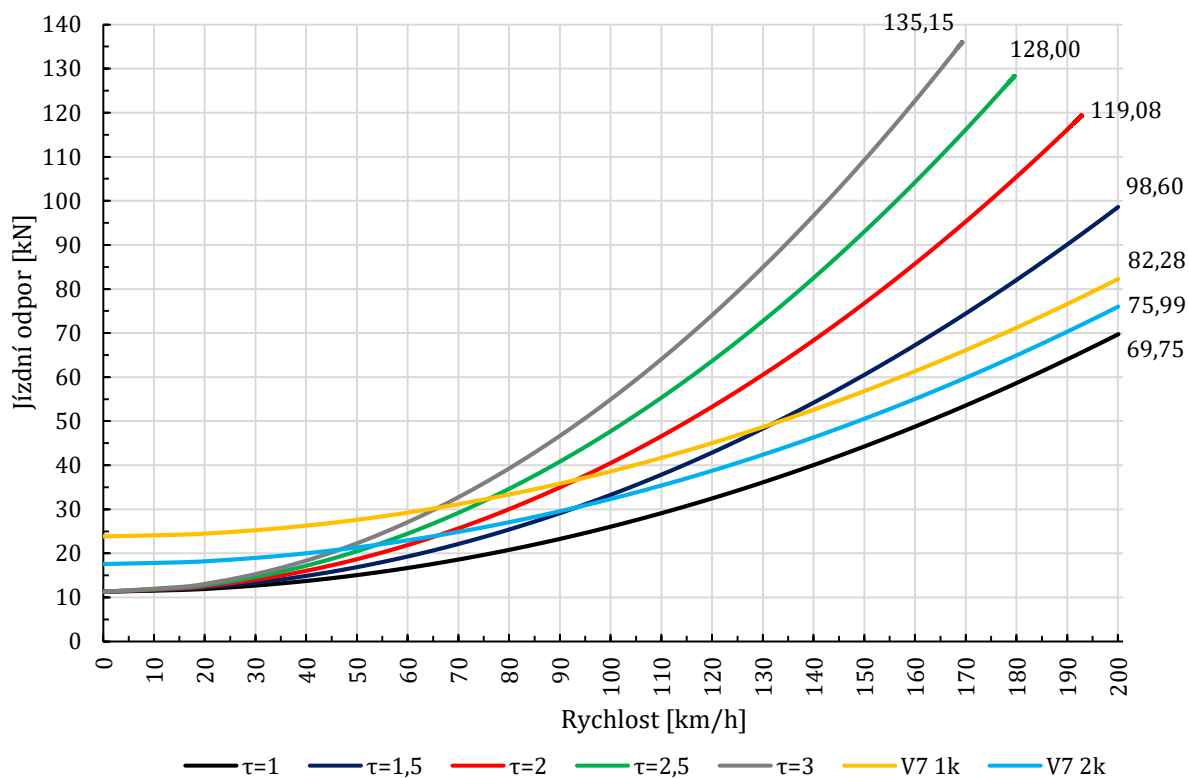
Pro srovnání byl zvolen vlak ve složení lokomotiva ř. 383 Vectron + 10 osobních vozů s maximální konstrukční rychlostí 200 km/h. Celková hmotnost vlaku je 640 tun. Vlak má kapacitu při 100% obsazenosti (kromě jídelního vozu) 580 sedících cestujících. Dále je uvažován měrný vozidlový odpor pro osobní vlaky ve variantě uvedené vzorcem (7) pro celý vlak včetně hnacího vozidla. Maximální výkon lokomotivy je 6 400 kW, hmotnost činí 89 tun a součinitel rotačních hmot je uvažován 0,1 pro hnací vozidlo a 0,04 pro osobní vozy. Modelová situace je řešena na teoretické rovině 0 ‰, dále pak na sklonu +/-4 ‰. Tato hodnota byla zvolena s odkazem na [15], kde se uvádí jako minimální hodnota sklonu v tunelu dle českých předpisů, a též je navržena i v jednotlivých výkresech NBS. Vlaková souprava se nachází v tunelu a rozjíždí se ze zastavení. Ve srovnání jsou ukázány rozdíly dle kapitoly 3.2.1 (V7 1k – jednokolejný tunel, V7 2k – dvoukolejný tunel) a 3.2.2, přičemž hodnota tunelového faktoru  $\tau$  byla zvolena 1 (otevřená krajina); 1,5; 2; 2,5 a 3. Vzorec (7) pro měrný vozidlový odpor je při zavedení tunelového faktoru upraven do tvaru (9):

$$o_v = 1,8 + 0,0005 \cdot V + \tau \cdot 0,00023 \cdot V^2. \quad (9)$$

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

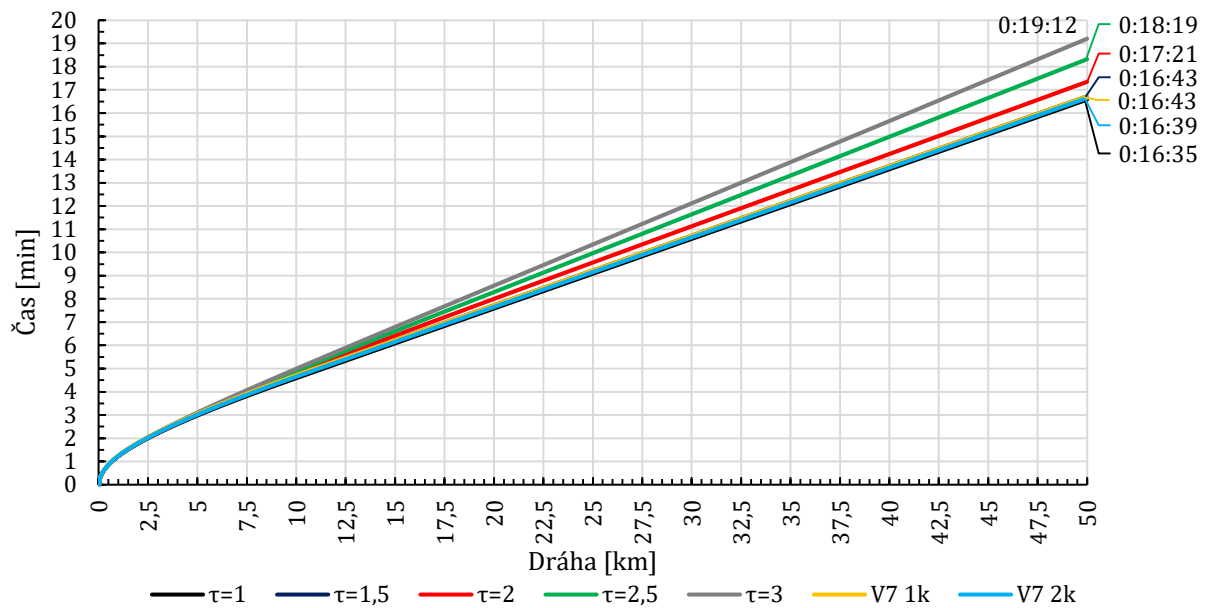


Obr. 15 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na maximální dosaženou rychlost na ujeté dráze při teoretické rovině 0 ‰

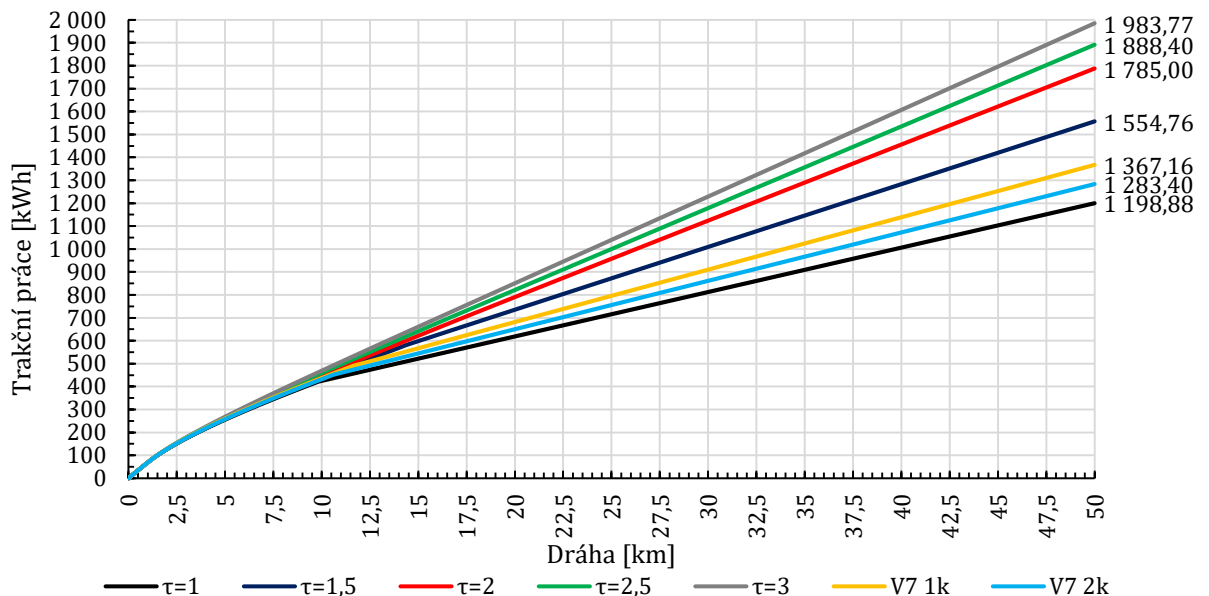


Obr. 16 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na jízdní odpory při dané rychlosti na teoretické rovině 0 ‰

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



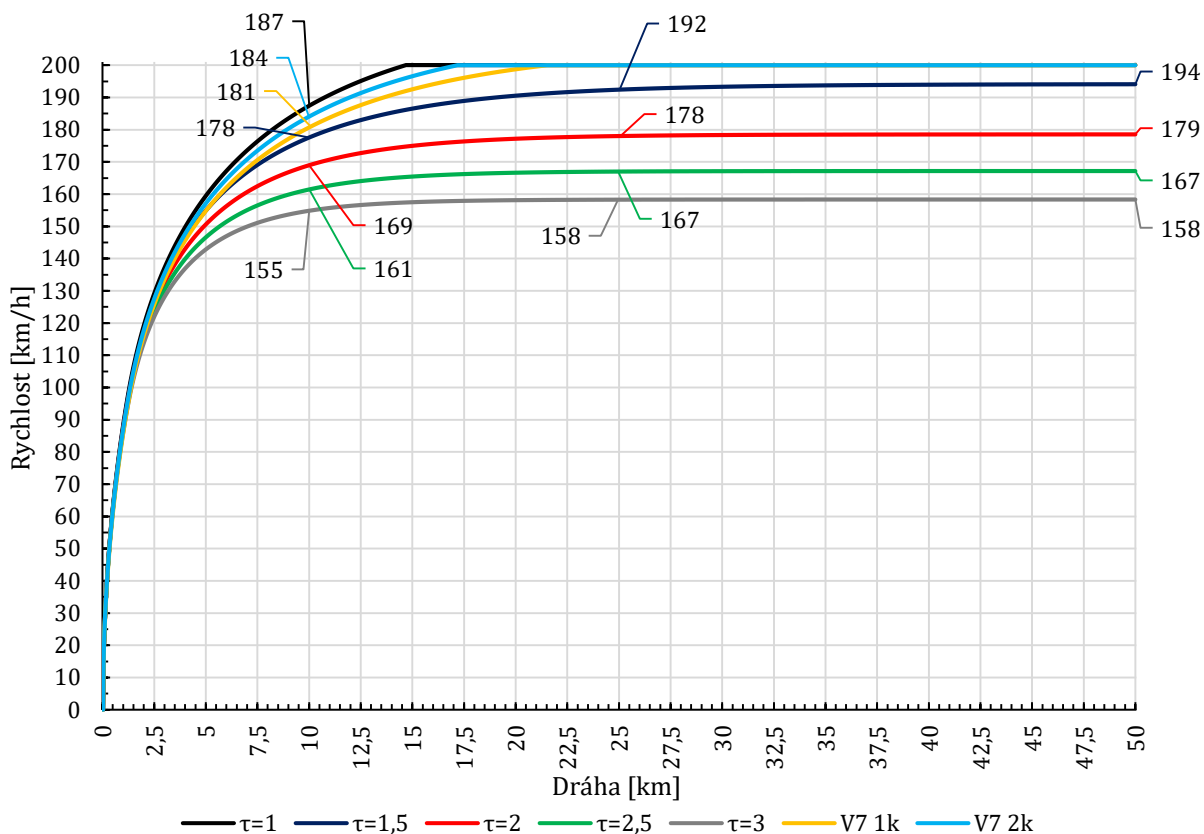
Obr. 17 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na dojezdový čas při ujeté dráze na teoretické rovině 0 ‰



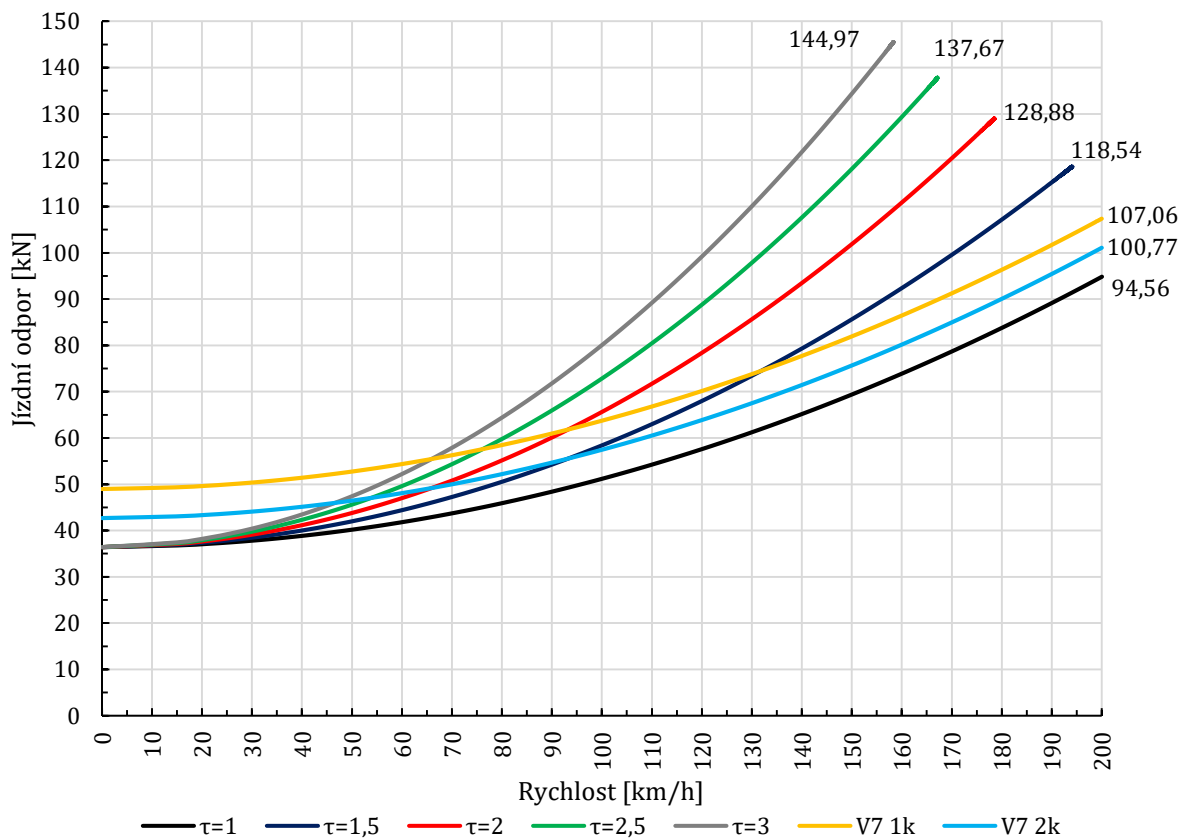
Obr. 18 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na trakční práci na ujeté dráze při teoretické rovině 0 ‰

Obr. 15 ukazuje maximální rychlost, kterou je schopný vlak dosáhnout v případě různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu. Odečteny jsou hodnoty po ujetí dráhy 10 km a 25 km. Obr. 16 zobrazuje hodnotu jízdního odporu při takové rychlosti. V případě požadavku na vyšší rychlost v tunelu u hodnoty tunelového faktoru 2; 2,5 a 3 je třeba zajistit vyšší výkon vlakové soupravy, protože daný výkon lokomotivy 6 400 kW na dosažení vyšší rychlosti nepostačuje. Jako dostatečně dlouhá délka tunelu byla zvolena hodnota 50 km, na které je ukázáno, že se vlak ustálí na určité rychlosti, kterou už výkonově nepřekročí, či dosáhne maximální dovolené rychlosti. Na obr. 17 je vykreslen dojezdový čas na této dráze. Z hlediska ekonomiky provozu je též významný rozdíl v energetické náročnosti, což pro jednotlivé metody zohlednění tunelu dokládají příslušné hodnoty trakční práce na ujeté dráze v grafu na obr. 18.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

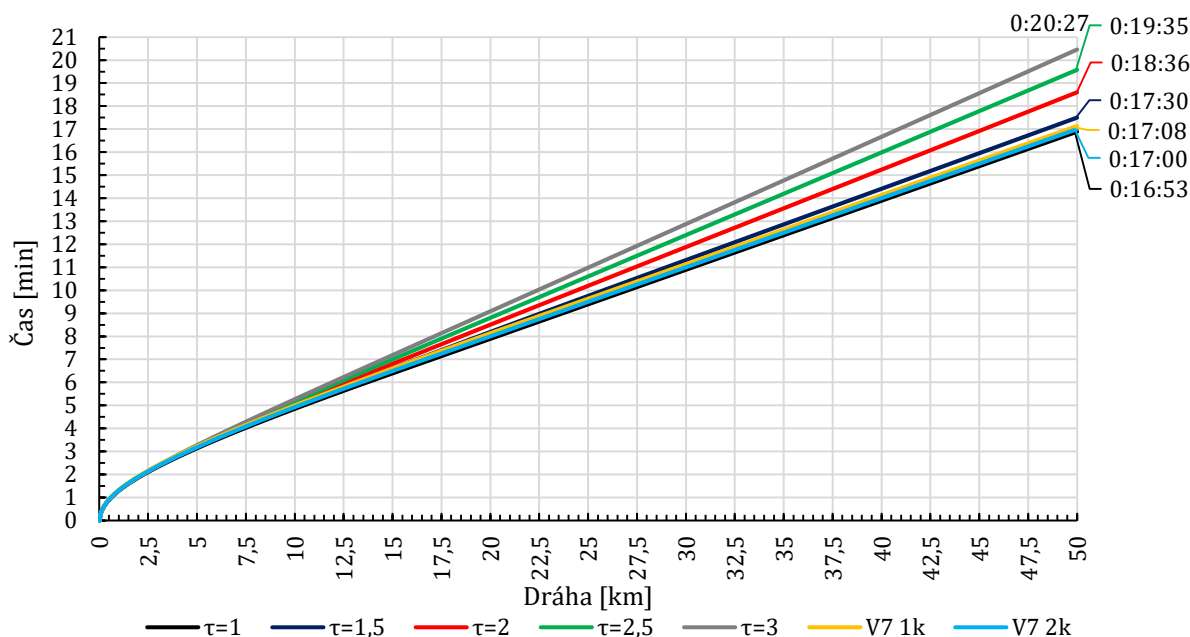


Obr. 19 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na maximální dosaženou rychlost na ujeté dráze ve stoupání 4 ‰

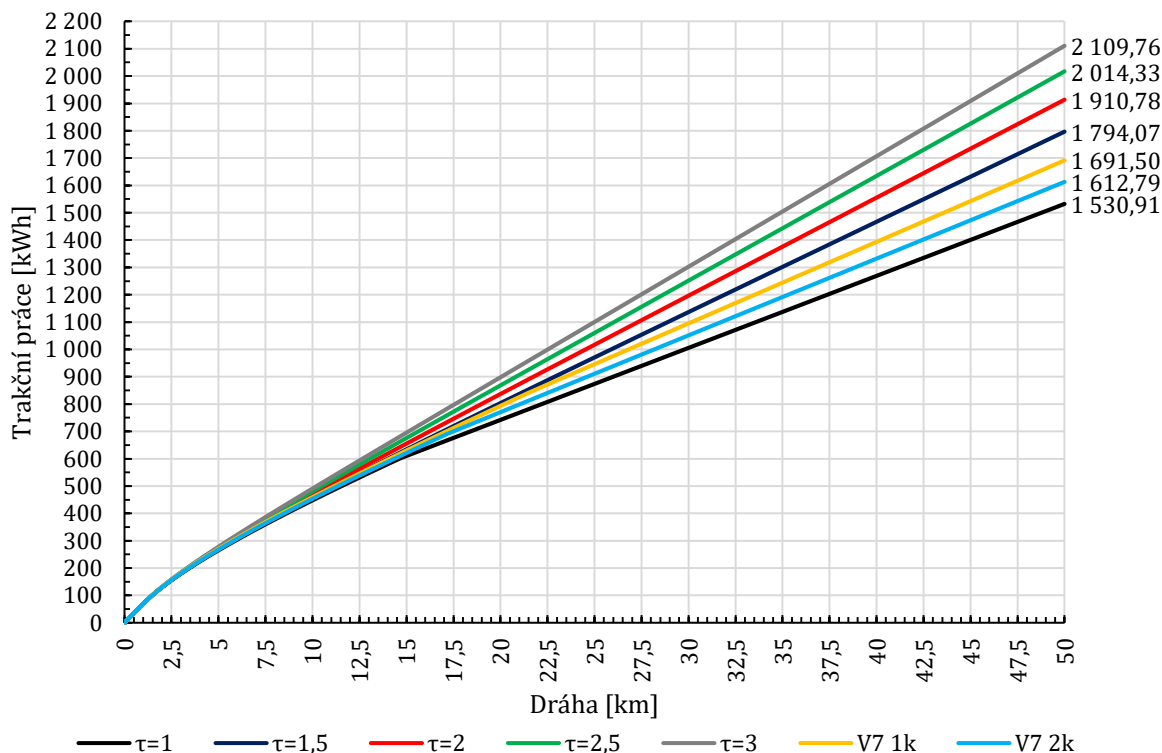


Obr. 20 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na jízdní odpory při dané rychlosti ve stoupání 4 ‰

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



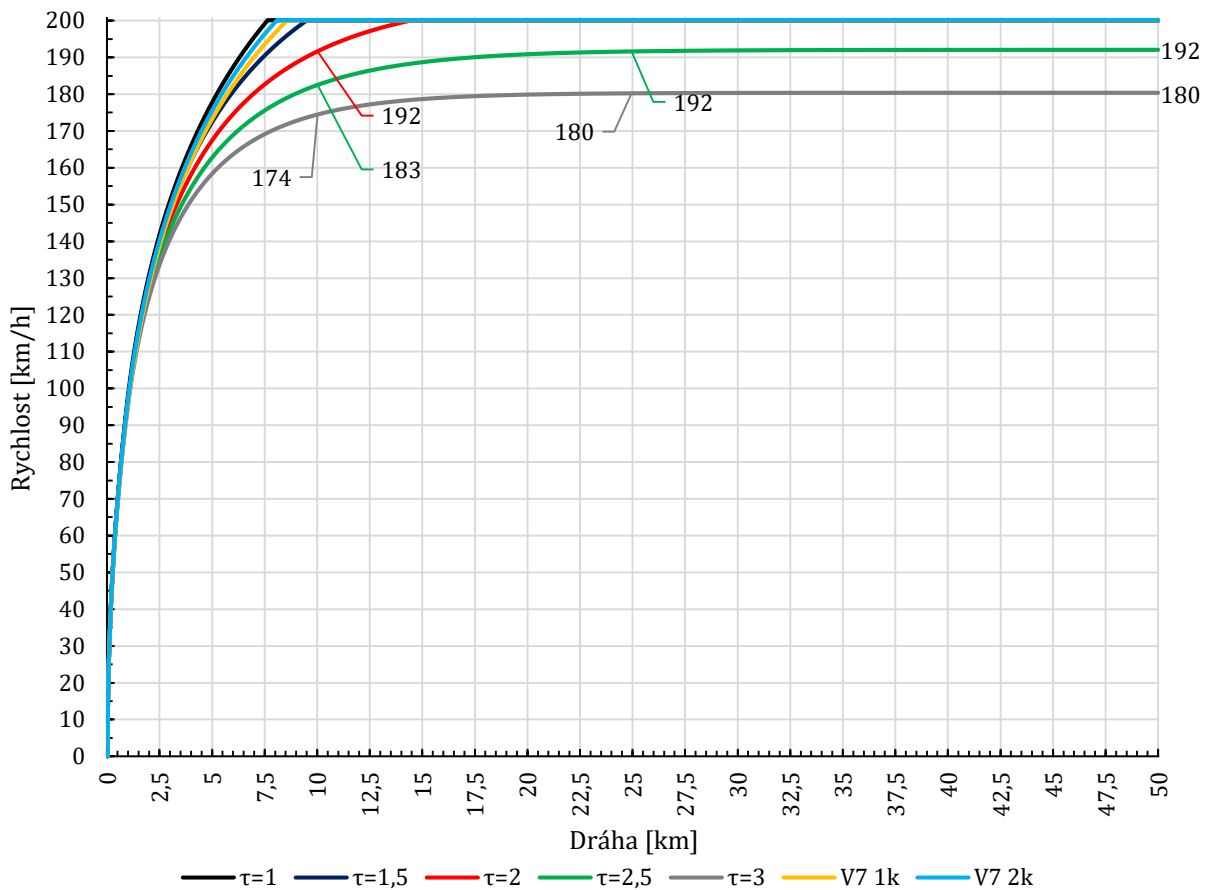
Obr. 21 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na dojezdový čas při ujeté dráze ve stoupání 4 ‰



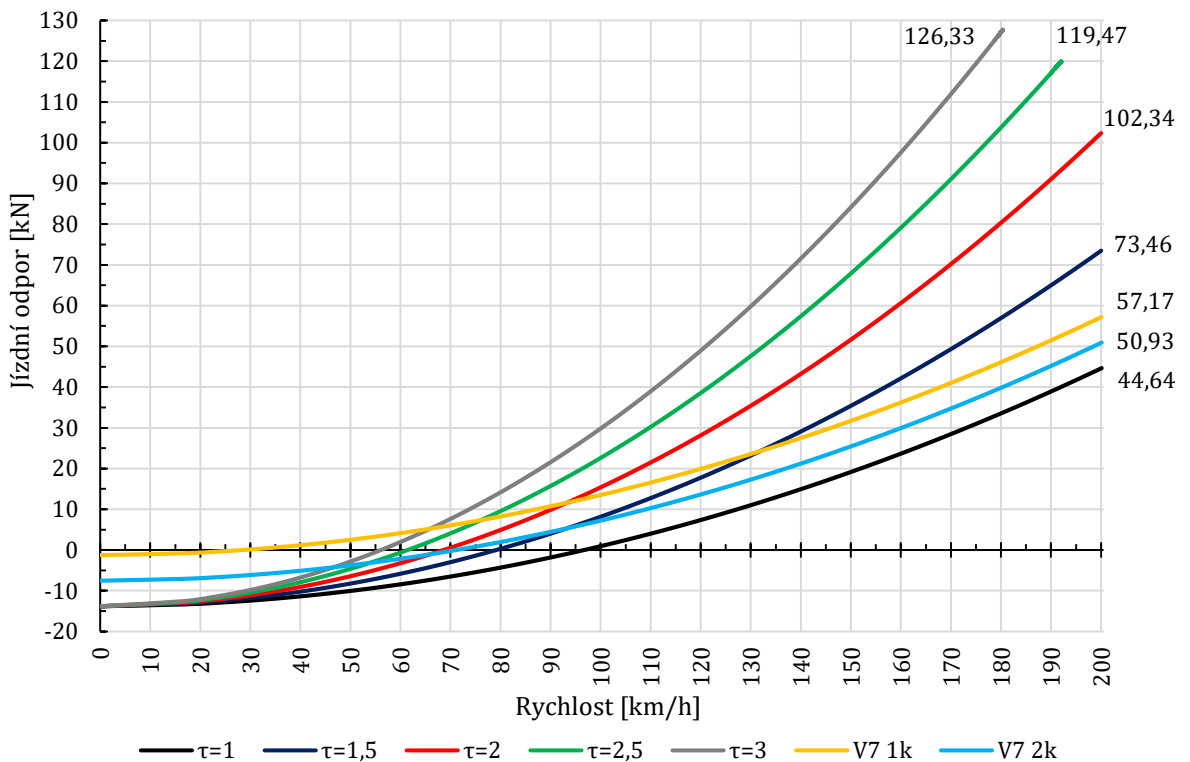
Obr. 22 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na trakční práci na ujeté dráze ve stoupání 4 ‰

Při uvažování tunelu ve stoupání trati se sklonem 4 ‰ je vidět na obr. 19, že vlak dosáhne maximální dovolené rychlosti pouze dle předpisu SŽDC V7 [18]. Při využití metody zavedením tunelového faktoru již vlak při daném výkonu maximální dovolené rychlosti nedosáhne. Stoupání se projeví ve zvýšeném jízdním odporu (obr. 20), v delším dojezdovém čase (obr. 21) a i též vyšší trakční práci (obr. 22).

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

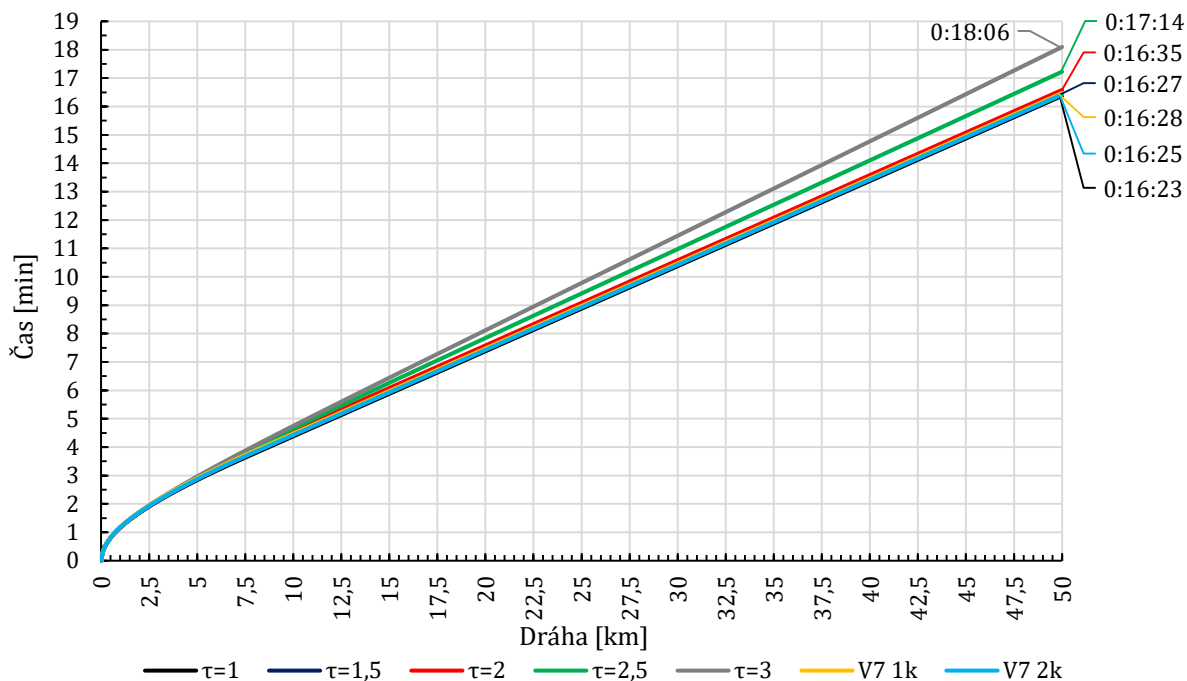


Obr. 23 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na maximální dosaženou rychlost na ujeté dráze v klesání 4 ‰

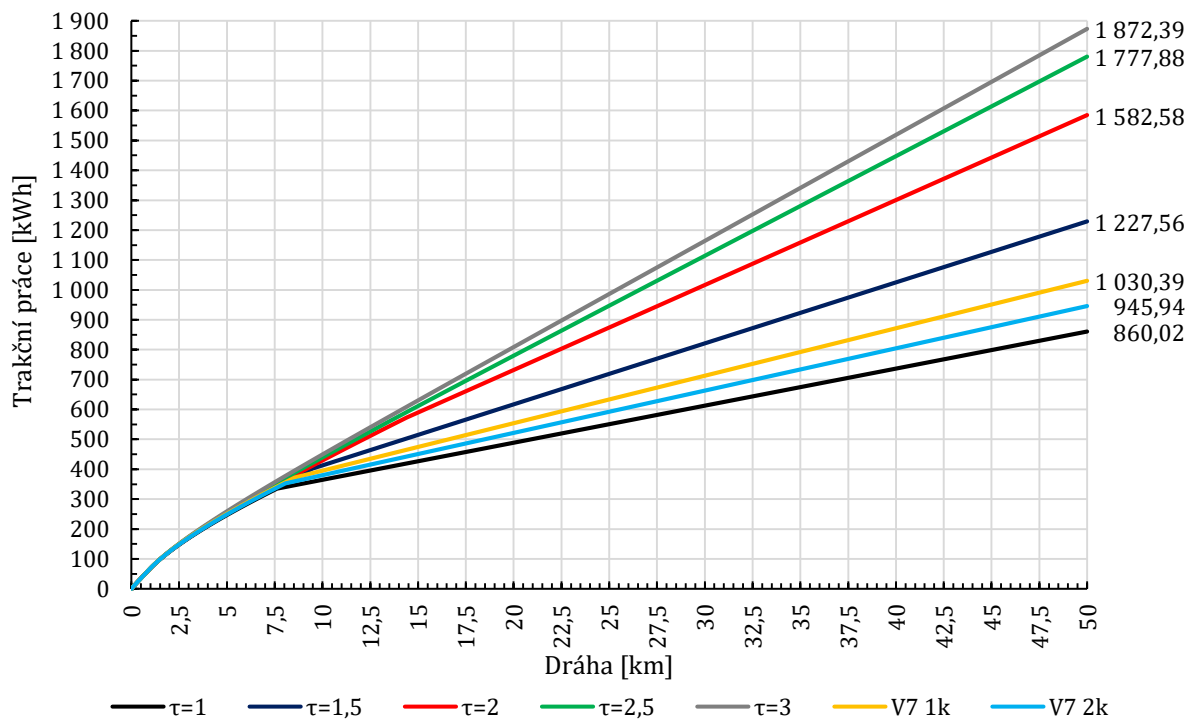


Obr. 24 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na jízdní odpory při dané rychlosti v klesání 4 ‰

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 25 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na dojezdový čas při ujeté dráze v klesání 4 ‰



Obr. 26 Porovnání různých přístupů k výpočtu vlivu tunelu na trakční práci na ujeté dráze v klesání 4 ‰

Při rozjezdu vlaku v klesání 4 ‰ nabývá jízdní odpor záporné hodnoty (obr. 24), čímž vlak dosáhne vyšší rychlosti na kratší vzdálenosti (obr. 23). Maximální dovolené rychlosti vlak nedosáhne pouze při uvažování tunelového faktoru 2,5 a 3. Kromě těchto dvou hodnot můžeme říci, že dojezdový čas na dráze 50 km je přibližně srovnatelný (obr. 25). Výrazně se však liší trakční práce (obr. 26).

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

V následující tab. 6 je srovnání jednotlivých hodnot pro teoretickou rovinu a sklon  $\pm 4$  ‰. Jak je vidět, tak nejpříznivější tunel je žádný tunel. Nejnepříznivější variantou je stoupání trati v tunelu. Při vyšší uvažované hodnotě tunelového faktoru se zvyšuje hodnota jízdního odporu, což se projeví ve vyšší spotřebě energie a delšímu dojezdovému času. Dráha potřebná pro zrychlení vlaku z rychlosti 160 km/h na rychlost 200 km/h je v možných případech delší než samotný rozjezd vlaku na rychlost 160 km/h.

Tab. 6 Srovnání jednotlivých výsledků při různém přístupu k zohlednění vlivu tunelu na jízdu vlaku

Sledovaná veličina	Jednotka sledované veličiny	Sklon ‰	Otevřená krajina $\tau = 1$	Tunel					
				SŽDC V7		tunelový faktor			
				2kolejný	1kolejný	$\tau = 1,5$	$\tau = 2$	$\tau = 2,5$	$\tau = 3$
Rychlost po 10 km	km/h	0	200	197	194	190	180	172	165
		+4	187	184	181	178	169	161	155
		-4	200	200	200	200	192	183	174
Rychlost po 25 km	km/h	0	200	200	200	200	192	179	169
		+4	200	200	200	192	178	167	158
		-4	200	200	200	200	200	192	180
Rychlost po 50 km	km/h	0	200	200	200	200	193	180	169
		+4	200	200	200	194	179	167	158
		-4	200	200	200	200	200	192	180
Jízdní odpor při maximální (ustálené) rychlosti	kN	0	69,75	75,99	82,28	98,60	119,08	128,00	135,15
		+4	94,56	100,77	107,06	118,54	128,88	137,67	144,97
		-4	44,64	50,93	57,17	73,46	102,34	119,47	126,33
Potřebný čas k ujetí dráhy 50 km	h:min:s	0	0:16:35	0:16:39	0:16:43	0:16:43	0:17:21	0:18:19	0:19:12
		+4	0:16:53	0:17:00	0:17:08	0:17:30	0:18:36	0:19:35	0:20:27
		-4	0:16:23	0:16:25	0:16:28	0:16:27	0:16:35	0:17:14	0:18:06
Trakční práce na dráze 50 km	kWh	0	1 198,88	1 283,40	1 367,16	1 554,76	1 785,00	1 888,40	1 983,77
		+4	1 530,91	1 612,79	1 691,50	1 794,07	1 910,78	2 014,33	2 109,76
		-4	860,02	945,94	1 030,39	1 227,39	1 582,58	1 777,88	1 872,39
Trakční práce při maximální (ustálené) rychlosti na 1 km	kWh/km	0	19,64	21,41	23,17	27,77	33,64	36,13	38,32
		+4	26,71	28,48	30,24	33,44	36,35	38,82	40,99
		-4	12,58	14,35	16,10	20,69	28,83	33,78	35,98
Trakční práce při max. (ustálené) rychlosti na 1000 tkm	kWh / 1000 tkm	0	30,69	33,45	36,20	43,39	52,56	56,45	59,88
		+4	41,73	44,50	47,25	52,25	56,80	60,66	64,05
		-4	19,66	22,42	25,16	32,33	45,05	52,78	56,22
Trakční práce při max. (ust.) rychl. na 100 oskm (100% obsazení)	kWh / 100 oskm	0	3,386	3,691	3,995	4,788	5,800	6,229	6,607
		+4	4,605	4,910	5,214	5,766	6,267	6,693	7,067
		-4	2,169	2,474	2,776	3,567	4,971	5,824	6,203
Dráha potřebná pro rozjezd na 160 km/h	km	0	4,21	4,39	4,60	4,63	5,20	6,03	7,62
		+4	5,12	5,40	5,74	5,82	6,94	9,36	$\infty$
		-4	3,58	3,71	3,87	3,87	4,21	4,68	5,35
Dráha potřebná pro rozjezd na 200 km/h	km	0	9,85	10,66	11,67	14,43	$\infty$	$\infty$	$\infty$
		+4	14,69	17,18	21,53	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
		-4	7,64	8,09	8,58	9,49	14,43	$\infty$	$\infty$



## 4 Modelování jízd vlaků na staré a na nové trati

Pro modelování jízd vlaků na staré a na nové trati byl vybrán tabulkový procesor Microsoft Excel z kancelářského balíku Microsoft Office. Dále byla využita literatura [13], která poskytla informace k následujícím záležitostem. K řešení jednotlivých výpočtů bylo přistoupeno pomocí zjednodušeného modelu, který využívá zjednodušující předpoklady:

- pohyb vozidla (vlaku) je pohybem hmotného bodu s jedním stupněm volnosti – řešení se tak omezuje na jednu rovnici, tzv. **pohybovou rovnici vlaku** (10):

$$m_{vlred} \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl}, \quad (10)$$

kde:

- $m_{vlred}$  [kg] je setrvačná (redukovaná) hmotnost vlaku, která se dá dále vyjádřit vztahem (11):

$$m_{vlred} = m_{hv} \cdot (1 + \rho_{hv}) + m_{dv} \cdot (1 + \rho_{dv}), \quad (11)$$

kde:

- $m_{hv}$  [kg] je hmotnost hnacího vozidla;
- $m_{dv}$  [kg] je hmotnost dopravovaných vozidel;
- $\rho_{hv}$  [-] je součinitel rotačních hmot hnacího vozidla;
- $\rho_{dv}$  [-] je součinitel rotačních hmot dopravovaných vozidel;
- $\ddot{x}$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je okamžitá hodnota zrychlení vlaku ve směru jízdy;
- $F_{ok}$  [N] je celková tažná síla na obvodu kol;
- $B_{vl}$  [N] je celková brzdná síla na obvodu kol;
- $O_{vl}$  [N] je celkový jízdní odpor vlaku definovaný (12):

$$O_{vl} = O_t + O_v, \quad (12)$$

kde:

- $O_t$  [N] je traťový odpor;
- $O_v$  [N] je vozidlový odpor;
- působí pouze vnější síly ve směru jízdy – zanedbávají se přechodové a vnitřní děje;
- síly působící na vozidla jsou určeny ze statických charakteristik;
- nelineární funkce je nahrazena po částech lineárními funkcemi.

V teorii modelování se obecně postupuje dle následujících bodů:

1. definice problému, definice vstupních dat (charakteristické parametry hnacích a dopravovaných vozidel, parametry traťového úseku);
2. vytvoření fyzikálního (mechanického) modelu (zjednodušený popis fyzikální reality – zjednodušující předpoklady, stanovení potřebných veličin k výpočtu);
3. vytvoření matematického modelu;
4. řešení matematického modelu;
5. analýza výsledků (rozběr a ověření věrohodnosti získaných výsledků a jejich případná korekce).

## 4.1 Definice vstupních dat

Pro účely modelování jízd vlaků na staré a na nové trati byly vybrány 2 soupravy vlaků – jeden osobní (přičemž řazení odpovídá současnému stavu vozidlového parku nasazovaného na dané lince) a jeden nákladní (přičemž se jedná o kontejnerový Nex, jehož parametry jsou převzaty z reálného provozu, resp. mírně upraveny tak, aby vlak vykazoval celkovou hmotnost 2000 tun). V kapitole 4.1.2 udává tab. 10 konkrétní řazení vlaků. Jednotlivé výpočty jsou provedeny pro oba směry jízdy.

### 4.1.1 Parametry hnacího vozidla

Pro následující výpočty byla zvolena lokomotiva řady 383 Vectron, která již dnes zajišťuje vozbu mezinárodních vlaků do Německa. Současně splňuje požadavky na maximální rychlost 200 km/h. Parametry hnacího vozidla udává tab. 7.

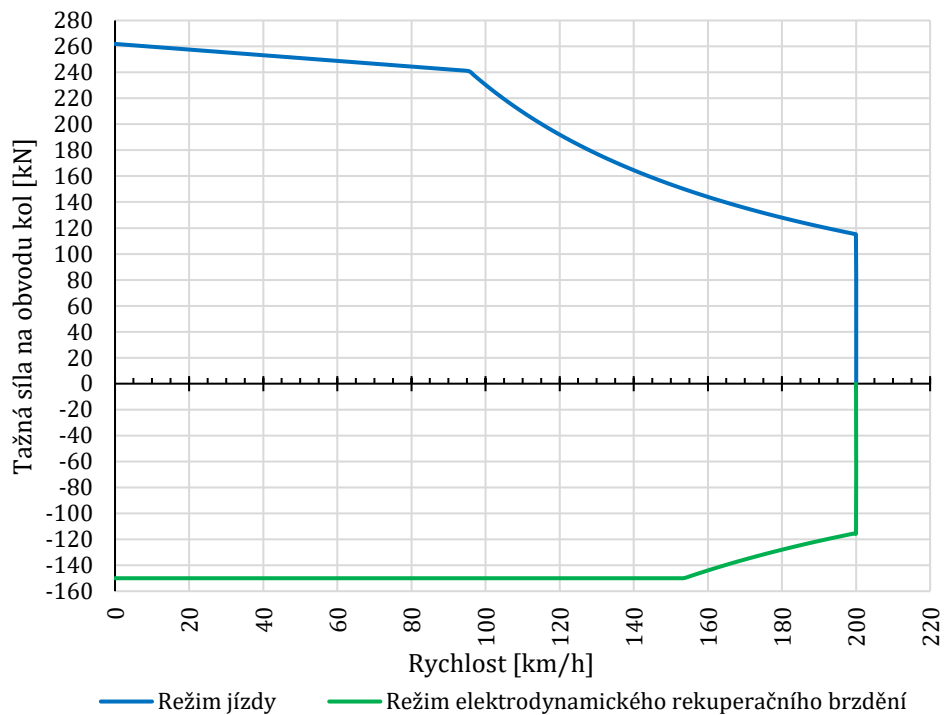
Tab. 7 Parametry hnacího vozidla řady 383 Vectron

Hnací vozidlo (HV)	ř. 383 Vectron		
Hmotnost	$M_{hv}$	89	t
Výkon	$P_{hvm\max}$	6400	kW
Doba aktivace – SD-SN/DC-AC (AC-DC)	$t_{akt}$	30/60	s
Účinnost HV (režim jízdy)	$\eta_{hv}$	85	%
Součinitel rotačních hmot HV	$\rho_{hv}$	0,10	-
Maximální brzdny výkon EDB HV (při rekuperaci)	$P_{EDB\max}$	6400	kW
Maximální brzdná síla EDB HV (při rekuperaci)	$B_{EDB\max}$	150	kN
Účinnost rekuperace	$\eta_{rek}$	70	%

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Na určitých místech tratě se nacházejí úseky, které musí hnací vozidlo elektrické trakce projet se staženým sběračem. Po projetí úseku strojvedoucí zdvihne sběrač, avšak hnací vozidlo začne vyvíjet tažnou sílu až po uplynutí aktivací doby  $t_{akt}$ . Tato doba byla stanovena obecně na 30 vteřin. Pokud se však jedná o místo, kde dochází ke změně trakční soustavy, byla uvažována hodnota 60 vteřin.

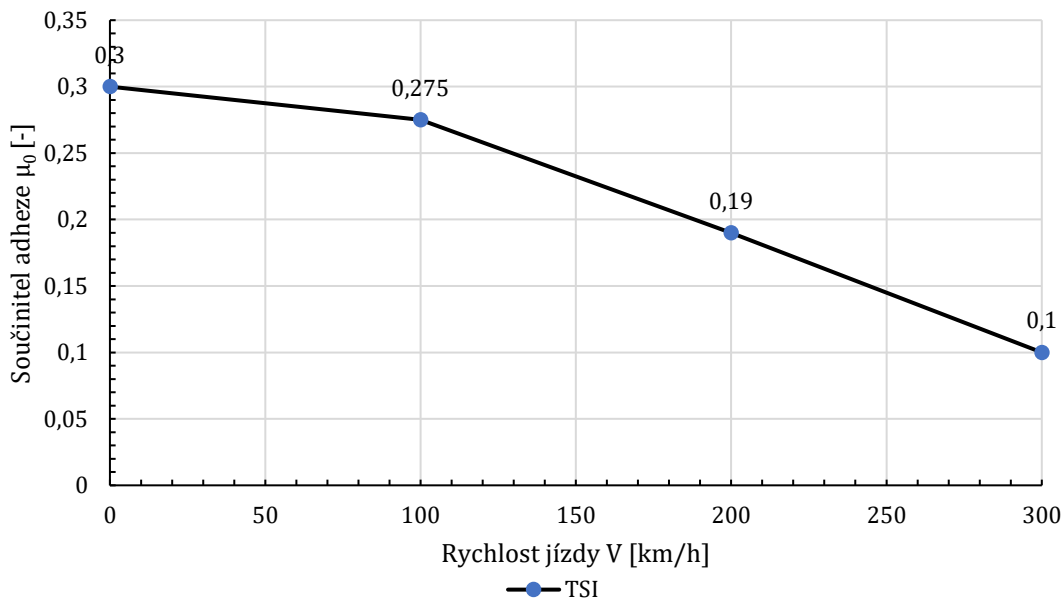
Pro zjednodušení je trakční charakteristika (obr. 27) uvažována jako ideální trakční hyperbola omezená shora adhezí a zprava maximální rychlostí vozidla. Adhezní omezení je uvažováno dle TSI LOC&PAS [20], které popisuje tab. 8 a obr. 28. Pro potřeby rekuperačního brzdění byla hodnota brzdného výkonu uvažována na hodnotě maximálního výkonu lokomotivy při jízdě. Hodnota maximální brzdné síly elektrodynamické rekuperační brzdy byla omezena na 150 kN z hlediska předcházení možnému prosmyknutí kol lokomotivy při brzdění. Zjednodušeně je tato hodnota je uvažována až do úplného zastavení vlaku.



Obr. 27 Zjednodušená trakční a brzdová charakteristika hnacího vozidla

Tab. 8 Závislost součinitele adheze (mez adheze) na rychlosti jízdy dle TSI LOC&PAS [20]

Rychlost jízdy V [km/h]	Součinitel adheze $\mu_0$ [-]	Odpovídající vyjádření součinitele adheze pro zvolený rozsah rychlostí	
0	0,3	$\mu_0 = 0,3 - 0,00025 \cdot V$	$\mu_0 = 0,36 - 0,00085 \cdot V$
100	0,275		
200	0,19		$\mu_0 = 0,37 - 0,0009 \cdot V$
300	0,1		

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Obr. 28 Grafické znázornění závislosti dosažitelného součinitele adheze na rychlosti jízdy dle TSI LOC&amp;PAS [20]

**4.1.2 Parametry vlaku**

Tab. 9 a tab. 10 udávají zvolené parametry pro jednotlivé dopravované vozy. Též je uveden i údaj o celkové hmotnosti vlaku. Pro zjednodušení výpočtů je uvažován měrný vozidlový odpor dopravovaných vozidel pro celý vlak, tzn. včetně lokomotivy. Délka osobních vozů je 26,4 metrů (jídelní vůz WRmz<sup>815</sup> 26,9 m), délka čtyřnápravových nákladních vozů je 26,0 metrů a délka šestinápravových nákladních vozů 26,4 metrů. Pro zjednodušení a rychlejší orientaci ve výpočtech byla sjednocena délka vozů na hodnotu 26 metrů. Zároveň byla tato hodnota zvolena jako délka integračního kroku v matematickém modelu. Tzn. v úseku se vždy nachází jeden vůz, není třeba rozkládat hmotnost vozu do více úseků. Chyba ve výpočtu, která vzniká nepřesností délek vozů, byla vyhodnocena jako zanedbatelná.

Tab. 9 Parametry osobního a nákladního vlaku

Parametry osobního vlaku			
Měrný vozidlový odpor (HV+DV)	$\sigma_v$	$1,8 + 0,0005 \cdot V + 0,00023 \cdot V^2$	N/kN
Součinitel rotačních hmot DV	$\rho_{dv}$	0,04	-
Hmotnost DV celkem	$M_{dv}$	551	t
Hmotnost HV+DV	$M_{vl}$	640	t
Parametry nákladního vlaku			
Měrný vozidlový odpor (HV+DV)	$\sigma_v$	$1,3 + 0,00015 \cdot V^2$	N/kN
Součinitel rotačních hmot DV	$\rho_{dv}$	0,03	-
Hmotnost DV celkem	$M_{dv}$	1911	t
Hmotnost HV+DV	$M_{vl}$	2000	t

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Tab. 10 Hmotnost jednotlivých dopravovaných vozů

	Pořadí DV:	Hmotnost 1 DV [t]:	Typ vozu:		Hmotnost nákladu [t]:	Hmotnost prázdného vozu [t]:	Hmotnost 1 DV [t]:	Nápravy:
O s o b n í v l a k	1.	56	Bmz <sup>241</sup>	N á k l a d n í v l a k	86,2	24,2	110,4	6
	2.	53	Bdmpz <sup>227</sup>		55,4	21,5	76,9	4
	3.	53	Bhmpz <sup>228</sup>		66,5	25,0	91,5	6
	4.	56	Bmz <sup>241</sup>		18,6	25,1	43,7	6
	5.	56	Bmz <sup>245</sup>		48,5	25,2	73,7	6
	6.	56	Bmz <sup>245</sup>		48,5	21,5	70,0	4
	7.	56	Bmz <sup>245</sup>		56,0	21,5	77,5	4
	8.	57	WRmz <sup>815</sup>		48,6	24,7	73,3	6
	9.	54	Ampz <sup>143</sup>		28,9	25,2	54,1	6
	10.	54	Ampz <sup>143</sup>		64,4	25,3	89,7	6
	11.	0			42,3	21,5	63,8	4
	12.	0			48,4	21,5	69,9	4
	13.	0			71,4	24,4	95,8	6
	14.	0			52,6	21,5	74,1	4
	15.	0			25,0	21,5	46,5	4
	16.	0			37,0	21,5	58,5	4
	17.	0			64,2	24,0	88,2	6
	18.	0			56,0	21,5	77,5	4
	19.	0			64,4	24,0	88,4	6
	20.	0			54,2	24,2	78,4	6
	21.	0			64,4	24,3	88,7	6
	22.	0			55,1	21,5	76,6	4
	23.	0			64,6	24,1	88,7	6
	24.	0			56,0	21,5	77,5	4
	25.	0			56,0	21,5	77,5	4
	26.	0			0,0	0,0	0,0	

Tab. 10 byla sestrojena pro možnost změny dopravované zátěže, tudíž hodnota nula znamená, že v daném úseku se již vlaková souprava nenachází. Řazení dopravovaných vozů je vždy ve shodném pořadí pro oba směry jízdy.

## 4.2 Matematický model

Celková délka vyšetřovaného úseku byla rozdělena po 26 metrech (zvolený integrační krok) a pro každý úsek se vypočítávaly potřebné veličiny. Jak již bylo uvedeno výše, v každém úseku se nachází pouze jedno vozidlo. Označení  $i$  značí konkrétní krok výpočtu. Z hlediska matematického popisu pohybu je vlak modelován jako soustava pevně spojených hmotných bodů, což umožňuje zohlednit délku vlaku ve výpočtech. Ujetá dráha či aktuální pozice modelu vlaku na trati je vztažena k čelu vlaku.

**4.2.1 Traťový odpor**

Nejprve byl stanoven náhradní sklon tratě  $s_n$  [N/kN] v každém jednotlivém kroku (26 m) pomocí vzorce (13):

$$s_{n,i} = s_i + o_{R,i} + o_{tun,i}, \quad (13)$$

kde:

- $s$  [‰] je sklon koleje, který je roven měrnému odporu ze sklonu koleje  $o_s$  [N/kN];
- $o_R$  [N/kN] je měrný odpor z jízdy obloukem koleje – vztah (1);
- $o_{tun}$  [N/kN] je měrný odpor z jízdy tunelem (bližší popis v kapitole 3.2.1), který je uvažován pouze v místech, kde se nachází tunel, a zároveň je uvažován výpočet dle předpisu SŽDC V7 [18]. Jelikož se jedná o jednokolejné tunely, je z hlediska tohoto předpisu uvažována hodnota měrného odporu z jízdy tunelem 2 N/kN. Při výpočtech prostřednictvím tunelového faktoru se měrný odpor z jízdy tunelem neuvažuje, protože odpor, který vyvozuje tunel, je začleněn do vozidlového odporu prostřednictvím tunelového faktoru  $\tau$ .

Dále je ve výpočtu zohledněna délka vlaku, tzn. traťový odpor je počítán zvlášť pro jednotlivé vozidlo na jednotlivém úseku. Celkový traťový odpor  $O_t$  [N] v jednotlivém kroku výpočtu je pak dán vztahem (14):

$$O_{t,i} = g \cdot \left( s_{n,i} \cdot M_{hv} + \sum_{(j)} s_{n,i-j} \cdot M_{dv,j} \right), \quad (14)$$

kde  $j$  značí pořadí dopravovaného vozu v soupravě vlaku.

**4.2.2 Vozidlový odpor**

Pro stanovení vozidlového odporu u osobních vlaků bylo využito měrného vozidlového odporu pro osobní vlaky – R (rychlíkové vozy s podvozky GP 200 s CZE) uvedeného ve vzorci (7). U nákladních vlaků byl využit měrný vozidlový odpor pro nákladní vlaky – T4 (čtyřnápravové nákladní vozy, ložené) uvedený ve vzorci (6). Tyto vztahy byly užity v případě modelování jízd vlaků po stávající trati a také po nové trati, avšak pouze dle předpisu SŽDC V7 [18].

V případě řešení zavedením tunelového faktoru na nové trati byl pro osobní vlaky použit vztah (9). Pro nákladní vlaky byl vztah (6) rozšířen o tunelový faktor na následující tvar (15):

$$o_v = 1,3 + \tau \cdot 0,00015 \cdot V^2. \quad (15)$$

Modelování je postupně provedeno pro hodnotu tunelového faktoru 1,5; 2 a 2,5. Tato hodnota je zadána do výpočtu v celé délce tunelu a dále při výjezdu vlaku z tunelu vždy do poloviny délky vlaku. Tím je zjednodušeně začleněn vliv tunelu na část vlaku, která se v něm ještě nachází. Na ostatních částech trati je měrný vozidlový odpor počítán ze vztahů (6) a (7).

Vozidlový odpor  $O_v$  [N] v každém kroku výpočtu je pak dán výrazem (16):

$$O_{v,i} = o_{v,i} \cdot M_{vl} \cdot g. \quad (16)$$

### 4.2.3 Rychlostní profil tratě

Stanovení rychlostního profilu tratě je popsáno v příslušných podkapitolách kapitoly 2. Z hlediska modelování je však tento rychlostní profil upraven. V případě zvyšování rychlosti v trat'ovém úseku je zohledněna délka vlaku. Vyšší rychlost je uvažována až poté, co poslední vůz vlaku opustí úsek s nižší rychlostí. V případě snižování rychlosti je potřeba brzdit tak, aby čelo lokomotivy vjíždělo do úseku s nižší rychlostí již onou nižší rychlostí.

### 4.2.4 Tažná síla

Tažná síla na obvodu kol vychází z trakční charakteristiky hnacího vozidla. Pro zjištění skutečné tažné síly na obvodu kol je nutné v každém kroku spočítat adhezní tažnou sílu a tažnou sílu při maximálním výkonu hnacího vozidla.

Adhezní tažná síla, jak již název napovídá, je omezena adhezí. Jak již bylo uvedeno výše, adhezní omezení je uvažováno dle TSI LOC&PAS [20]. Velikost součinitele adheze se tak mění v závislosti na rychlosti. V tomto případě připadají v úvahu dva intervaly rychlostí. Do rychlosti 100 km/h je součinitel adheze  $\mu_0$  [-] uvažován dle vzorce (17):

$$\mu_{0,i} = 0,3 - 0,00025 \cdot V_i, \quad (17)$$

a do rychlosti 200 km/h je uvažován jako (18):

$$\mu_{0,i} = 0,36 - 0,00085 \cdot V_i. \quad (18)$$

Velikost adhezní tažné síly  $F_{adh}$  [kN] (19) je následující:

$$F_{adh,i} = M_{hv} \cdot \mu_{0,i} \cdot g. \quad (19)$$

Tažná síla při maximálním výkonu hnacího vozidla  $F_{Pmax}$  [kN] se vypočítá dle vzorce (20):

$$F_{Pmax,i} = \frac{3,6 \cdot P_{hvmax}}{V_i}. \quad (20)$$

Hodnota skutečné tažné síly  $F_{okskut}$  [kN] v každém jednotlivém kroku závisí na potřebě zrychlování vlaku či jízdy konstantní rychlostí. V případě potřeby zrychlování vlaku se skutečná tažná síla na obvodu kol rovná nižší hodnotě ze sil (19) a (20). Při jízdě konstantní rychlostí je skutečná tažná síla rovna jízdnímu odporu vlaku (součet traťového a vozidlového odporu) za předpokladu, že hodnota jízdního odporu vlaku je nižší (nebo rovna) než adhezní tažná síla a tažná síla při maximálním výkonu. Pokud však hodnota vozidlového odporu je vyšší než adhezní tažná síla nebo tažná síla při maximálním výkonu, tak skutečná tažná síla nabývá nejnižší hodnoty z těch tří veličin. V tom případě již nelze mluvit o jízdě vlaku konstantní rychlostí, nýbrž bude docházet ke zpomalování vlaku.

#### 4.2.5 Zrychlení

Pro nežádoucí zacyklení hodnot v programu Microsoft Excel jsou hodnoty potřebné k výpočtu zrychlení uvažovány z předchozího kroku výpočtu. Konkrétně se jedná o traťový odpor, vozidlový odpor a skutečnou tažnou sílu, které je potřeba dosadit do vzorce pro zrychlení (21) v jednotkách [kN]. Zrychlení  $\ddot{x}$  má jednotku [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

$$\ddot{x}_i = \frac{F_{okskut,i-1} - O_{t,i-1} - O_{v,i-1}}{M_{hv} \cdot (1 + \rho_{hv}) + M_{dv} \cdot (1 + \rho_{dv})} \quad (21)$$

#### 4.2.6 Rychlost

Rychlost vlaku je počítána ze vzorce pro rovnoměrně zrychlený pohyb. Ve skutečnosti se však jedná o pohyb nerovnoměrně zrychlený. Náhrada obecného nerovnoměrně zrychleného pohybu pohybem rovnoměrně zrychleným (v každém kroku výpočtu) je vlastně základním principem numerického řešení pohybové rovnice vlaku. Je tedy pracováno s rychlostí na začátku a na konci každého kroku výpočtu (a rychlost na konci jednoho kroku je počáteční rychlostí v následujícím kroku). Pro možné nahrazení pohybu nerovnoměrného pohybem rovnoměrným a zároveň pro minimalizaci chyby ve výpočtu je třeba počítat hodnoty rychlostí pro velmi krátké úseky. S přihlédnutím ke zjednodušení výpočtu je uvažovaná délka integračního kroku stanovena na 26 metrů, aby se vždy nacházelo jedno vozidlo v uvažovaném úseku, jak již bylo uvedeno. Rychlost vlaku  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] na konci kroku je pak stanovena dle vzorce (22). V případě vynásobení hodnotou 3,6 vychází též rychlost vlaku  $V$ , ale v [ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

$$v_i = \sqrt{v_{i-1}^2 + 2 \cdot \ddot{x}_i \cdot 26} \quad (22)$$

Rychlost  $v_{i-1}$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je tedy rychlostí vlaku na konci předchozího kroku výpočtu a zároveň rychlostí vlaku na začátku počítaného kroku výpočtu.



### 4.2.7 Výkon

Pro zjištění výkonu hnacího vozidla  $P$  [kW] v každém kroku výpočtu je použit vztah (23), avšak pouze za předpokladu, že skutečná tažná síla nabývá kladných hodnot. Jestliže tato síla nabývá hodnot záporných, jedná se o brzdný výkon hnacího vozidla, který je uveden v kapitole 4.2.11.

$$P_i = F_{okskut,i} \cdot v_i \quad (23)$$

### 4.2.8 Jízdní doba

K výpočtu jízdní doby  $t$  [s] v jednotlivém kroku výpočtu je přistupováno dvěma způsoby. V případě jízdy vlaku konstantní rychlostí se jízdní doba spočítá dle (24),

$$t_i = \frac{26}{v_i}, \quad (24)$$

pokud však dochází ke zrychlování či zpomalování vlaku, jízdní doba v požadovaném kroku se spočítá jako (25):

$$t_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\ddot{x}_i}. \quad (25)$$

Pro zjištění výsledné celkové jízdní doby  $t_{celk}$  [s] v uvažovaném traťovém úseku stačí provést součet jízdních dob v dílčích krocích.

### 4.2.9 Trakční práce a energie

Výpočet trakční práce  $W$  [kJ] v jednotlivých krocích udává vzorec (26). Opět je zde předpoklad kladné skutečné tažné síly. V případě záporné skutečné tažné síly se jedná o brzdnou práci, kterou řeší kapitola 4.2.12.

$$W_i = F_{okskut,i} \cdot 26 \quad (26)$$

Celková trakční práce  $W_{celk}$  [kWh] ve vyšetřovaném úseku se spočítá jako součet dílčích hodnot jednotlivých kroků. Převod jednotek vychází z výrazu  $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ . Celková spotřeba energie  $E_{celk}$  [kWh] jízdou vlaku ve vyšetřovaném úseku je dána celkovou trakční prací a účinností hnacího vozidla (27):

$$E_{celk} = W_{celk} \cdot \frac{1}{\eta_{hv}}. \quad (27)$$

**4.2.10 Brzdná síla**

Velikost brzdné síly vychází z potřeby brzdit vlak na spádu a udržovat konstantní rychlost či brzdit vlak k rychlostnímu omezení. Při jízdě vlaku konstantní rychlostí na spádu, kde traťové odpory převyšují svou absolutní hodnotou odpory vozidlové, je zapotřebí brzdit vlak brzdou silou. Vhodným nastavením podmínek ve výpočtu spočítá velikost této síly Microsoft Excel bez přičinění uživatele. Brzdění vlaku k rychlostnímu omezení již Microsoft Excel nezvládne, a proto je třeba upravit hodnoty zrychlení v předcházejících krocích tak, aby čelo vlaku vjíždějícího do rychlostního omezení mělo již požadovanou nižší rychlost. Ve výpočtech se neuvažuje jízda výběhem, a proto byla použita nižší hodnota zrychlení, resp. zpomalení:  $-0,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; než které se může dosahovat v reálném prostředí. Současně byla ve stejných krocích zadána nulová hodnota skutečné tažné síly, aby nedocházelo k nesmyslnému stanovování výkonu, trakční práce a následné energie. Po následném upravení výpočtu již bylo možné stanovit potřebnou brzdou sílu  $B_{potř}$  [kN] výrazem (28):

$$B_{potř,i} = -\ddot{x}_i \cdot [M_{hv} \cdot (1 + \rho_{hv}) + M_{dv} \cdot (1 + \rho_{dv})] - O_{t,i} - O_{v,i}. \quad (28)$$

Lokomotiva řady 383 Vectron je vybavena elektrodynamickou brzdou s možností rekuperace. Využití této brzdy je však omezeno maximálním brzdým výkonem hnacího vozidla  $P_{EDBmax}$  [kW] a maximálním hodnotou brzdné síly  $B_{EDBmax}$  [kN]. Brzdná síla elektrodynamické rekuperační brzdy při využití maximálního brzdého výkonu hnacího vozidla  $B_{EDBP}$  [kN] je dána vztahem (29):

$$B_{EDBP,i} = \frac{3,6 \cdot P_{EDBmax}}{V_i}. \quad (29)$$

Skutečná brzdná síla elektrodynamické rekuperační brzdy  $B_{EDBskut}$  [kN] je pak dána minimální hodnotou ze sil (28), (29) a  $B_{EDBmax}$ . V případě, že tato síla nedosahuje hodnoty potřebné brzdné síly, je zapotřebí tuto sílu doplňovat brzdou silou prostřednictvím samočinné tlakovzdušné brzdy vlaku  $B_{vzd}$  [kN], která se rovná (30):

$$B_{vzd,i} = B_{potř,i} - B_{EDBskut,i}. \quad (30)$$

**4.2.11 Brzdý výkon**

Brzdý výkon elektrodynamické brzdy hnacího vozidla  $P_{EDBskut}$  [kW] v jednotlivém kroku udává vztah (31):

$$P_{EDBskut,i} = B_{EDBskut,i} \cdot v_i. \quad (31)$$

**4.2.12 Brzdná práce a energie**

Brzdná práce elektrodynamické rekuperační brzdy hnacího vozidla  $W_B$  [kJ] vykonaná v jednotlivém kroku je dána výrazem (32):

$$W_{B,i} = B_{EDBskut,i} \cdot 26. \quad (32)$$

Celková brzdná práce  $W_{Bcelk}$  [kWh] za vyšetřovaný úsek tratě je vypočtena jako součet dílčích hodnot brzdné práce v jednotlivých krocích. Celkové množství energie, které může hnací vozidlo vrátit zpět do trakčního vedení při použití elektrodynamické rekuperační brzdy, je následující (33):

$$E_{Bcelk} = W_{Bcelk} \cdot \eta_{rek}, \quad (33)$$

kde  $\eta_{rek}$  [-] je účinnost, která zohledňuje ztráty energie při rekuperaci.

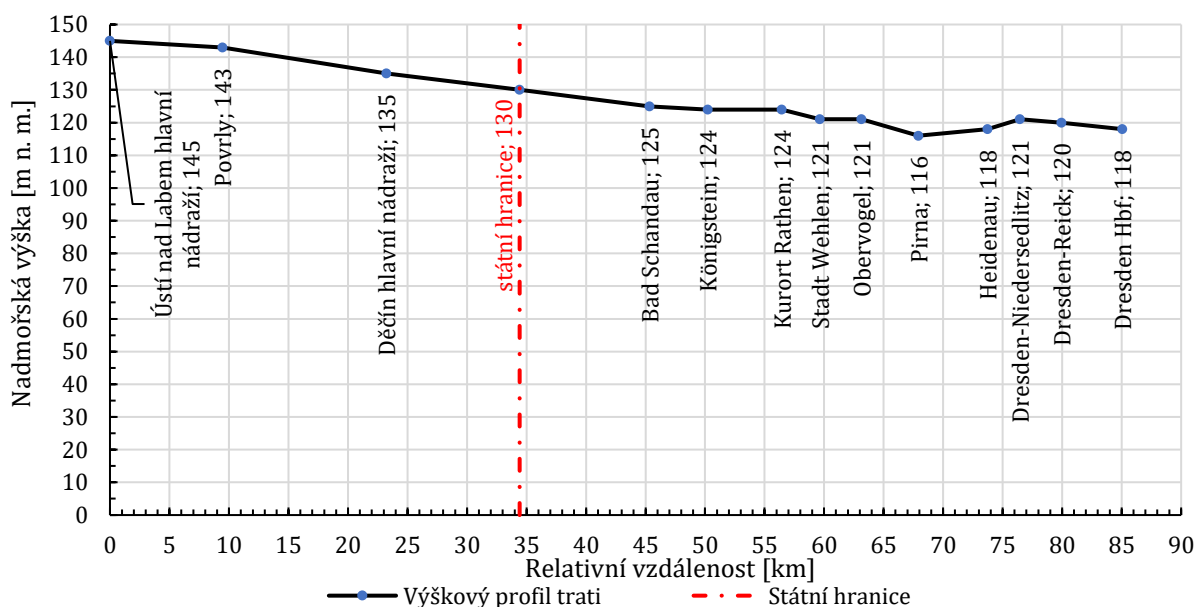
## 5 Analýza získaných výsledků

Výsledkem modelování jízdy vlaků na staré a na nové trati jsou dráhové tachogramy, závislosti výkonu na dráze a závislosti celkové práce na dráze. Těž jsou výsledky demonstrovány srovnávací tabulkou. Vlivem použité numerické metody dochází k nepřesnosti dosažené rychlosti maximálně do 2 km/h. Hodnoty výkonu a práce při brzdění jsou v grafickém vyhodnocení uvažovány jako opačná čísla.

### 5.1 Profil tratí

Délka nové tratě mezi Ústím nad Labem a Drážďany je o 28,27 km kratší než jízda po stávající trati. Český úseku stávající trati má délku 34,42 km; u novostavby 21,22 km. Na německé straně vykazuje stávající trať délku 50,63 km; novostavba 35,56 km. Znázorněné výškové profily obou tratí jsou uvedeny v této kapitole, protože úzce souvisí se zjištěnými výsledky. Zjištění nadmořské výšky významných bodů na sledovaném úseku proběhlo již v případě stanovování náhradního sklonu. Pokud však nebyl údaj dříve zjištěn, postupovalo se podobně jako v kapitole 2.1.4.2.

Výškový profil stávající trati (obr. 29) především kopíruje původní terén. Nenachází se zde význačné stoupání ani klesání. Sledovaný traťový úsek z Ústí nad Labem do Drážďan klesá, pouze v okolí stanic Pirna a Heidenau se nachází lokální stoupání.

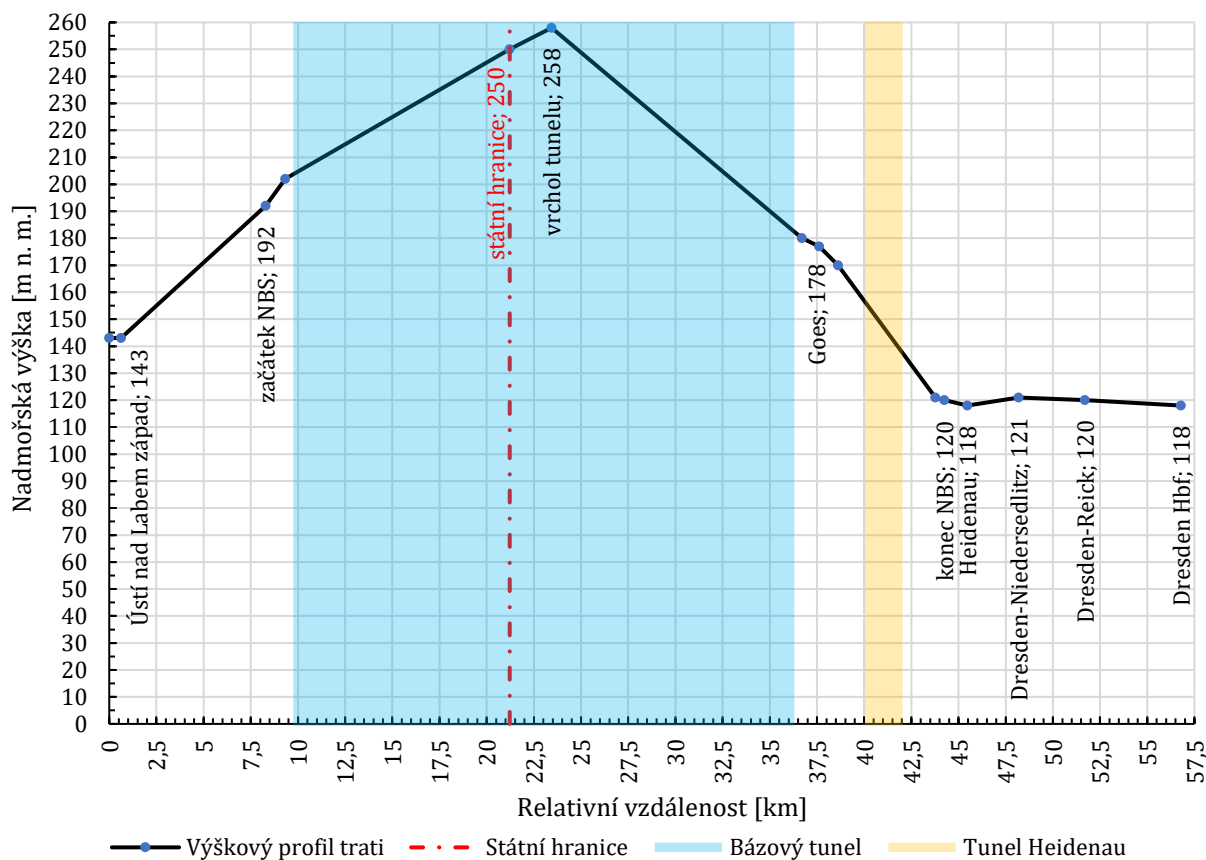


Obr. 29 Výškový profil stávající trati

Trasování nové trati (obr. 30) je výrazně odlišné od stávající trati. K podstatnému stoupání trasy dochází v blízkosti obou portálů bazového tunelu, kde trať kopíruje okolní terén. Důvody konkrétního trasování nové trati nejsou předmětem řešení této práce. Lze se však domnívat,

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

že navrhované varianty trasování a sklonu tunelu jsou dány geologickými a hydrologickými podmínkami. Těž je třeba vyhovět českým i německým předpisům.



Obr. 30 Výškový profil nové trati

## 5.2 Stávající trať

Na obr. 31 a obr. 33 jsou graficky znázorněny výsledné průběhy sledovaných veličin při modelování jízdy osobního/nákladního vlaku z Ústí nad Labem hlavního nádraží do stanice Dresden Hbf. Obr. 32 a obr. 34 znázorňuje jízdu opačným směrem. Na českém území v porovnání s německým dochází k velmi častým změnám traťové rychlosti, což má za následek časté rozjíždění a brzdění především osobních vlaků. Při požadavku na hospodárnost jízdy je možné využít výběh. Předpokladem je však znalost sklonových poměrů trati strojvedoucím, nebo využití automatizačních systémů (např. AVV).

Pro možné porovnání s novou tratí není oproti jízdnímu řádu uvažováno zastavení osobních vlaků ve stanici Děčín hlavní nádraží a Bad Schandau. Jízdní doba při odečtení pobytu v těchto stanicích dle jízdního řádu 2019/2020 ve srovnání s vypočtenou jízdní dobou se liší přibližně o 7-10 minut. Tento rozdíl může odpovídat brzdění a rozjezdu vlaku v projížděných stanicích, ve výpočtu se neuvažuje výběh ani není připočtena časová přírážka používaná v jízdních řádech, sloužící k eliminaci nepředvídatelných situací daných provozem. Po vyhodnocení těchto vlivů je možné usoudit, že vypočtená jízdní doba je teoreticky dosažitelná.

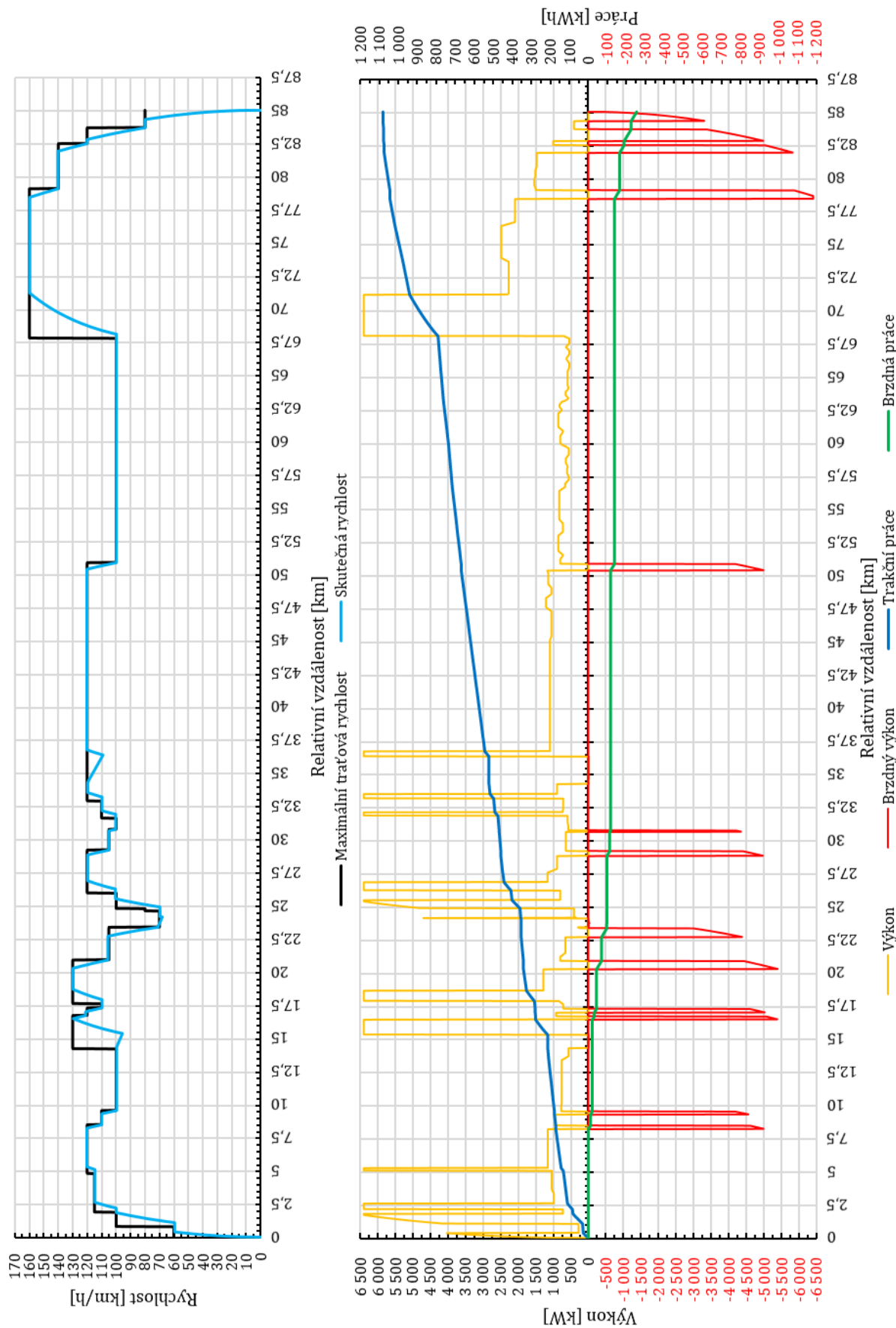
**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Z hlediska porovnání spotřeby energie dle tab. 11 je jízda ve směru do Drážďan méně energeticky náročná než jízda opačným směrem. To plně odpovídá znázorněnému výškovému profilu tratě na obr. 29. Zajímavostí však je, že množství rekuperované energie je vyšší při jízdě do Ústí nad Labem. Při důkladném zkoumání bylo zjištěno, že toto navýšení zapříčiňuje brzdění k rychlostnímu omezení (80 km/h) v 1. traťové koleji na německém území v relativním kilometru 17,99 až 21,81 oproti jízdě v 2. traťové koleji (100 km/h). Dalším obdobným omezením je relativní kilometr 38,12 až 38,32; kde dochází k lokálnímu snížení rychlosti ze 120 km/h na rychlost 100 km/h. Na uvedených obrázcích jsou tyto rychlostní propady znázorněny. Z průběhu jízdy vlaků lze též odečíst pozici úseků, které musí strojvedoucí vlaku projet se staženým sběračem lokomotivy. V případě jízdy nákladního vlaku byla zvolena maximální rychlost vlaku 100 km/h s ohledem na rychlostní profil stávající trati, kde by v případě uvažování maximální rychlosti 120 km/h (pro porovnání s NBS) nedošlo k výraznému zkrácení jízdni doby, ale výrazně by vzrostla spotřeba energie. Údaj celkové délky úseků se staženým sběračem HV byl zaokrouhlen na nejbližší násobek dělitelný délkou integračního kroku. Znatelný rozdíl v délkách těchto úseků v jednotlivých směrech je dán především rozdílnou polohou návěstí Zdvihněte sběrač při jízdě do Ústí nad Labem a Stáhněte sběrač při jízdě do Drážďan dle TTP (viz též kap. 2.1.4.1).

Tab. 11 Vyhodnocení výpočtů na stávající trati

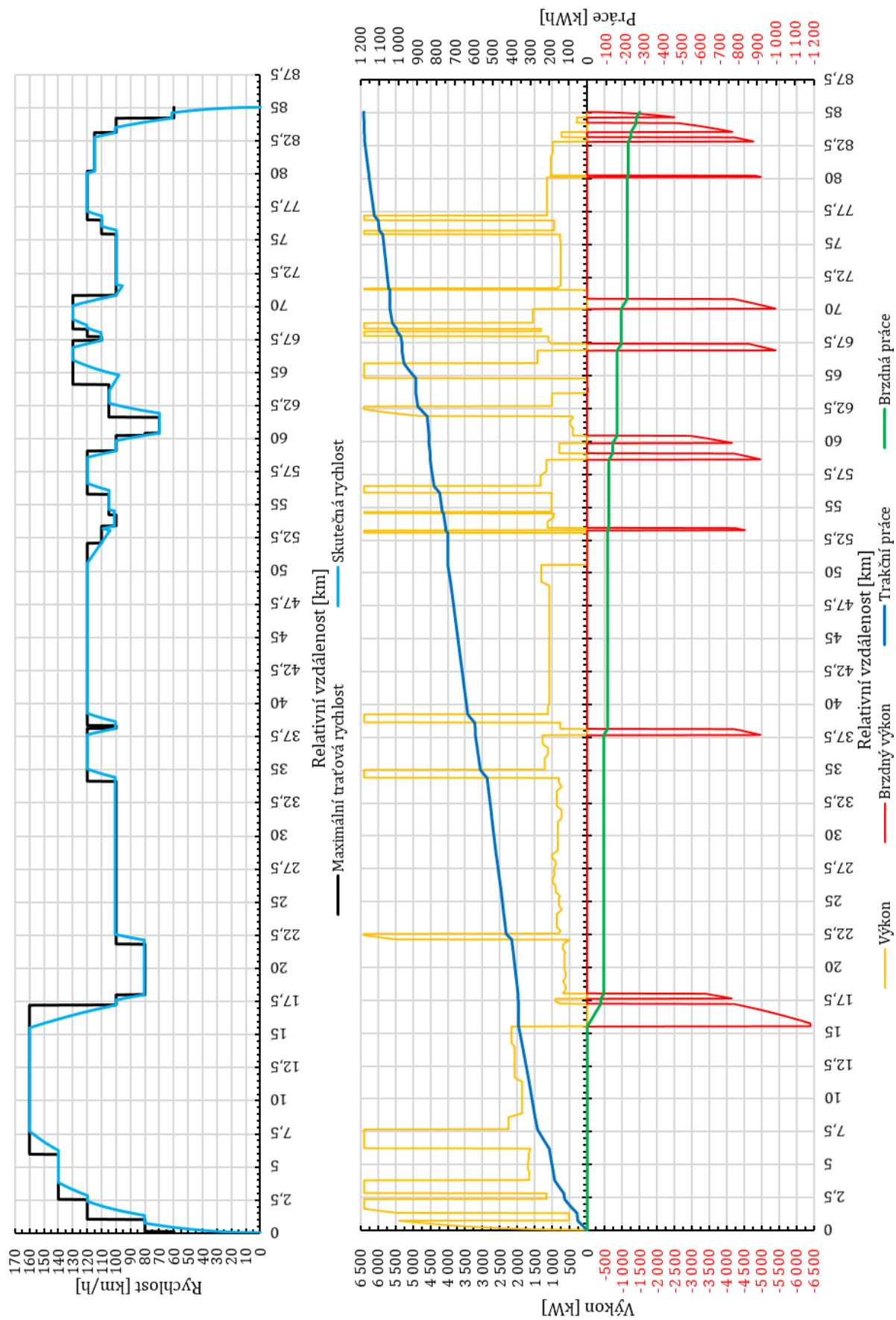
Sledovaná veličina	Jednotka sledované veličiny	Osobní vlak	Nákladní vlak
Délka vyšetřované trati	km	85,05	
<b>Ústí nad Labem hlavní nádraží - Dresden Hbf</b>			
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	160	100
Jízdni doba	h:min:s	0:46:53	0:54:35
Změna trakční soustavy	počet	1 (DC-AC)	
Úsek se staženým sběračem HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	
Celková délka úseků se staženým sběračem HV	m	390	
Trakční práce	kWh	1 080,61	1 545,86
Brzdná práce	kWh	253,40	68,31
Spotřebovaná energie (85% účinnost)	kWh	1 271,31	1 818,66
Rekuperovaná energie (70% účinnost)	kWh	177,38	47,82
Rozdíl spotřebované a rekuperované energie	kWh	1 093,93	1 770,84
<b>Dresden Hbf - Ústí nad Labem hlavní nádraží</b>			
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	160	100
Jízdni doba	h:min:s	0:47:22	0:55:42
Změna trakční soustavy	počet	1 (AC-DC)	
Úsek se staženým sběračem HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	
Celková délka úseků se staženým sběračem HV	m	884	
Trakční práce	kWh	1 183,32	1 841,92
Brzdná práce	kWh	277,24	84,67
Spotřebovaná energie (85% účinnost)	kWh	1 392,14	2 166,97
Rekuperovaná energie (70% účinnost)	kWh	194,07	59,27
Rozdíl spotřebované a rekuperované energie	kWh	1 198,07	2 107,70

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 31 Dráhový tachogram jízdy osobního vlaku po stávající trati ze stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží do stanice Dresden Hbf včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

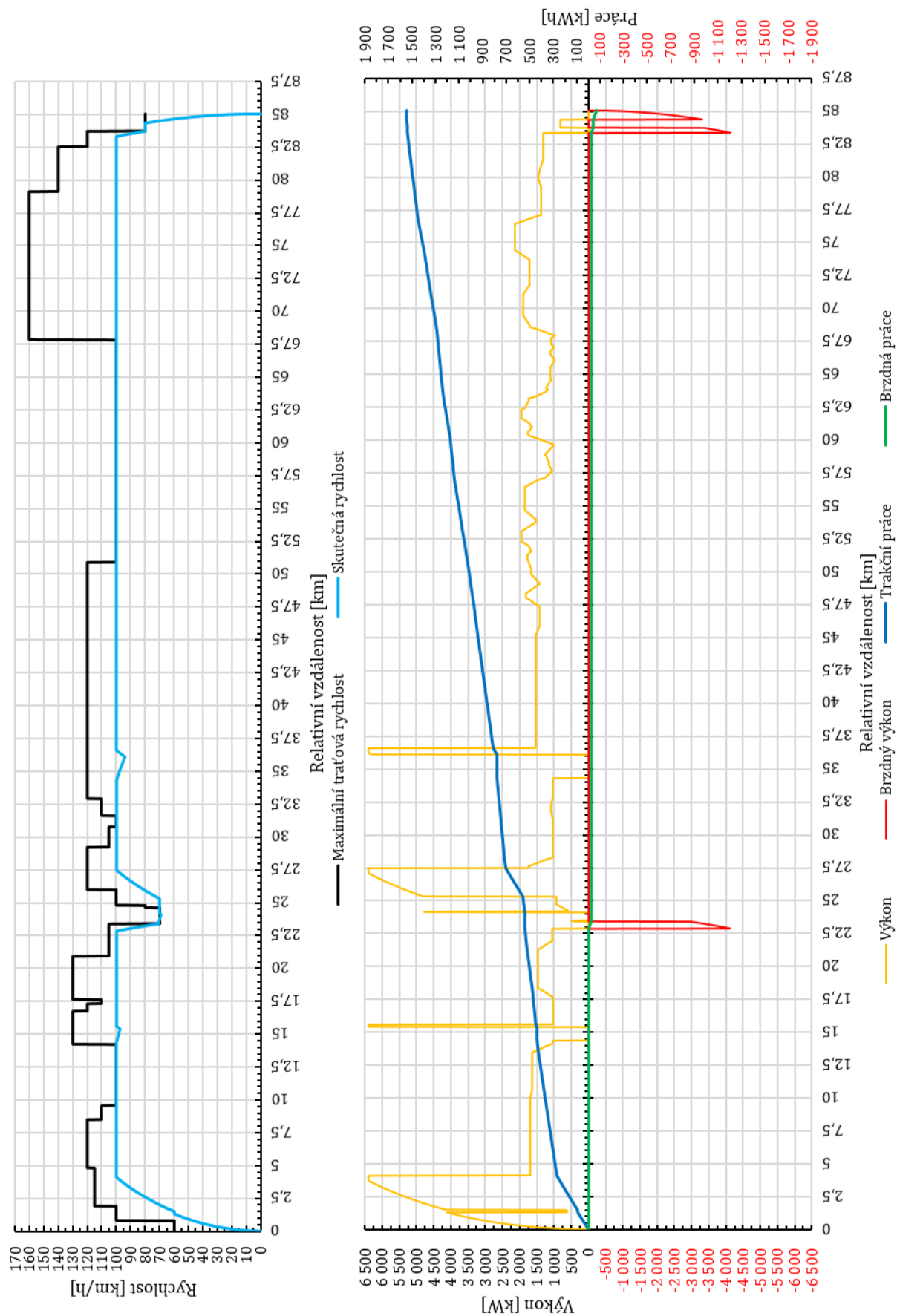
**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 32 Dráhový tachogram jízdy osobního vlaku po stávající trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce



**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 33 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku po stávající trati ze stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží do stanice Dresden Hbf včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 34 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku po stávající trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem hlavní nádraží včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

### 5.3 Nová trať

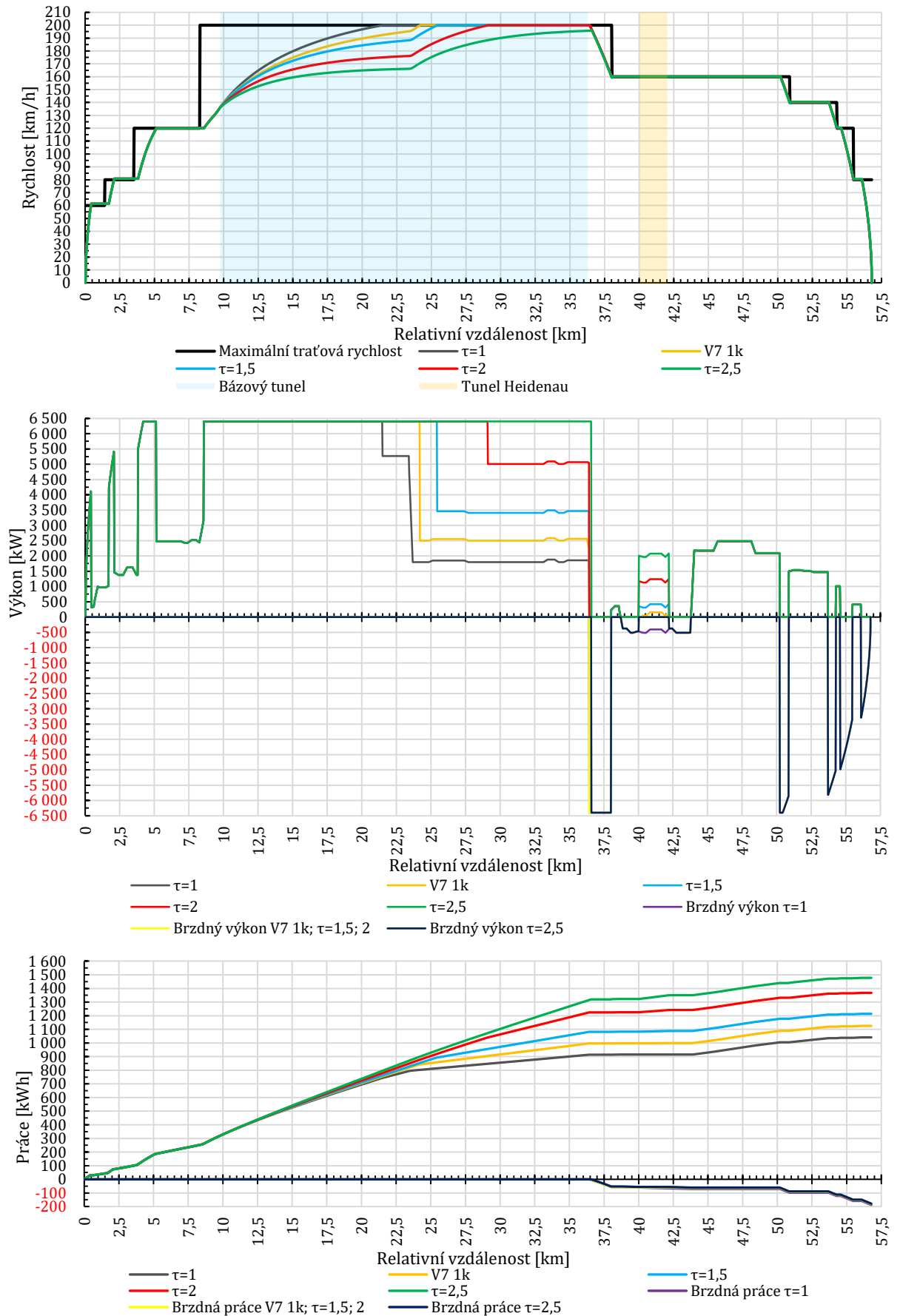
Jízdy vlaků na nové trati byly modelovány pro hodnotu tunelového faktoru  $\tau = 1; 1,5; 2; 2,5$  a dle předpisu SŽDC V7 [18] pro jednokolejný tunel. Modelování pro tunelový faktor  $\tau = 1$  je uvažováno jen pro teoretické srovnání jízdy vlaku v otevřené krajině na stejném profilu trati. Jelikož nebylo možné dohledat informace o možné změně trakční soustavy u vysokorychlostní trati v tunelu, je celý úsek nové trati uvažován bez změny trakční soustavy a bez úseků, které je potřeba projet se staženým sběračem. Možným předpokladem je to, že v případě výstavby nové trati dojde ke sjednocení trakční soustavy na celém úseku trati. V následujícím vyhodnocení je vždy znázorněn průběh pro všechny uvažované varianty, proto se stává, že především v místech mimo tunel se jednotlivé průběhy překrývají. Odlišnosti v průbězích především při brzdění nejsou v grafickém vyjádření u některých variant patrné.

Obr. 35 a obr. 36 znázorňuje průběh jízdy osobního vlaku po nové trati. V obou směrech se rychlosti 200 km/h dosáhne vždy až za vrcholem tunelu. Pro  $\tau = 2,5$  ani není maximální rychlosti dosaženo. Jízdní odpory v tunelu při vyšších rychlostech jsou výrazně vyšší než při jízdě v otevřené krajině. Pro udržení rychlosti v klesání v tunelu není možné využít výběh. To dokládá i průběh skutečného výkonu HV. Množství rekuperované energie je tak dáno pouze brzděním vlaku k rychlostnímu omezení či jízdě v klesání v otevřené krajině.

Obr. 37 demonstruje jízdu nákladního vlaku do Drážďan po nové trati maximální rychlostí 100 km/h. Za vrcholem tunelu přechází vlak do brzdění, kde vlak využívá rekuperační brzdění. To se projeví ve zvýšeném množství rekuperované energie. Při jízdě opačným směrem (obr. 38) dosahuje klesání v tunelu do Ústí nad Labem nižší hodnoty (4 ‰), a proto je potřeba při uvažování odporu z jízdy tunelem dle SŽDC V7;  $\tau = 2; 2,5$  vyvíjet tažnou sílu pro udržení rychlosti. To se projeví vyšší spotřebou energie a nižší rekuperovanou energií.

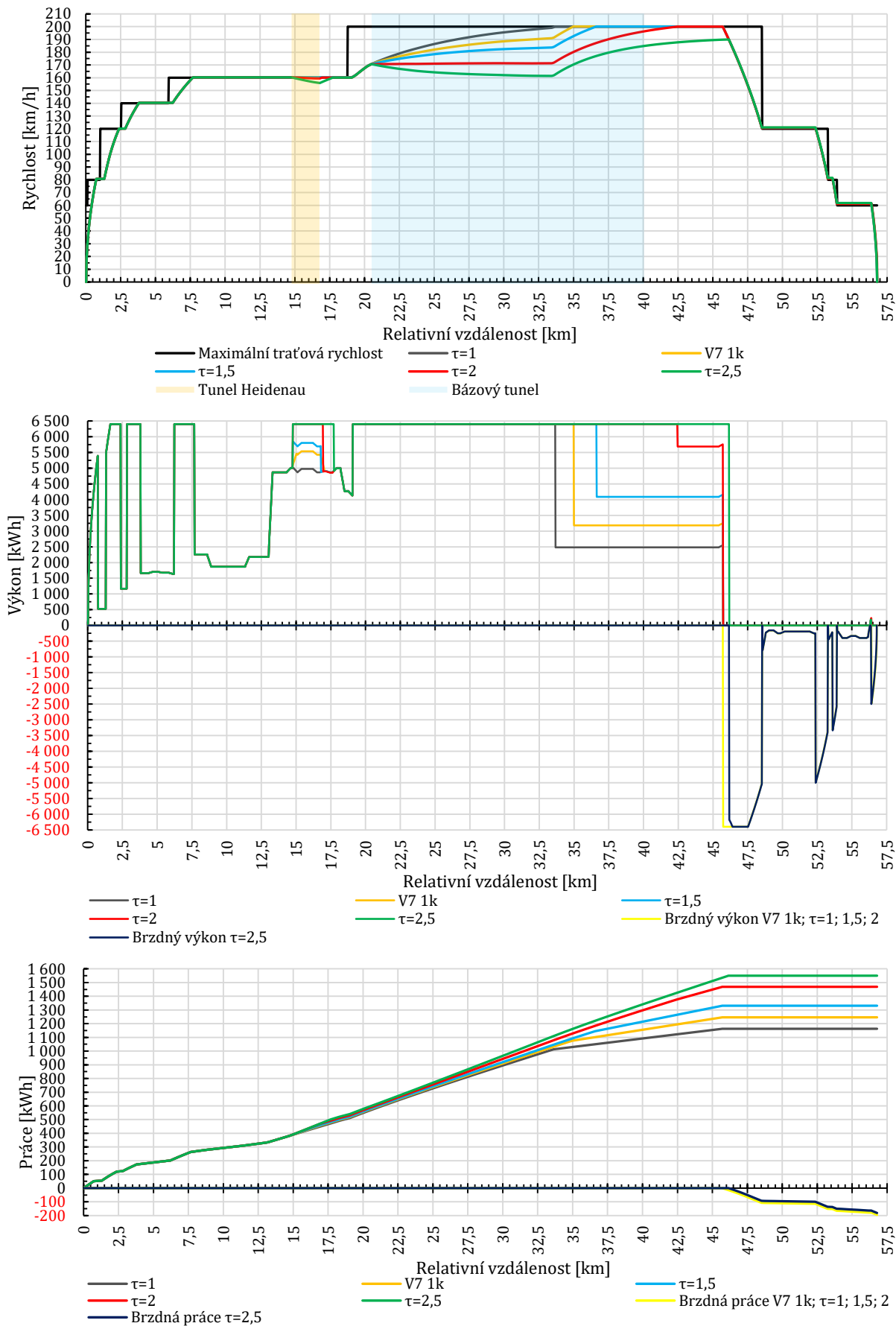
Jízda nákladního vlaku s maximální rychlostí 120 km/h je energeticky náročnější než jízda vlaku rychlostí 100 km/h. Při jízdě tunelem ve směru do Drážďan to dokládá obr. 39, kde je potřeba vyvíjet tažnou sílu při  $\tau = 2,5$ . Ve směru do Ústí nad Labem (obr. 40) je potřebné vyvíjet tažnou sílu pro udržení maximální rychlosti ve všech případech. I v částech trati v otevřeném terénu je výkon lokomotivy pro udržení rychlosti 120 km/h vyšší (v případě brzdění je brzdňvý výkon nižší), než při maximální rychlosti 100 km/h.

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



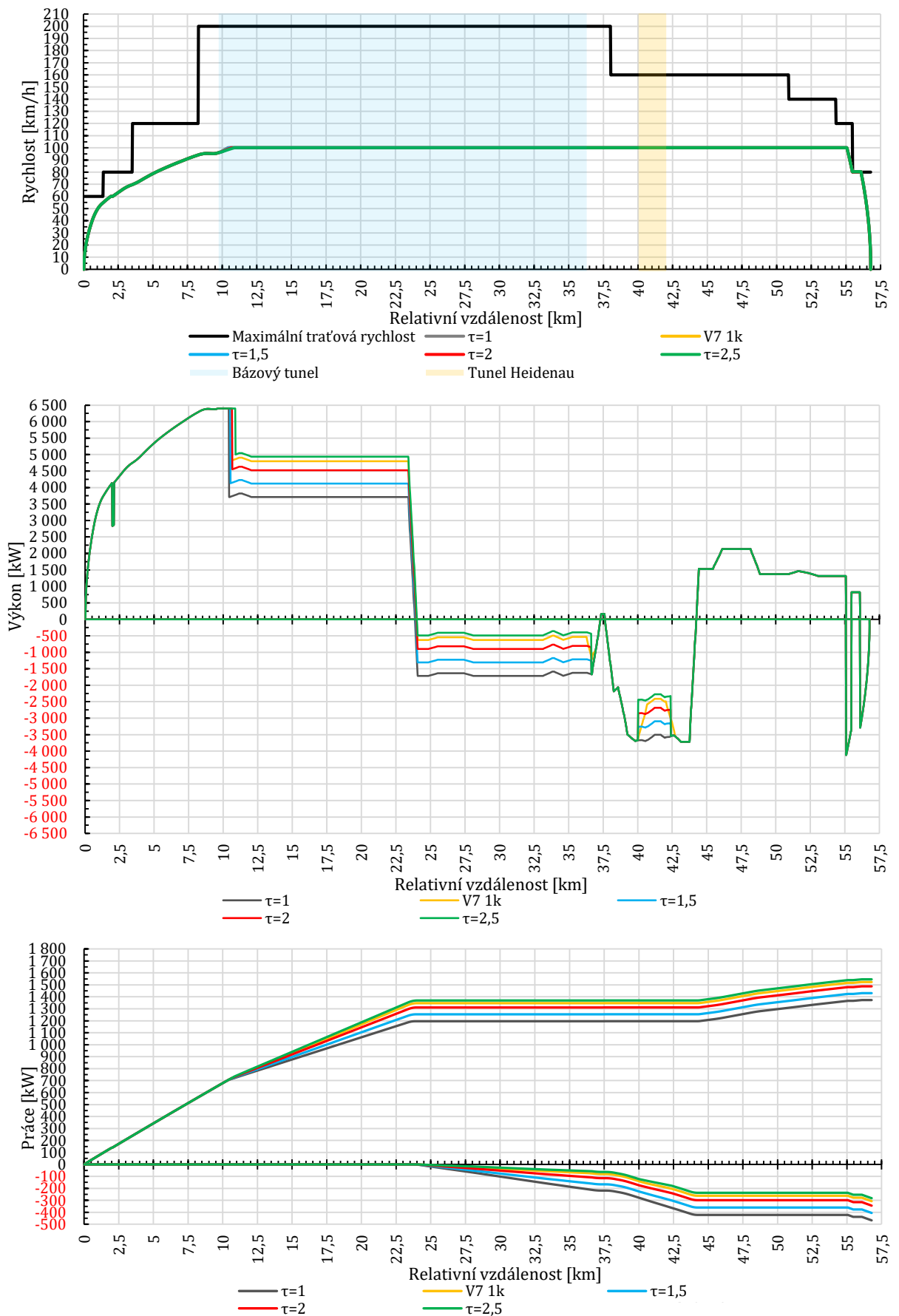
Obr. 35 Dráhový tachogram jízdy osobního vlaku po nové trati ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



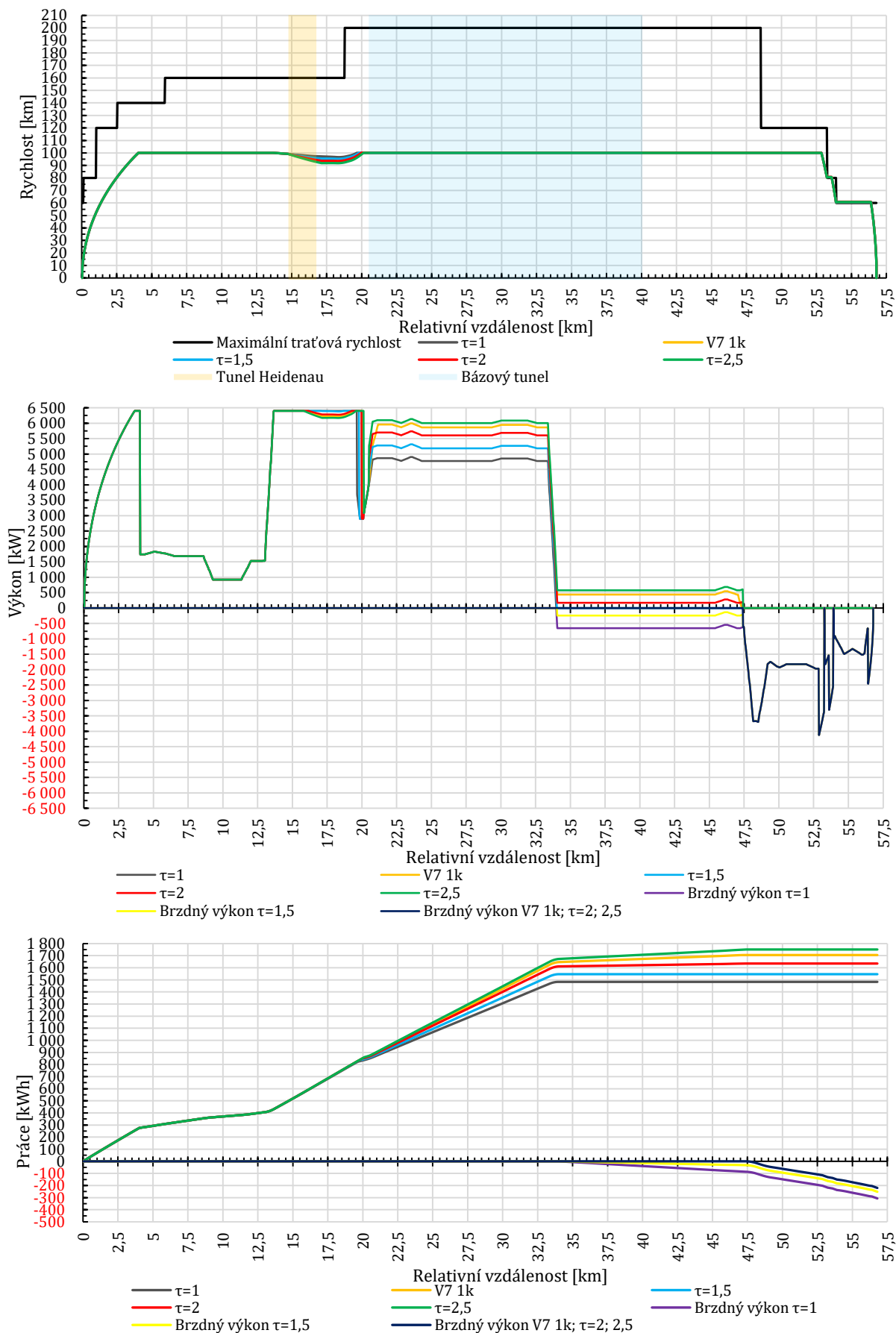
Obr. 36 Dráhový tachogram jízdy osobního vlaku po nové trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem západ včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



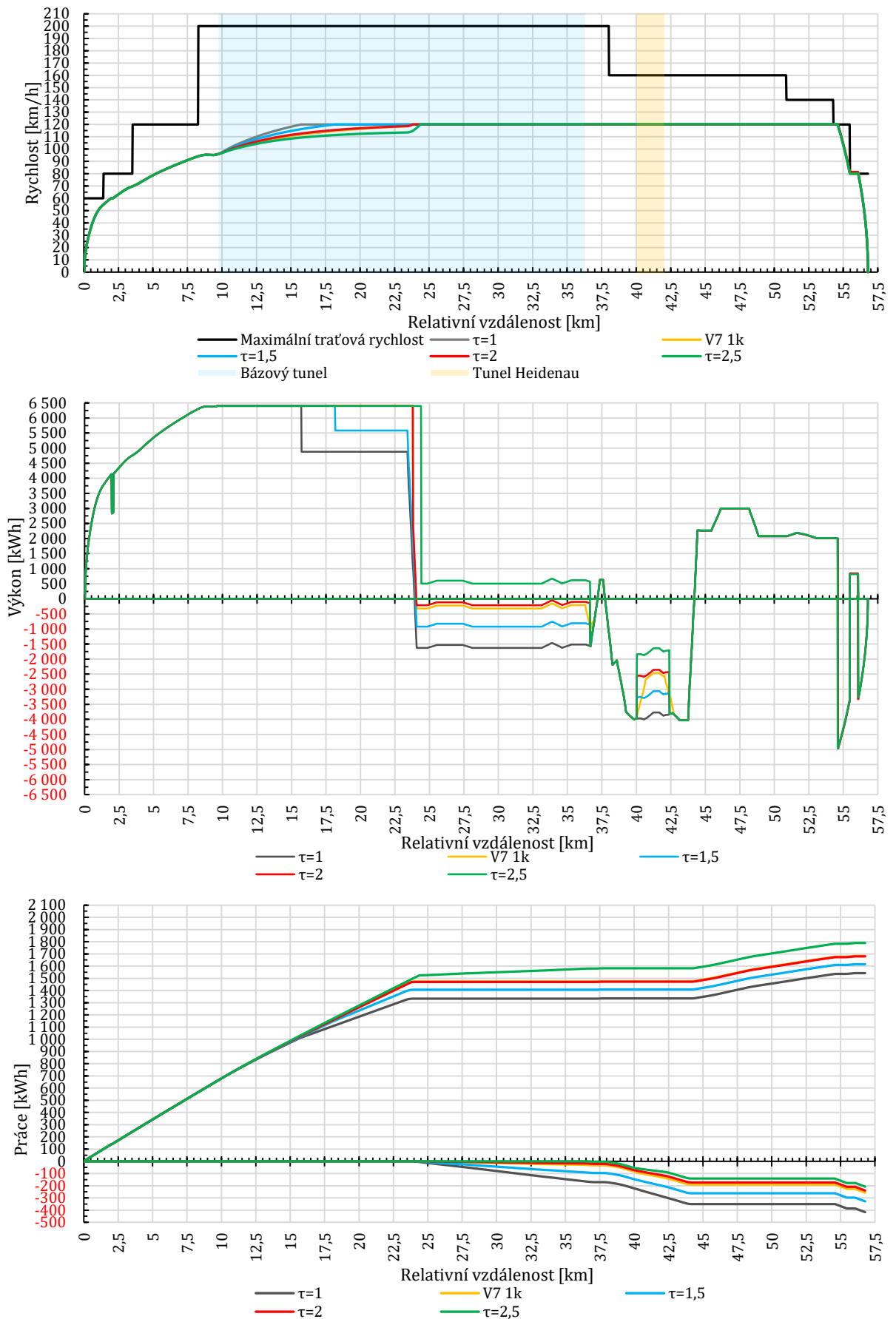
Obr. 37 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku ( $V_{max} = 100 \text{ km/h}$ ) po nové trati ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 38 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku ( $V_{max} = 100 \text{ km/h}$ ) po nové trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem západ včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

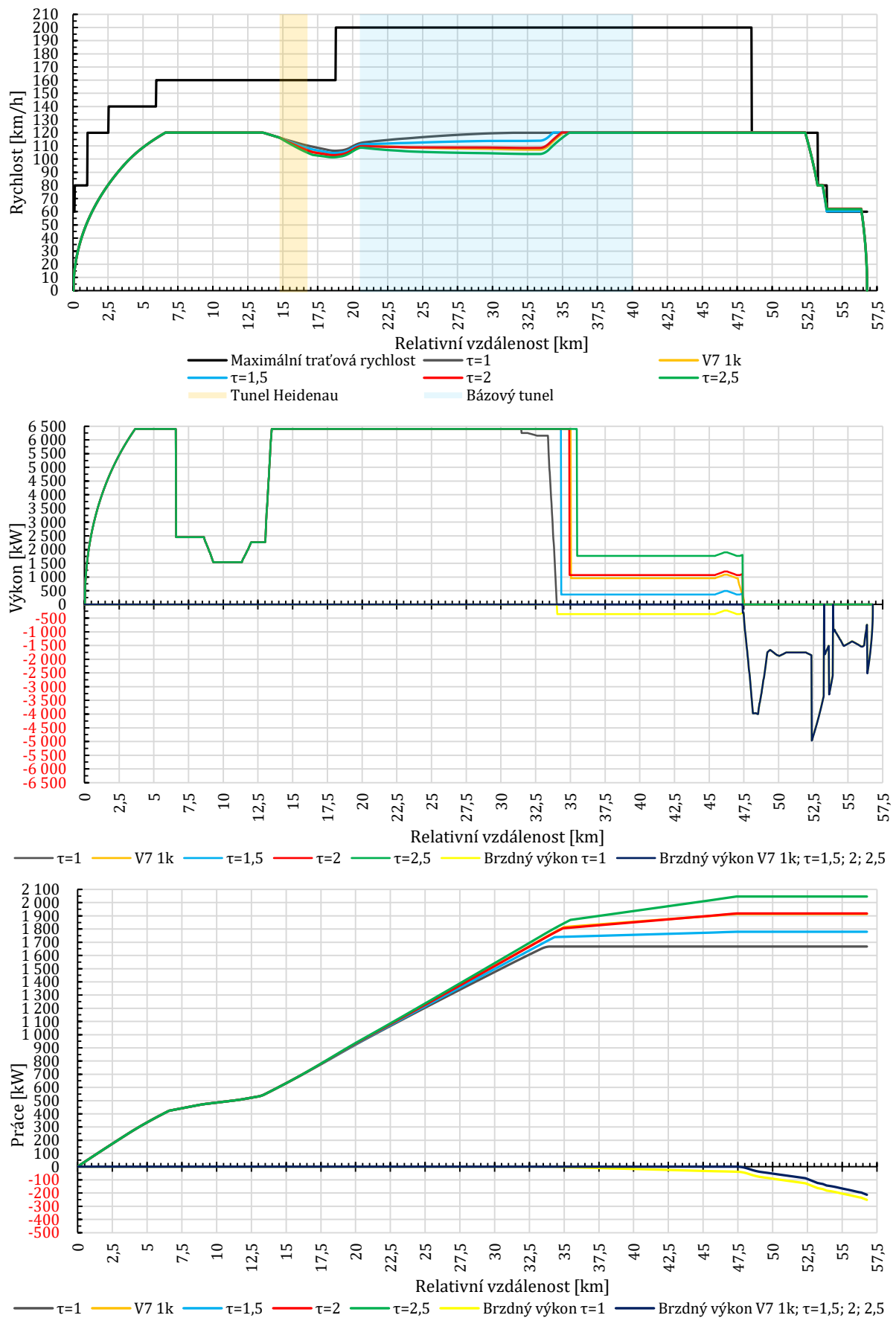
TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ



Obr. 39 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku ( $V_{max} = 120 \text{ km/h}$ ) po nové trati ze stanice Ústí nad Labem západ do stanice Dresden Hbf včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce



**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**



Obr. 40 Dráhový tachogram jízdy nákladního vlaku ( $V_{max} = 120$  km/h) po nové trati ze stanice Dresden Hbf do stanice Ústí nad Labem západ včetně průběhu skutečného výkonu a průběhu celkové práce

## 5.4 Porovnání jízd vlaků na staré a na nové trati

Tato kapitola se věnuje porovnání získaných výsledků modelovaných jízd osobních a nákladních vlaků na stávající a nově plánové trati.

### 5.4.1 Osobní vlaky

Tab. 12 shrnuje sledované veličiny jízd osobních vlaků na staré a na nové trati. Jízdní doba na nové trati je přibližně o 22-23 minut kratší než jízda po staré trati. Toto rychlé spojení představuje pro cestující přínos v úspoře času stráveném v dopravním prostředku. Při vybudování navazujícího úseku do Prahy, kde je plánován dojezdový čas 30 minut, vznikne velmi rychlé spojení Prahy a Drážďan (do 60 minut). I když je nová trať o 28,27 km kratší, tak vzhledem ke sklonovým podmínkám a vyšším rychlostem (navíc v tunelu) je jízda vlaku energeticky náročnější. Jízdní doba na nové trati je v případě všech uvažovaných způsobů zohlednění tunelu ve výpočtu přibližně stejná, ale výrazně se liší spotřeba energie.

Tab. 12 Srovnání jízd osobních vlaků na staré a na nové trati

Sledovaná veličina	Jednotka sledov. veličiny	Stávající trať	Novostavba trati				
			Otevřená krajina	Tunel			
				SŽDC V7 1kolejný	tunelový faktor		
			$\tau=1$	$\tau=1,5$	$\tau=2$	$\tau=2,5$	
Délka vyšetřované trati	km	85,05	56,78				
<b>Ústí nad Labem – Dresden Hbf</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	160	200	200	200	200	196
Jízdní doba	h:min:s	0:46:53	0:24:07	0:24:12	0:24:19	0:24:37	0:24:58
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	390	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 080,61	1 041,06	1 125,27	1 213,99	1 367,69	1 475,34
Brzdná práce	kWh	253,40	187,64	181,70	181,43	181,51	176,32
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	1 271,31	1 224,78	1 323,85	1 428,22	1 609,05	1 735,70
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	177,38	131,35	127,19	127,00	127,05	123,42
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	1 093,93	1 093,43	1 196,66	1 301,22	1 482,00	1 612,28
<b>Dresden Hbf – Ústí nad Labem</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	160	200	200	200	200	190
Jízdní doba	h:min:s	0:47:22	0:24:09	0:24:16	0:24:26	0:24:38	0:25:07
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	884	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 183,32	1 162,97	1 246,47	1 331,23	1 469,26	1 550,28
Brzdná práce	kWh	277,24	196,06	196,03	196,09	195,12	181,85
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	1 392,14	1 368,20	1 466,43	1 566,15	1 728,54	1 823,85
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	194,07	137,24	137,22	137,26	136,59	126,85
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	1 198,07	1 230,96	1 329,21	1 428,89	1 591,95	1 697,00

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ****5.4.2 Nákladní vlaky**

Při výstavbě nové trati dojde též k úspoře jízdní doby nákladních vlaků s  $V_{max} = 100$  km/h přibližně o 16-17 minut, jak dokládá tab. 13. Jízdní doba na nové trati je v případě všech uvažovaných variant zohlednění tunelu ve výpočtu prakticky shodná. Vteřinovou nesrovnalost při uvažování  $\tau = 2$  a  $\tau = 2,5$  je možné přičíst nepřesnosti maximálně dosažené rychlosti vlivem použité numerické metody. Co se týče energetické náročnosti jízdy nákladního vlaku s maximální rychlostí 100 km/h, je jízda na nové trati úspornější než jízda na staré trati. Jen v případě uvažování  $\tau = 2,5$  (a to pouze ve směru do Drážďan) je spotřebovaná energie teoreticky vyšší, avšak při porovnání množství rekuperované energie je na tom nová trať podstatně lépe.

Tab. 13 Srovnání jízd nákladních vlaků ( $V_{max} = 100$  km/h) na staré a na nové trati

Sledovaná veličina	Jednotka sledov. veličiny	Stávající trať	Novostavba trati				
			Otevřená krajina	Tunel			
				SŽDC V7	tunelový faktor		
					1kolejný	$\tau=1,5$	$\tau=2$
$\tau=1$							
Délka vyšetřované trati	km	85,05	56,78				
<b>Ústí nad Labem – Dresden Hbf</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	100	100	100	100	100	100
Jízdní doba	h:min:s	0:54:35	0:38:00	0:38:02	0:38:01	0:38:03	0:38:02
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	390	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 545,86	1 372,94	1 523,58	1 430,59	1 487,67	1 546,18
Brzdná práce	kWh	68,31	467,41	307,13	405,58	344,35	282,63
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	1 818,66	1 615,22	1 792,45	1 683,05	1 750,21	1 819,04
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	47,82	327,19	214,99	283,91	241,05	197,84
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	1 770,84	1 288,03	1 577,46	1 399,14	1 509,16	1 621,20
<b>Dresden Hbf – Ústí nad Labem</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	100	100	100	100	100	100
Jízdní doba	h:min:s	0:55:42	0:37:51	0:37:57	0:37:53	0:37:53	0:37:58
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	884	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 841,92	1 482,78	1 704,89	1 546,48	1 634,51	1 750,49
Brzdná práce	kWh	84,67	306,73	219,38	251,75	220,05	220,21
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	2 166,97	1 744,44	2 005,75	1 819,38	1 922,96	2 059,40
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	59,27	214,71	153,57	176,22	154,04	154,15
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	2 107,70	1 529,73	1 852,18	1 643,16	1 768,92	1 905,25

**TRAKČNÍ VÝPOČTY V PODMÍNKÁCH DLOUHÝCH TUNELŮ**

Na nové trati je plánováno provozovat nákladní vlaky s maximální rychlostí 120 km/h. Při této rychlosti dojde k úspoře jízdní doby přibližně o 20-21 minut oproti jízdě nákladního vlaku s maximální rychlostí 100 km/h na stávající trati, jak líčí tab. 14. Spotřeba energie na nové trati ve směru do Drážďan bude u všech zkoumaných tunelových variant vyšší. Pouze při uvažování tunelového faktoru 1,5 a současně při započítání rekuperované energie bude jízda vlaku úspornější. Ve směru do Ústí nad Labem jsou hodnoty spotřebované energie vyšší než při jízdě na původní trati kromě případu  $\tau = 1,5$ . Pouze při započítání rekuperované energie bude jízda vlaku na nové trati hospodárnější až na variantu  $\tau = 2,5$ .

Tab. 14 Srovnání jízdy nákladních vlaků na staré ( $V_{max} = 100$  km/h) a na nové trati ( $V_{max} = 120$  km/h)

Sledovaná veličina	Jednotka sledov. veličiny	Stávající trať	Novostavba trati				
			Otevřená krajina	Tunel			
				SŽDC V7	tunelový faktor		
					$\tau=1$	$\tau=1,5$	$\tau=2$
Délka vyšetřované trati	km	85,05	56,78				
<b>Ústí nad Labem - Dresden Hbf</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	100	120	120	120	120	120
Jízdní doba	h:min:s	0:54:35	0:33:53	0:34:08	0:33:59	0:34:06	0:34:17
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	390	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 545,86	1 542,34	1 683,00	1 615,62	1 679,59	1 789,47
Brzdná práce	kWh	68,31	416,67	256,51	328,09	239,32	207,40
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	1 818,66	1 814,51	1 980,00	1 900,73	1 975,99	2 105,25
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	47,82	291,67	179,56	229,66	167,53	145,18
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	1 770,84	1 522,84	1 800,44	1 671,07	1 808,46	1 960,07
<b>Dresden Hbf - Ústí nad Labem</b>							
Maximální (dosažená) rychlost	km/h	100	120	120	120	120	120
Jízdní doba	h:min:s	0:55:42	0:33:28	0:34:08	0:33:48	0:34:02	0:34:25
Změna trakční soustavy	počet	1	0	0	0	0	0
Úsek se SD HV (vč. změny tr. soust.)	počet	3	0	0	0	0	0
Celková délka úseků se SD HV	m	884	0	0	0	0	0
Trakční práce	kWh	1 841,92	1 667,74	1 914,20	1 779,43	1 918,09	2 046,46
Brzdná práce	kWh	84,67	251,69	212,55	213,31	213,01	213,25
Spotřebovaná energie (85% účinn.)	kWh	2 166,97	1 962,04	2 252,00	2 093,44	2 256,58	2 407,60
Rekuperovaná energie (70% účinn.)	kWh	59,27	176,18	148,78	149,32	149,11	149,28
Rozdíl spotř. a rekuper. energie	kWh	2 107,70	1 785,86	2 103,22	1 944,12	2 107,47	2 258,32

## 6 Závěr

Úvodní část této práce je věnována charakteristice traťového úseku zvoleného pro potřeby porovnání jízdních dob a spotřeby energie na původní a na nové trati, jejíž součástí je dlouhý tunel. Též jsou zde popsány přínosy nové trati pro cestující i pro provozování železniční nákladní dopravy. Celosvětový tlak na ekologičnost dopravy významně přeje železnici. Avšak železniční síť v České republice je již se svou kapacitou na hraně únosnosti. Proto je tento problém potřeba co nejdříve řešit, aby železniční doprava byla rychlá, konkurenceschopná, ekologická a aby byla snadno dostupnou alternativou pro přepravu zboží a cestujících.

V druhé kapitole je zpracována rešerše metod zohlednění vlivu tunelu na jízdní odpor vlaku. Pro potřeby trakčních výpočtů je možné odpor z jízdy tunelem uvažovat dle předpisu SŽDC V7 [18] či zavedením tunelového faktoru  $\tau$ . Problémem předpisu SŽDC V7 je, že nezohledňuje rychlost průjezdu vlaku tunelem, pouze stanovuje navýšení měrného traťového odporu o konstantní hodnotu dle počtu kolejí v tunelu, tzn. že ani neuvažuje plochu příčného průřezu tunelu (nové tunely jsou zpravidla prostornější než původní). U tunelového faktoru bývá problém se stanovením konkrétní hodnoty pro konkrétní tunel, protože závisí na poměru plochy průřezu vlaku k ploše průřezu tunelu a také délce tunelu. Jelikož se jedná o střední hodnotu z nestacionárních dějů daných šířením tlakových vln, je hodnota tunelového faktoru též ovlivněna dalšími vlaky v tunelu a jejich rychlostmi. Z uvedeného příkladu v kapitole 3.2.3 vyplývá, že zvolený přístup k výpočtu odporu z jízdy tunelem významně ovlivňuje hodnotu trakční práce a maximální dosaženou rychlost vlaku. To se samozřejmě projeví v jízdní době vlaku.

Tato práce byla vypracována především pro znázornění rozdílu mezi jednotlivými metodami přístupu k výpočtu odporu z jízdy tunelem a také mezi jednotlivými hodnotami tunelového faktoru. Z hlediska trakčních výpočtů je uvažování odporu z jízdy tunelem prostřednictvím tunelového faktoru přesnější než dle předpisu SŽDC V7 [18], protože zohledňuje aerodynamický odpor, mění se v závislosti na rychlosti, avšak stanovení hodnoty tunelového faktoru, jak již bylo řečeno, závisí na mnoha vlivech. Pro zpřesnění zvolené hodnoty pro trakční výpočty autor práce navrhuje na základě simulací a měření z reálného provozu stanovit jednoduchý program, který by po zadání veškerých vstupních údajů o tunelu a provozovaných vlacích dokázal vybrat hodnotu tunelového faktoru, jež by se blížila hodnotě tunelového faktoru v reálném provozu. Je si však vědom toho, že pro získání podkladů by bylo zapotřebí provést desítky měření a simulací, avšak s ohledem na plánované vysokorychlostní tratě vedené tunelem by bylo vytvoření tohoto programu pro trakční výpočty přínosné.

Třetí kapitola udává zvolené vzorce a zjednodušení pro modelování jízd vlaků na staré a na nové trati. Též popisuje zvolené parametry hnacího vozidla a soupravy osobního a nákladního vlaku, které odpovídají současnému provozu v mezistátní přepravě mezi Českou republikou a Spolkovou republikou Německo.

Závěrečná kapitola vyobrazuje výsledky modelování provozu vlaků na původní a na nové trati mezi Ústím nad Labem a Drážďany. Trasování nové trati je výrazně odlišné od původní, jak dokazuje srovnání obr. 29 a obr. 30. Vlaky na nové trati budou muset překonat výrazné převýšení, avšak ujedou o 28,27 km méně. Toto výrazné zkrácení traťového úseku zvýhodňuje novou trať. U osobních vlaků bude jízda vlaku energeticky náročnější než při jízdě po staré trati, ovšem jízdní doba bude přibližně 24,5 minuty oproti dnešním 47,5 minutám. U nákladních vlaků též dojde k úspoře jízdní doby. Vlaky s maximální rychlostí 100 km/h ujedou trať zhruba za 38 minut oproti dnešním 55,5 minutám. Jízda nákladních vlaků též bude na nové trati energeticky hospodárnější než při jízdě na původní trati. Jelikož se jedná o přeshraniční spojení, potenciál má především nákladní doprava. Ekonomická výhodnost stavby nové trati se tak váže především k vlakům nákladní dopravy. Nákladní vlaky s maximální rychlostí 120 km/h zvládnou trasu přibližně za 34 minut. Zvýšení rychlosti o 20 km/h u konkrétního vybraného nákladního vlaku s celkovou hmotností 2000 tun sníží jízdní dobu o 4 minuty, ovšem výrazně se zvýší spotřeba trakční energie, jak dokazuje srovnání tab. 13 a tab. 14. Při této rychlosti je spotřeba energie jízdy vlaku přibližně srovnatelná s jízdou vlaku po stávající trati (ovšem nižší rychlostí – 100 km/h).

Dle získaných výsledků modelování jízd vlaků na nové a stávající trati autor práce doporučuje urychlit výstavbu nové trati mezi Ústím nad Labem a Drážďany. Odstraní se tím problém s kapacitou mezistátního traťového úseku, doprava bude odvedena mimo údolí Labe, dojde ke snížení hlukové zátěže, nákladní doprava bude energeticky méně náročná a železniční doprava se stane konkurenceschopnou vůči silniční dopravě, což ocení cestující především ve zkrácené jízdní době oproti dnešnímu stavu. Autor nadále doporučuje, aby ve fázi přípravy projektu nové trati bylo provedeno několik simulací s různě zvolenými plochami průřezu tunelu s ohledem docílit co možná nejnižší hodnotu tunelového faktoru. Současně si je vědom, že simulace musí odpovídat současným technologickým možnostem výstavby tunelu a ekonomické výhodnosti celé stavby.

Dále autor doporučuje provést simulace na nové trati s ohledem na rychlost osobních vlaků ve stoupání s cílem snížit celkovou spotřebu energie. Maximální rychlost do stoupání by mohla být stanovena na hodnotu 160 km/h a až při jízdě v klesání zvýšena na 200 km/h. Toto opatření by mohlo mít minimální vliv na jízdní dobu, ovšem přineslo by úsporu energie. Dále je možné provést simulace jízd nákladních vlaků s maximální rychlostí 120 km/h, ovšem zároveň omezit

maximální rychlost do stoupání na hodnotě 100 km/h. Též je potřebné provést simulace jízd vlaků s různou zátěží.

Práce neuvažuje změnu trakční soustavy na nové trati. Zajímavé by ovšem bylo pozorovat chování vlaku při průjezdu úsekem, kde dochází ke změně trakční soustavy, která by byla situována na vrcholu, příp. na státní hranici ve stoupání. Autor práce však uvažuje, že vzhledem k možnému uvíznutí vlaku v tunelu, není možné umístit změnu napájecí soustavy v tunelu, proto tato skutečnost nebyla blíže zpracovávána.

Závěrem lze říci, že v případě plánování nových rychlých spojení je potřebné zvážit veškeré možné varianty trasování s ohledem na minimalizaci vedení jednotlivých tras tunely, které se projevují při jízdě vlaku zvýšenými jízdními odpory. Ovšem na základě tohoto modelování lze obecně sdělit, že výstavba tunelů pro vyšší rychlosti se vyplatí zejména v případě, kdy dojde k významnému zkrácení původní trasy.

## Literatura

- [1] ŠIROKÝ, Jaromír. *Technologie dopravy*. 2. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-852-7.
- [2] ŠVEHLÍK, Martin. Českosaský projekt vysokorychlostní tratě Praha – Drážďany. In: Správa železniční dopravní cesty [online]. 22. 6. 2017 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/documents/50004227/50158692/ten-v-cs.pdf>
- [3] Železniční mapy ČR. Správa železniční dopravní cesty [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/o-nas/zeleznicni-mapy-cr>
- [4] HELDT, Petra. Schienenneubaustrecke (NBS) Dresden-Prag ausserhalb des Elbtals. In: *ETR*. 12/2015. s. 28-32.
- [5] Severní státní dráha. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Severn%C3%AD\\_st%C3%A1tn%C3%AD\\_dr%C3%A1ha](https://cs.wikipedia.org/wiki/Severn%C3%AD_st%C3%A1tn%C3%AD_dr%C3%A1ha)
- [6] Děčín hl. n. – Dresden Hbf. *Pohledzvlaku.cz: Z vlaku je nejhezčí pohled na svět* [online]. Svět v bezpečí [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://pohledzvlaku.cz/?trat=decin-hl-n-dresden-hbf>
- [7] Railway network of k.k. nördliche Staatsbahn. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 27. 9. 2006 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KkNoerdlicheStaatsbahn.png>
- [8] Železniční trať Děčín – Dresden-Neustadt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_tra%C5%A5\\_D%C4%9B%C4%8D%C3%ADn\\_%E2%80%93\\_Dresden-Neustadt](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_tra%C5%A5_D%C4%9B%C4%8D%C3%ADn_%E2%80%93_Dresden-Neustadt)
- [9] KALIVODA, Jan a Olaf SVENDERSON. Česká pendolina v provozu. *Stránky Přátel Železnic, SPŽ: Magazín o železnici a městské dopravě* [online]. [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://spz.logout.cz/provoz/680cd2006.html>
- [10] KONEČNÝ, Jiří. Jednotka 680.003 vyjela z tunelu u zastávky Mlčechvosty jako R 772 Praha Masarykovo – Děčín. In: *Stránky Přátel Železnic, SPŽ: Magazín o železnici a městské dopravě* [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: [https://spz.logout.cz/gif2006/680003mlc\\_jk.jpg](https://spz.logout.cz/gif2006/680003mlc_jk.jpg)



- [11] 90/1 Praha Masarykovo nádraží – Děčín hlavní nádraží. *Atlas Draž Polska, Česka a Slovenska* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z:  
<https://www.atlasdrah.net/cz/ustecky/?id=linia&kraj=cz&poz=90/1>
- [12] 98 Děčín hlavní nádraží – Dolní Žleb st. hr. (CZ/DE). *Atlas Draž Polska, Česka a Slovenska* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z:  
<https://www.atlasdrah.net/infra/index.php?id=linia&kraj=cz&poz=98>
- [13] MICHÁLEK, Tomáš a Jaromír ZELENKA. *Trakční mechanika*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [14] Nové železniční spojení Drážďany – Praha. *Správa železniční dopravní cesty* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/vrt/vrt-drazdany-praha>
- [15] Raumordnungsverfahren. *Eisenbahn-Neubaustrecke Dresden-Prag* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.nbs.sachsen.de/15084.html>
- [16] SMWA. Novostavba železniční tratě Praha – Drážďany. In: *YouTube* [online]. 29. 1. 2016 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z:  
<https://www.youtube.com/watch?v=J8Mb9PYLDbU&t=393s>
- [17] Odpor prostředí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-21]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Odpor\\_prost%C5%99ed%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Odpor_prost%C5%99ed%C3%AD)
- [18] FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY. *ČSD V7. Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982
- [19] 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*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017. s. 283-290
- [20] *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*. (TSI LOC&PAS) Brusel: EK, 2014.