

Shrnutí

**Zkoumání variant elektrické trakční soustavy pro
Krušnohorský tunel na plánovaném novém spojení
Drážďany – Praha pomocí simulačních metod**

Stručný název: Zkoumání variant elektrické trakční soustavy pro
Krušnohorský tunel

Verze: 2.0

Datum: 02.07.2024

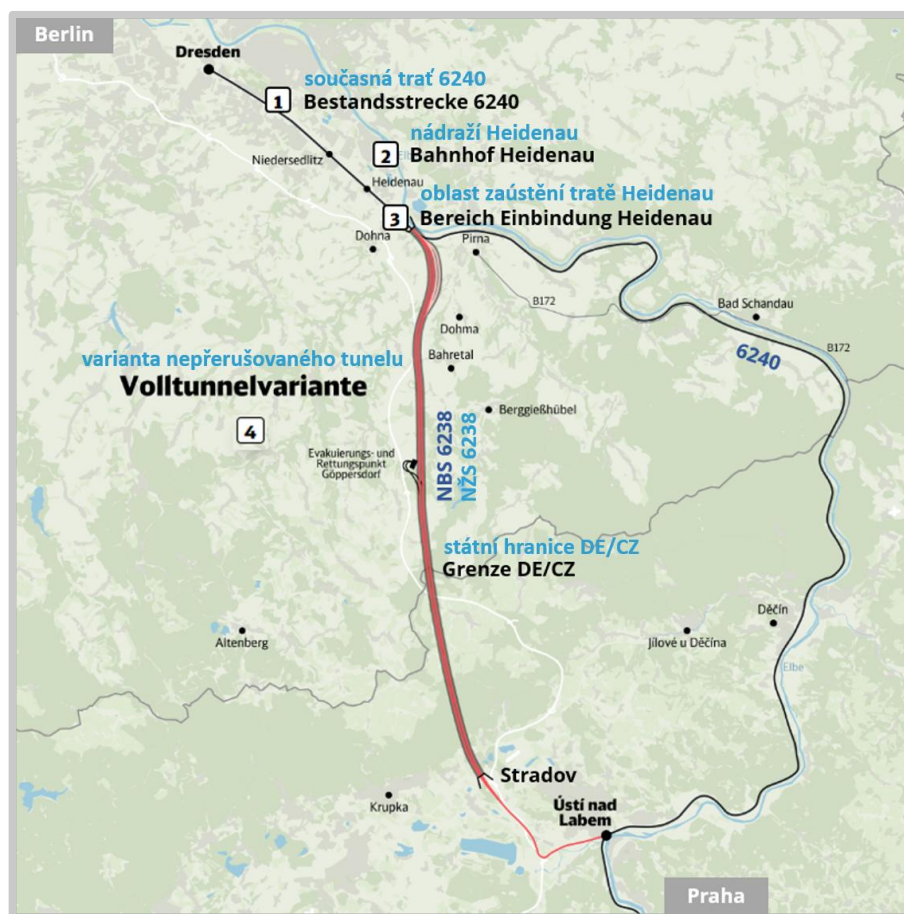
Autoři: Dipl.-Ing. Anna Fišer
Dipl.-Ing. Jan Pape
Dr.-Ing. Sven Körner
Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

1 Motivace a cíle

V rámci vytváření transevropských železničních koridorů v tzv. TEN-síti se v současné době plánuje výstavba nové výkonnostní trati mezi saským hlavním městem Drážďany a českým hlavním městem Prahou (viz obrázek 1).

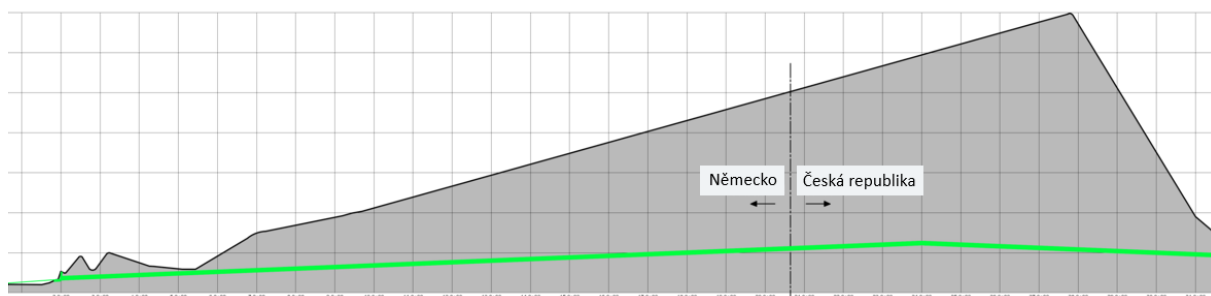
Nová trať má jednak odlehčit stávající hlavní dvoukolejnou trať údolím Labe přes Bad Schandau (D) a Děčín (CZ), a zároveň navázat na plánovanou vysokorychlostní trať z Ústí nad Labem do Prahy v České republice, aby se v budoucnu zásadně zvýšila přepravní kapacita železnice na této významné evropské relaci a výrazně zkrátila jízdní doba.

Součástí nové vysokovýkonnostní trati bude přibližně 30 km dlouhý Krušnohorský tunel, který bude zhruba ze dvou třetin veden přes německé území a z jedné třetiny přes české území. Pro úsek tunelu existuje společné plánovací území.



obrázek 1: trasa plánované nové trati Drážďany - Praha, varianta nepřerušovaného tunelu

Přehledný podélný řez trasy včetně horského profilu je znázorněn v následujícím obrázku (viz obrázek 2).



obrázek 2: přehledný podélný řez Krušohorského tunelu [1]

Pro novou trať s přeshraničním krušohorským tunelem byly v rámci vědecké studie [2] na základě plánovaného provozního konceptu vypracovány a posouzeny různé varianty elektrické trakční soustavy z hlediska jejich technické proveditelnosti a výhodnosti.

Pomocí moderních simulačních nástrojů byly analyzovány zejména poloha styku soustav mezi stávající německou elektrickou sítí AC 15 kV 16,7 Hz a plánovanou trakční elektrickou sítí AC 25 kV 50 Hz (dříve: DC 3 kV) v České republice, návrh sítě napájení a volba trakčního vedení v tunelu.

Při navrhování struktury napájení pro Krušohorský tunel je třeba kromě elektrotechnických parametrů zohlednit zejména aspekty železničního provozu, dostupnosti, bezpečnosti a údržby tunelu.

Na základě vědecké studie [2] byl proveden hloubkový systémový průzkum konceptu napájení [7]. Nadále byla simulována a analyzována další varianta trakční elektrické sítě. Všechny zkoumané varianty budou technicky a energeticky posouzeny a porovnány s ohledem na údržbu napětí, využití proudové zatížitelnosti a energetické ztráty trakčního vedení.

2 Varianty a metodika

2.1 Varianty

Na obou stranách Krušnohorského tunelu navazuje nové železniční spojení Drážďany - Praha na stávající železniční síť s jejich národními systémy elektrifikace. Zatímco na německé straně je AC 15 kV 16,7 Hz systém s výkonnými 16,7 Hz generátory již k dispozici, v oblasti Ústí n. L. má plánovaný systém AC 25 kV 50 Hz nahradit stávající 3 kV trakční elektrickou síť.

Při navázání obou elektrifikovaných sytemů musí být vyloučeno spojení nebo přemostění úseků trakčního vedení s odlišným napětím a frekvencí. Z tohoto důvodu je v trakčním vedení na tomto novém železničním úseku povinný styk soustav pro změnu napěťových systémů.

Varianty trakční elektrické sítě Krušnohorského tunelu vycházejí z následujících konstrukčních a provozních kritérií:

1. struktura systému a koncept napájení
 - a. poloha styku soustav
 - b. návrh sítě napájení
 2. systém trakčního vedení v tunelu
 - a. pružné trolejové vedení
 - b. trolejové vedení s přívodní kolejnicí
 3. provozní koncept
 - a. denní jízdní řád
 - b. noční jízdní řád
- pro normální a worst-case provoz

Analyzované varianty jsou vytvořeny podle možných umístění styku soustav:

varianta 1	styk soustav v blízkosti státní hranice	(vrchol tunelu)
varianta 2	styk soustav v ČR	(portál tunelu, mimo tunel)
varianta 3	styk soustav v DE	(portál tunelu, mimo tunel)

Nezbytná integrace do nadřazených elektrických trakčních soustav v Německu a České republice je u všech zkoumaných variant technicky proveditelná.

U **varianty 1** (viz obrázek 3) je tunelový úsek možné řešit z trakčních soustav 16,7 Hz a 50 Hz pouze jednostranným napájením z obou stran tratě. Na vrcholu tunelu se z důvodu zlepšení údržby napětí mezi oběma odděleně napájenými tunelovými rourami nachází spínací stanice s neutrálem (křížová spojka).

Vzhledem k nejasnostem v dosavadním plánování a nejasné poloze 50 Hz trakční transformovny, která má být v ČR nově zbudována, nebo využití některého ze stávajících přípojných bodů elektrické sítě v Koštově nebo ve Světcí, jsou analyzovány různé délky napájecího vedení na území ČR. Výsledkem jsou tři různé podvarianty 1:

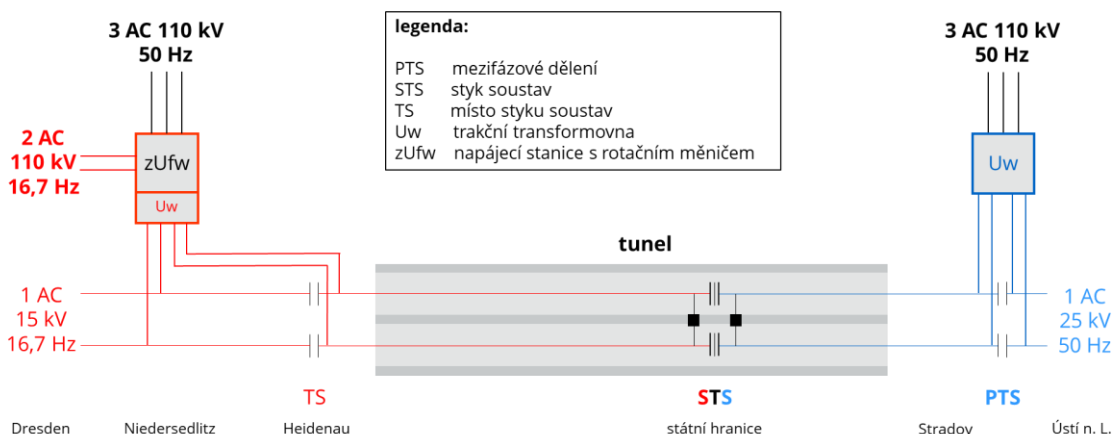
- 1A nová trakční transformovna v bezprostřední blízkosti portálu tunelu na české straně
- 1B poloha stávající trakční transformovny v Koštově (dříve DC 3 kV), cca 10 km od českého portálu tunelu
- 1C poloha stávající trakční transformovny ve Světcí (dříve DC 3 kV), cca 30 km od portálu českého tunelu

Ve variantách 1B a 1C se na české straně z důvodu údržby napětí vychází ze systému autotransfómátů od trakční transformovny k portálu tunelu (dva autotransfómátory jsou instalovány každých 10 km). V samotném tunelu nebudou instalovány žádné autotransfómátory.

Stávající napájecí stanice s SFC v Koštově je napojena na 22 kV síť. Pro napájecí stanice s SFC ve Světcí je navrženo přímé napojení na 110 kV síť. Poloha trakční transformovny ve Světcí má z tohoto důvodu výrazně vyšší zkratový výkon než bližší poloha v Koštově.

Varianta 1A, 1B, 1C

simulováno s různými délkami napájecího vedení v ČR

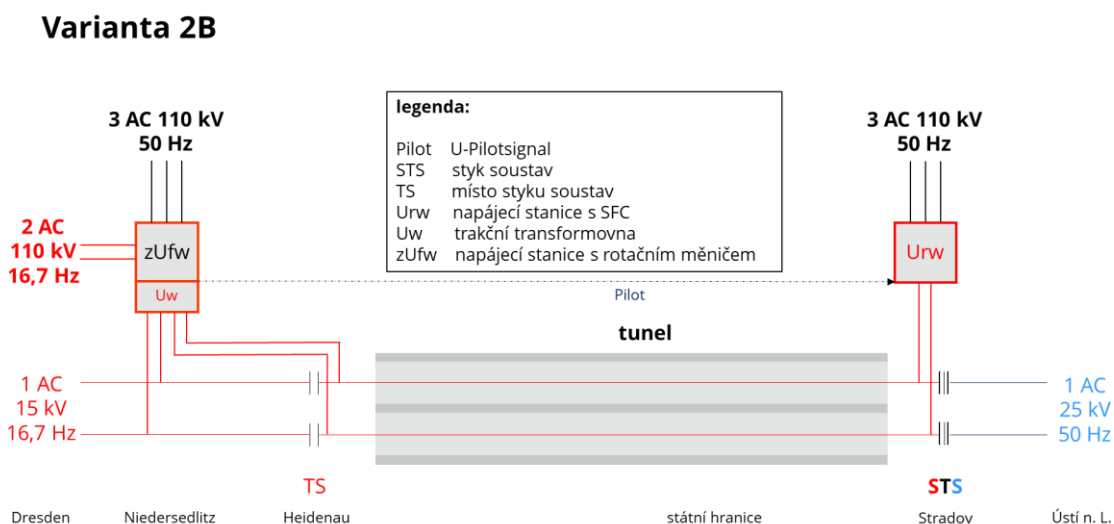


obrázek 3: varianta 1, styk soustav na vrcholu tunelu, jednostranné napájení tunelu z obou stran ze systémů AC 15 kV 16,7 Hz a AC 25 kV 50 Hz

U variant 2 a 3 se rozlišuje mezi jednostranným (A) a oboustranným (B) napájením Krušnohorského tunelu.

Na základě výsledků simulace varianty 1 lze **variantu 2A** (styk soustav v ČR, jednostranné napájení tunelu z DE ze systému AC 15 kV 16,7 Hz) z důvodu nízkých hodnot úrovně napětí rovnou vyloučit. Soustava autotransfómátóřů s 2 AC 2x15 kV 16,7 Hz, která je v tunelu sice technicky proveditelná, ale velmi náročná, je rovněž vyloučena.

Pro trakční elektrickou síť v Krušnohorském tunelu se stykem soustav v České republice se zvažuje pouze oboustranné napájení soustavou AC 15 kV 16,7 Hz (**varianta 2B**) (viz obrázek 4). Ta je napájena ze stávající trakční transformovny v Drážďanech-Niedersedlitz a z nové 16,7 Hz napájecí stanice s SFC v blízkosti českého portálu tunelu. Pro paralelní chod trakční transformovny a napájecí stanice s SFC se předpokládá řízení napěťovým pilotním signálem, s nímž má německá strana ve srovnatelných napájecích konfiguracích dlouhodobé pozitivní provozní zkušenosti.



obrázek 4: varianta 2B, styk soustav v CZ, oboustranné napájení tunelu systémem AC 15 kV 16,7 Hz

Stejně jako variantu 2A lze **variantu 3A** (styk soustav v DE, jednostranné napájení z CZ systémem AC 25 kV 50 Hz) z důvodu špatné údržby napětí vyloučit. I zde je vyloučena soustava autotransfómátóřů s 2 AC 2x25 kV 50 Hz.

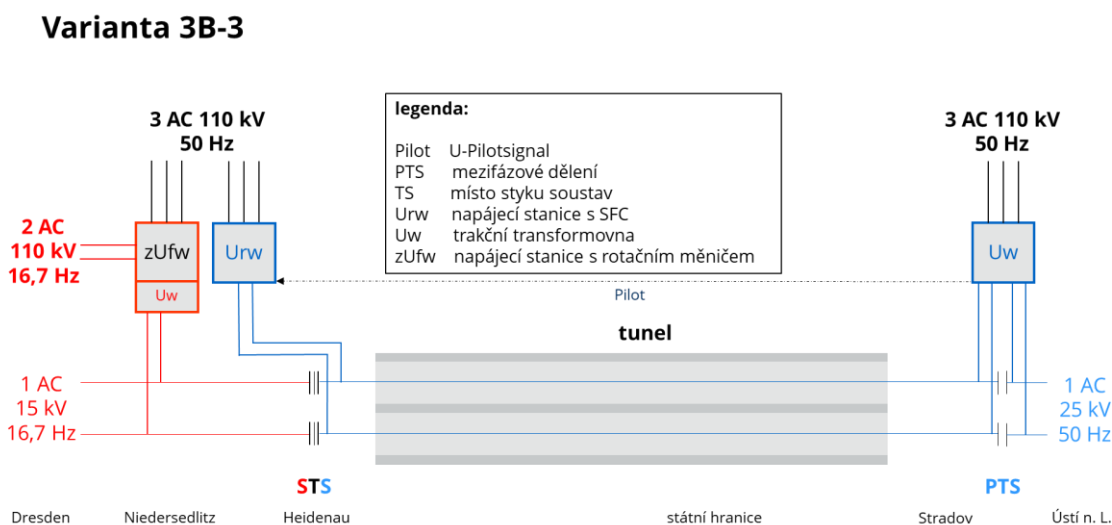
Pro **variantu 3B** existuje několik technicky možných podvariant se stykem soustav v DE, které napájejí Krušnohorský tunel buď z obou stran jednostranně, nebo oboustranně s AC 25 kV 50 Hz.

V nejjednodušším případě jsou na obou stranách tunelu klasické 50 Hz trakční transformovny. Pro připojení těchto transformoven v Německu a v České republice jsou použity dvě různé 110 kV-sítě, které jsou od sebe prostorově daleko vzdáleny, čímž nelze

zaručit stejnou polohu fází. Z tohoto důvodu vyžaduje tato podvarianta kromě styku soustav v Německu také mezifázové dělení v tunelu (**varianta 3B-1**), což má za následek provozní nevýhodu struktury dvojitého neutrálního úseku. Kromě toho lze z obou stran realizovat pouze jednostranné napájení. Taková možnost byla v zásadě zkoumána již u varianty 1, která byla vyhodnocena jako nevýhodná. Tato podvarianta proto nebude dále zkoumána.

Bez mezifázového dělení v tunelu by došlo k trvalému propojení napájecích 110 kV/50 Hz sítí prostřednictvím 25 kV trakčního vedení, což by mohlo vést k nežádoucímu přenosu výkonu. To by vyžadovalo použití speciálních transformátorů v trakčních transformovných (**varianta 3B-2**), pro které v železničním sektoru neexistují žádné reference ani zkušenosti. Tato podvarianta je proto rovněž vyloučena jako nevýhodná.

Použití 50 Hz napájecí stanice s SFC v Německu propojené s 50 Hz trakční transformovnou v České republice pomocí řízení napětovým pilotním signálem (**varianta 3B-3**, viz obrázek 5) vylučuje problém přímého propojení sítí na úrovni 110 kV skrze 25 kV trakční vedení. Dále není potřeba mezifázového dělení na vrcholu tunelu, to vede k výhodnému oboustrannému napájení tunelu. Německo má dlouholeté zkušenosti s řízením napětovým pilotním signálem ze sítě 16,7 Hz, které lze na napájení s 50 Hz přímo přenést.



obrázek 5: varianta 3B, styk soustav v DE, oboustranné napájení tunelu systémem AC 25 kV 50 Hz

2.2 Metodika

Na základě VAsť (zadání z dopravního hlediska, [3]) a vědeckého posouzení železničního provozu (EBWU) [4] byly pro tunel vytvořeny provozní koncepty, které jsou modelovány na základě železničního provozu a jízdní dynamiky, a to za pomoci komerčního softwaru OpenTrack [5] metodou časového kroku. Zkoumány byly denní i noční jízdní řády s normálním a worst-case provozem (doba maximálního vytížení) za předpokladu typických dat vozidel a pohonu a následně byla určena nejvyšší zatížení.

Následující tabulka 1 znázorňuje zkoumané provozní programy modelu.

tabulka 1: počet vlaků v jednotlivých směrech

kategorie dopravy	běžný provoz, denní jízdní řád	worst-case provoz, noční jízdní řád
dálková	1 za 60 minut	-
osobní	1 za 120 minut	-
nákladní	4 za 60 minut	12 za 60 minut

Krušnohorský tunel je v noci využíván výhradně nákladní dopravou. Z nočního jízdního řádu s worst-case provozem a hustým 5minutovým taktem vychází nejvyšší dopravní zatížení s nejvyšším celkovým množstvím energie v síti a určuje tak potřebný návrh/konstrukci systému. Dennímu jízdnímu řádu v běžném provozu dominuje vysoký výkon jednotlivých vozidel a charakterizuje energeticky trvalý provoz.

Trakční elektrická síť byla modelována ko-simulací v programu OpenTrack [5] (simulace železničního provozu) a v komerčním softwaru OpenPowerNet [6]. Výsledné toky elektrického zatížení v elektrických energetických zařízeních byly vypočteny kvazistacionárně.

K validaci provozních programů jsou pro zkoumané varianty díky propojeným simulacím k dispozici jednak jízdní diagramy všech vlaků, tak i všechny napěťové, proudové a výkonové křivky v čase a místě, a to včetně příslušných energií a ztrátových bilancí. Výsledky simulace umožňují vysoce kvalitativní a kvantitativní srovnání analyzovaných provozních konceptů a návrhů elektrické trakční soustavy. Pro následné elektrotechnické vyhodnocení byla vzata v úvahu technicko-ekonomická kritéria.

3 Kritéria hodnocení a výsledky

3.1 Kritéria hodnocení

Zkoumání variant pro posouzení technické proveditelnosti, výkonnosti, energetické hospodárnosti a disponibility budoucí elektrické trakční soustavy vychází z následujících normativních a ekonomických kritérií:

1. údržba napětí
 - a. minimální napětí na sběrači proudu podle DIN EN 50163
 - b. průměrné využitelné napětí na sběrači proudu podle DIN EN 50388-1
2. zatížení a proudová zatížitelnost trakčního vedení a kabelů
3. energetické ztráty trakční soustavy od trakční transformovny/napájecí stanice s SFC

Vzhledem k rané fázi projektu (předběžné plánování) nebylo při analýze trakční elektrické sítě Krušnohorského tunelu prozatím provedeno posouzení stávajících sítí, včetně návrhu trakčních transformoven a dimenzování komponentů. Kromě strukturálního a provozního posouzení trakční elektrické sítě se při zkoumání technické proveditelnosti přeshraničního úseku trasy klade důraz především na požadavky na výbavu trakčního vedení, které musí být pro další fáze plánování včasné stanovené.

3.2 Výsledky

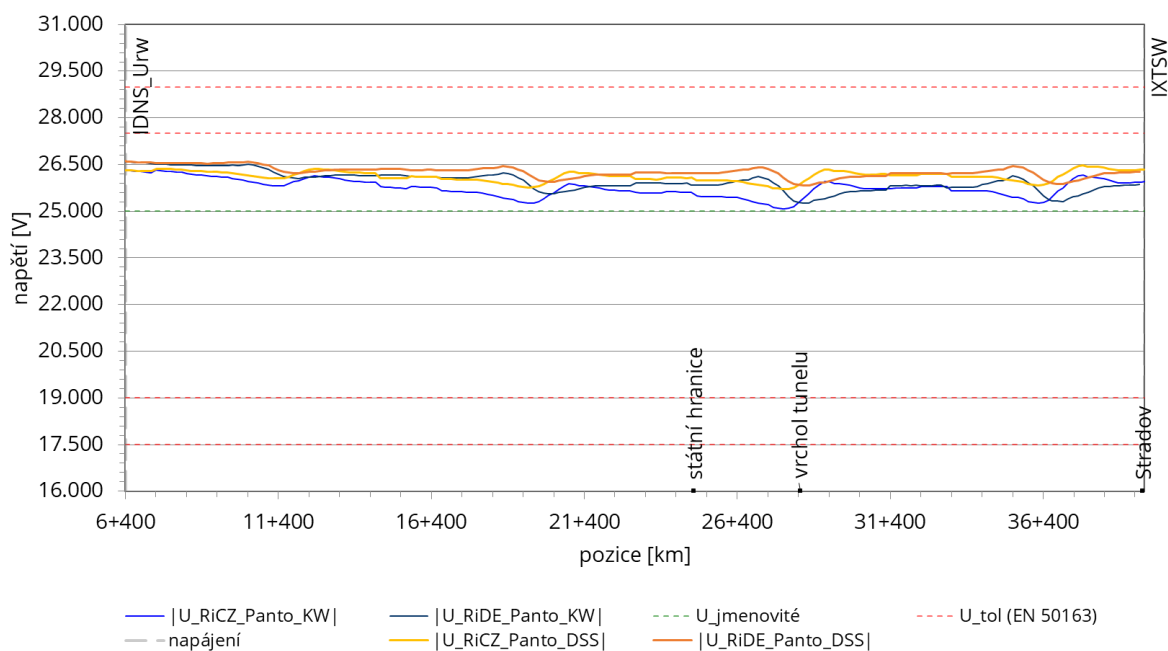
Za účelem posouzení **údržby napětí** trakční soustavy v souladu s platnými normami DIN EN 50163 a DIN EN 50388-1 bylo pro všechny úseky trakčního vedení provedeno vyhodnocení (v závislosti na poloze) napěťových křivek všech vozidel v závislosti na čase. To ukázalo, že minimální napětí vyskytující se na sběrači je u všech analyzovaných variant jak při normálním provozu, tak při worst-case provozu v normativních mezích. Oboustranné napájení vede v tunelu ve všech provozních případech k výrazně stabilnějším napěťovým poměrům, a to jak pro pružné trolejové vedení, tak i pro trolejové vedení s přívodní kolejnicí.

Dimenze a konstrukce systému je s ohledem na průměrné využitelné napětí $U_{\text{mean useful}}$ podle normy EN 50388 pro dané varianty dostatečně vyměřená.

Ve variantě 1A s pružným trolejovým vedením ve worst-case provozu je hodnota průměrného využitelného napětí o 3 V nižší než předepsaná normativní hodnota, což je však vzhledem ke zvoleným restriktivním vstupním parametrům zanedbatelné. Ve všech ostatních případech je hodnota nad předepsanou normativní hodnotou.

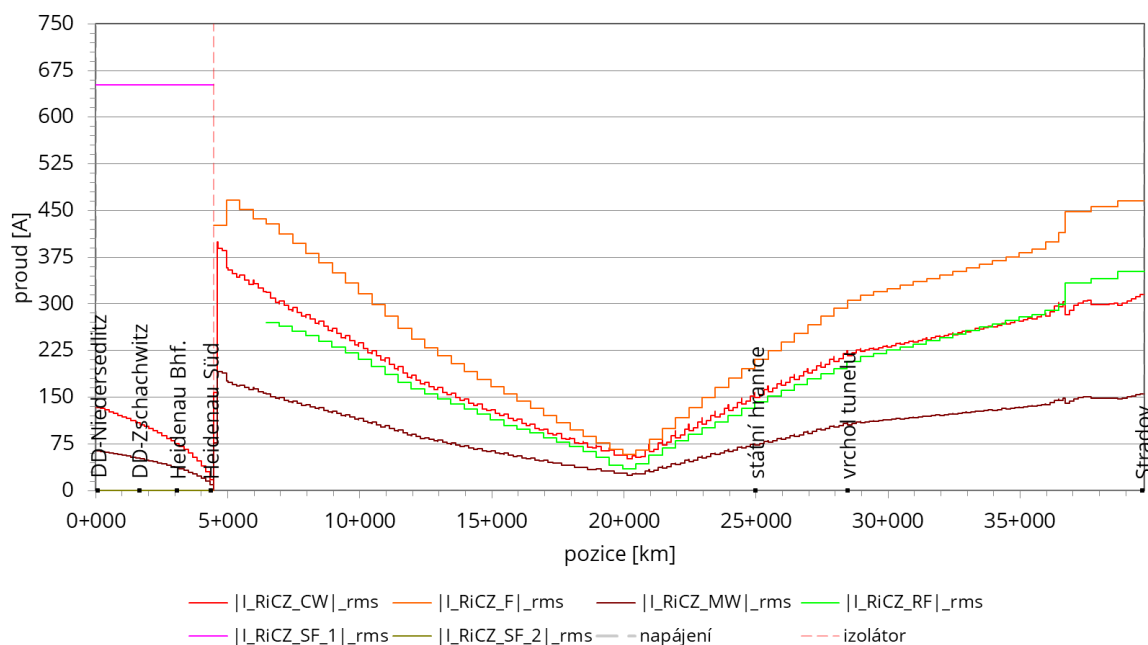
Požadavky na údržbu napětí jsou **nejlépe** splněny u **varianty 3B-3** (styk soustav v DE, oboustranné napájení s jmenovitým napětím 25 kV, 50 Hz), a to jak v běžném, tak ve worst-case případě.

Následující obrázek (viz obrázek 6) znázorňuje křivky minimálního napětí v závislosti na místě, které se vyskytují na sběračích všech vozidel během celého dvouhodinového simulačního období v závislosti na směru.



obrázek 6: srovnání údržby napětí pružného trolejového vedení vs. trolejového vedení s přívodní kolejní, varianta 3B-3 ve worst-case provozu, síťový úsek s 25 kV,
 legenda: KW – pružné trolejové vedení, DSS – trolejové vedení s přívodní kolejní, Ri – směr, U_{Panto} – napětí na sběrači proudu, U_{tol} – mezní hodnota napětí podle DIN EN 50163, $U_{mean\ useful}$ – průměrné využitelné napětí na sběrači proudu podle DIN EN 50388-1

Pro posouzení **zatížení systému trakčního vedení** byly stanoveny maximální proudy vyskytující se v elektrických vodičích pro časové rozsahy 1 s, 300 s a 900 s na základě jednotlivých variant (příkladné znázornění viz obrázek 7) a shrnuty v závislosti na čase.



obrázek 7: maximální zatěžovací proudy (trakčního a napájecího vedení) ve variantě 2B s pružným trolejovým vedením
 legenda: CW – trolejový vodič, MW – nosné lano, RF – zpětné vedení, SF – napájecí vedení, F – zesilovací vedení

Poté byl vypočten podíl příslušné maximální hodnoty proudu a proudové zatížitelnosti. Tento koeficient využití je uveden v následující tabulce (viz tabulka 3) a je znázorněn barevně.

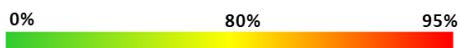
Zjištěná hodnota pro časový rozsah 900 s byla posouzena s hodnotou trvalé proudové zatížitelnosti (viz tabulka 2). Hodnota rozsahu 300 s byla posouzena s 1,3násobkem trvalé hodnoty a špičková hodnota rozsahu 1 s s dvojnásobkem trvalé hodnoty. Zejména v krátkodobém časovém rozsahu 1 s jsou hodnoty proudové zatížitelnosti ve skutečnosti řádově vyšší než dvojnásobek. Tento zjednodušený přístup byl zvolen v současné fázi plánování, protože nebylo nutné provádět složité výpočty proudové zatížitelnosti s termodynamickými vstupními parametry, které jsou rovněž dosud neznámé. Odhadované hodnoty proudové zatížitelnosti platí pro frekvenci 16,7 Hz. Při frekvenci 50 Hz se hodnoty mírně snižují. Vzhledem k vyššímu jmenovitému napětí v systému 50 Hz jsou však proudy při stejném výkonu nepoměrně nižší, takže byly jako hrubý odhad použity stejné hodnoty proudové zatížitelnosti jako pro 16,7 Hz.

tabulka 2: trvalá proudová zatížitelnost vodičů

	trvalá proudová zatížitelnost v A
Re 250 se zesilovacím vedením	1.230
přívodní kolejnice Sicat SR s trolejovým vodičem AC-120	3.446
2xAl 240 (svazek vodičů)	1.378

tabulka 3: využití proudové zatížitelnosti trakčního a napájecího vedení

legenda: DSS – trolejové vedení s přívodní kolejnicí, Ri – směr, SL – napájecí vedení

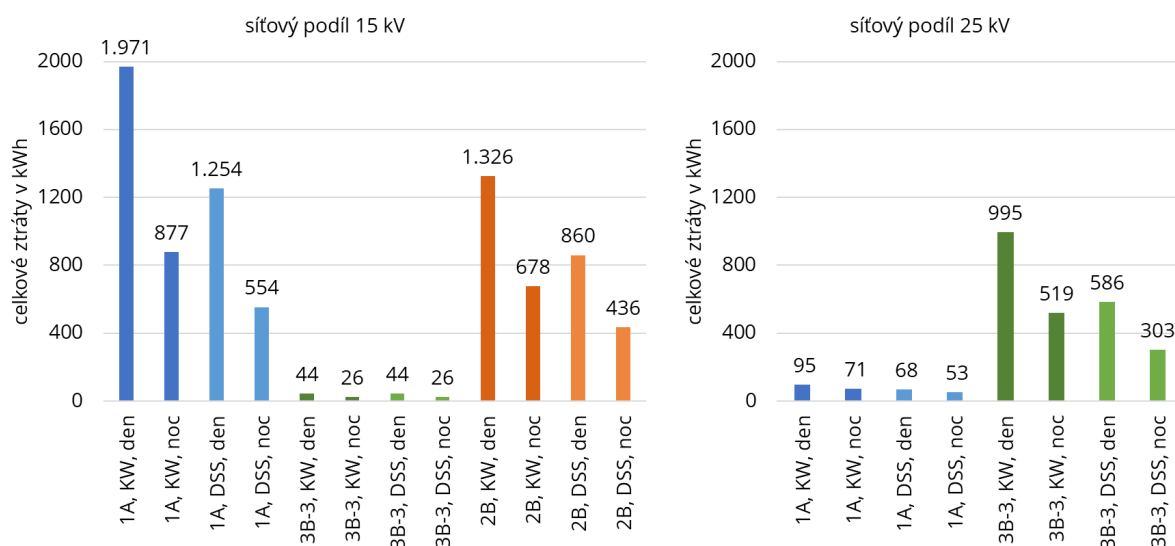


					15 kV								25 kV				
využití proudové zatížitelnosti v %					Re250+VL		SL 1		DSS		SL 1		Re250+VL		DSS		
	jízdní řád		varianta	časový rozsah	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	
styk soustav na vrcholu tunelu	den	normální provoz	1A	1 s	84%	76%	51%	54%	26%	25%	56%	59%	29%	36%	7%	10%	
				300 s	88%	81%	67%	71%	29%	26%	66%	69%	18%	25%	6%	8%	
				900 s	75%	69%	57%	60%	25%	21%	56%	59%	19%	22%	6%	7%	
	noc	worst-case provoz		1 s	78%	64%	53%	57%	26%	21%	57%	61%	25%	27%	7%	7%	
				300 s	89%	75%	63%	67%	28%	20%	61%	65%	17%	21%	5%	5%	
				900 s	116%	98%	82%	87%	37%	25%	80%	84%	22%	28%	7%	7%	
styk soustav DE	den	normální provoz	3B-3	1 s	66%	30%								43%	34%	13%	10%
				300 s	20%	16%								52%	40%	17%	13%
				900 s	17%	17%								45%	37%	15%	12%
	noc	worst-case provoz		1 s	30%	22%							52%	29%	16%	9%	
				300 s	13%	16%							58%	35%	19%	11%	
				900 s	17%	21%							75%	46%	25%	15%	
styk soustav CZ	den	normální provoz	2B	1 s	62%	55%	24%	25%	16%	17%	24%	25%					
				300 s	57%	44%	34%	36%	18%	20%	34%	35%					
				900 s	48%	39%	32%	34%	16%	17%	32%	33%					
	noc	worst-case provoz		1 s	59%	34%	27%	29%	20%	13%	27%	29%					
				300 s	65%	44%	37%	39%	20%	15%	37%	39%					
				900 s	83%	57%	48%	50%	26%	20%	47%	50%					

Výsledky ukazují, že **proudová zatížitelnost** pružného trolejové vedení je při jednostranném napájení německou úrovní jmenovitého napětí (varianta 1A) hraniční až nedostatečná. Ve variantě 1A s pružným trolejovým vedením je zatížení při nočním worst-case provozu nepřijatelně vysoké. Již při běžném provozu je v této variantě využití proudové zatížitelnosti nejvyšší.

Ve variantě 3B-3 má analyzované trakční vedení v oblasti tunelu (pružné trolejové vedení a trolejové vedení s přívodní kolejnicí) dostatečnou proudovou zatížitelnost ve srovnání s proudy vyskytujícími se za provozu.

Cílem **energetické analýzy** je posouzení celkové potřeby energie pro jednotlivé varianty a stanovení energetických ztrát trakční soustavy. Za tímto účelem byly ze simulací pro dvouhodinové simulační období a normální provoz podle EBWU stanoveny ztráty systému trakčního vedení. Ty jsou porovnány na následujícím obrázku (viz obrázek 8), přičemž jsou rozdílné celkové ztráty konkrétních variant způsobeny rozlišně dlouhými podíly tratě v elektrických sítích s různým jmenovitým napětím 15 kV a 25 kV.



obrázek 8: celkové ztráty trakčního vedení (simulační období 2 h, normální provoz podle EBWU)
 legenda: varianta (1A, 2B, 3B-3) dle kapitoly 2.1, KW – pružné trolejové vedení,
 DSS – trolejové vedení s přírodní kolejnicí

Pro zaručení přímé srovnatelnosti energetických ztrát pro 24hodinový provoz je jako základ srovnání potřeba použít stejný denní dopravní výkon. Na základě denních jízdních řádů EBWU byl pro každý jízdní směr stanoven počet vlaků v jednotlivých třídách. Pro každou vlakovou třídu (dálková, osobní, nákladní) byla pro každou konkrétní variantu stanovena jak dopravní práce v tunokilometrech, tak i spotřeba energie na sběrači z případu normálního provozu ve dne i v noci v závislosti na elektrické síti a směru. Z energie spotřebované na sběrači a ztrát v trakčním vedení byl vytvořen poměr, který byl použit ke stanovení celkových energetických ztrát. Výsledná chyba způsobená specifickými nižšími ztrátami při lepší udržitelnosti napětí ve srovnání se simulovanou špičkovou hodinou je na bezpečné straně a v analýze se zanedbává. Jednotlivé výsledky jsou pak pro každou variantu shrnuty ve vztahu k hodnotám 24hodinového provozu, celkovým ztrátám trakčního vedení, k hodnotám denního dopravního výkonu a celkové potřebě energie spotřebované energie na sběrači.

Při běžném provozu je během 24 h dosaženo přibližně 14 143 940 tkm přepravního výkonu. Modelované jízdy přitom spotřebují na sběrači absolutní energii přibližně 426 101 kWh.

Na základě simulovaných výsledků lze stanovit celkovou potřebu energie od výstupu trakční transformovny (viz tabulka 4) a energetické ztráty trakčního vedení pro provozní program jednoho dne podle EBWU (viz tabulka 5) a porovnat je mezi jednotlivými typy trakčního vedení. Maxima a minima příslušných hodnot jsou barevně zvýrazněna.

tabulka 4: celková potřeba energie od výstupu trakční transformovny za 24 h

legenda: KW – pružné trolejové vedení, DSS – trolejové vedení s přívodní kolejnicí

varianta	E_{KW}	E_{DSS}	$E_{KW} - E_{DSS}$	$(E_{KW} - E_{DSS}) / E_{KW}$
1A	442.312 kWh	436.375 kWh	5.937 kWh	1,34 %
2B	438.054 kWh	434.033 kWh	4.021 kWh	0,92 %
3B-3	434.089 kWh	430.826 kWh	3.263 kWh	0,75 %
	max	min	max-min	(max - min) / max
extrémní hodnoty	442.312 kWh	430.826 kWh	11.486 kWh	2,60 %

tabulka 5: energetické ztráty trakčního vedení za 24 h

legenda: KW – pružné trolejové vedení, DSS – trolejové vedení s přívodní kolejnicí, V – ztráty

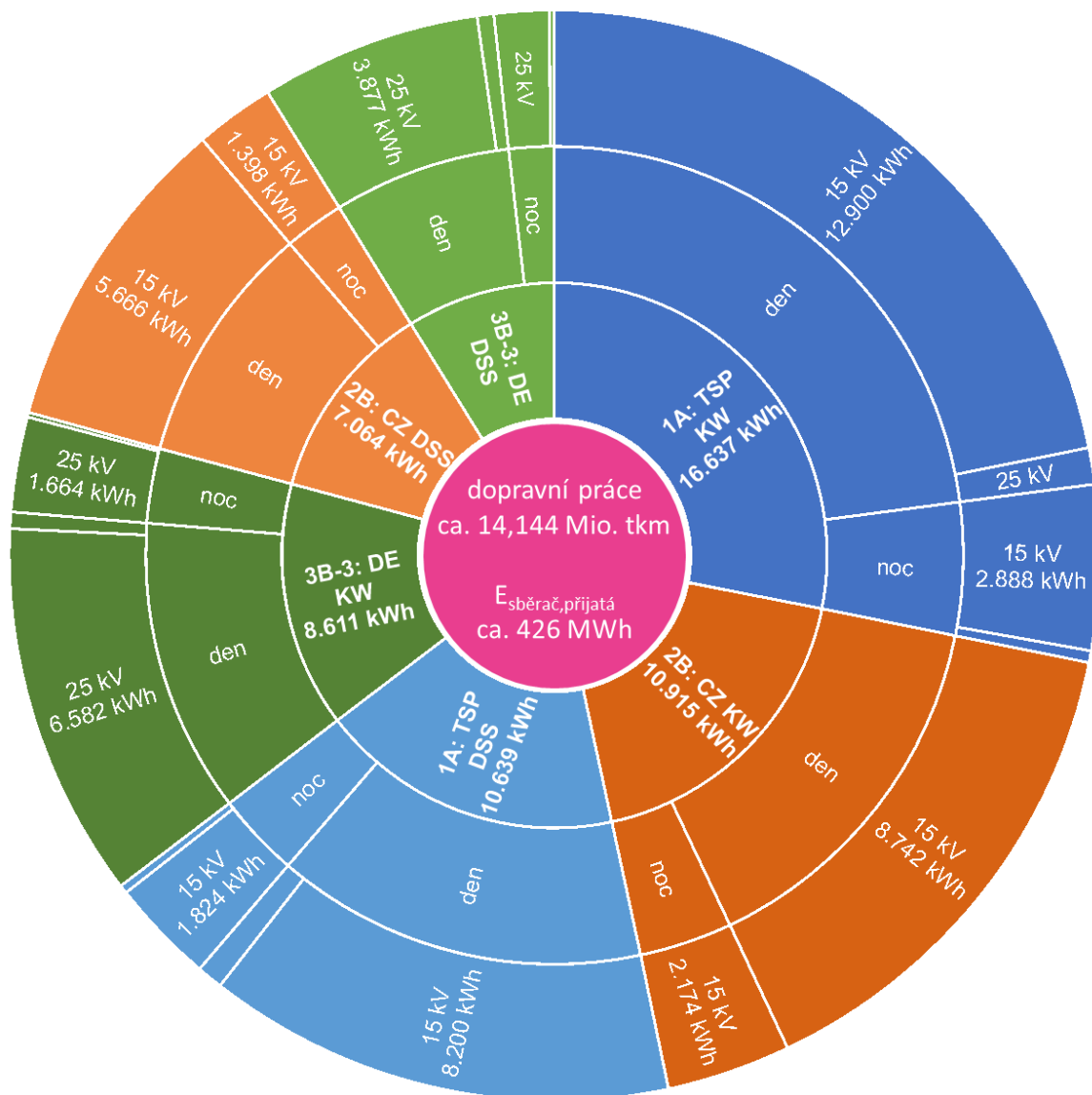
varianta	$E_{KW,V}$	$E_{DSS,V}$	$E_{KW,V} - E_{DSS,V}$	$(E_{KW,V} - E_{DSS,V}) / E_{KW,V}$
1A	16.637 kWh	10.639 kWh	5.998 kWh	36,05 %
2B	10.915 kWh	7.064 kWh	3.851 kWh	35,28 %
3B-3	8.611 kWh	5.213 kWh	3.398 kWh	39,46 %
	max	min	max-min	(max - min) / max
extrémní hodnoty	16.637 kWh	5.213 kWh	11.424 kWh	68,67 %

Následující sunburst diagram (viz obrázek 9) ukazuje hierarchické porovnání variantních energetických ztrát trakční soustavy pro 24hodinový provoz se specifickým podílem denní doby a elektrické sítě. Uvnitř kruhu jsou vyneseny dopravní práce a přijatá energie na sběrači. Z provozního programu vyplývá, že je pro všechny varianty stejná a umožňuje tak přímé srovnání zkoumaných variant. Varianty jsou zobrazeny ve směru hodinových ručiček, počínaje variantou s nejvyššími energetickými ztrátami trakčního vedení (varianta 1A s pružným trolejovým vedením) a konče variantou s nejnižšími energetickými ztrátami trakčního vedení (varianta 3B-3 s trolejovým vedením s přívodní kolejnicí).

Po analýze výsledků simulace lze odvodit následující tvrzení:

- Energetické ztráty specifické pro danou variantu jsou vždy nižší, pokud je použito trolejové vedení s přívodní kolejnicí než v případě konfigurace s pružným trolejovým vedením.
- Varianty s oboustranným napájením mají v obou systémech trakčního vedení vždy nižší ztráty než varianty s jednostranným napájením.
- Varianty, které mají větší síťové podíly s vyšším jmenovitým napětím (25 kV), mají vždy nejnižší ztráty.
- Použití trolejového vedení s přívodní kolejnicí snižuje v závislosti na variantě úroveň ztrát přibližně o 35 až 39 % v porovnání s pružným trolejovým vedením.
- Celková potřeba energie se za použití trolejového vedení s přívodní kolejnicí snižuje maximálně o 1,34 % (jednostranné napájení) nebo 0,92 % (oboustranné napájení) ve srovnání s pružným trolejovým vedením.
- Varianta s minimálními ztrátami (3B-3, oboustranné napájení, trolejové vedení s přívodní kolejnicí) snižuje úroveň ztrát o 68,67 % a celkovou potřebu energie o 2,60 % ve srovnání s původní variantou (1A, jednostranné napájení, pružné trolejové napájení).

Energeticky nejefektivnější konfigurací ze všech analyzovaných variant je varianta 3B-3 s trolejovým vedením s přívodní kolejnicí. Tato varianta má nejnižší celkové ztráty trakčního vedení, a tedy i nejnižší absolutní celkovou potřebu energie ve srovnání se všemi analyzovanými variantami. **Varianta 3B-3 s trolejovým vedením s přívodní kolejnicí je proto z elektrotechnického hlediska preferovanou variantou.**



den	25 kV	637 kWh
noc	25 kV	212 kWh
den	25 kV	457 kWh
noc	25 kV	158 kWh
den	15 kV	281 kWh
noc	15 kV	83 kWh
den	15 kV	281 kWh
noc	15 kV	83 kWh
	25 kV	971 kWh

obrázek 9: hierarchické porovnání variantních energetických ztrát trakční soustavy (24hodinový provoz s podílem denní doby se elektrické sítě)
legenda: TSP – vrchol tunelu, KW – pružné trolejové vedení, DSS – trolejové vedení s přívodní kolejnicí

4 Doporučení a potřeba dalšího šetření

Vzhledem k lepší údržbě napětí, vyšší proudové zatížitelnosti a nižší ztrátovosti (za předpokladu stejného průřezu tunelu) se doporučuje oboustranné napájení Krušnohorského tunelu.

Provedené simulace ukázaly, že jako preferovanou elektrotechnickou variantu lze doporučit variantu 3B-3 s oboustranným napájením AC 25 kV 50 Hz z trakční transformovny v České republice a napájecí stanicí s SFC v Německu (styk soustav u portálu tunelu v Německu). Vzhledem k umístění styku soustav v Německu je třeba při rozhodování o variantě zohlednit další kritéria (např. nájezd nákladního vlaku na stoupání před portálem tunelu nebo délka styku soustav při ručním ovládání hlavního vozidlového vypínače).

Vzhledem k výrazně lepší údržbě napětí a výrazně nižším ztrátám na vedení se z elektrotechnického hlediska zásadně doporučuje oboustranné napájení Krušnohorského tunelu.

Oboustranné napájení Krušnohorského tunelu však představuje výzvu, protože napájení na rozdílných státních území zajišťují dva různí provozovatelé (DB AG a Správa železnic). Například by bylo nutné objasnit otázky spojené s vlastnictvím elektrotechnických zařízení na území obou států (včetně přístupových a spínacích oprávnění pro 50 Hz napájecí stanici s SFC v Německu nebo 16,7 Hz napájecí stanici s SFC v České republice). Vzhledem k rozdílným předpisům obou provozovatelů je třeba zkoordinovat a dohodnout rozhraní, oblasti působnosti a příslušnosti. Kromě toho je vzhledem ke specifickým energetickým tarifům a daňovému vyúčtování v jednotlivých zemích nutný společný model cen elektřiny nebo rozdělení vyúčtování energií.

Kromě problému managementu tohoto rozhraní je třeba analyzovat ekonomickou efektivnost oboustranného napájení kvůli

- pouze malému snížení úrovně ztrát a
- pravděpodobně nedostatečné návratnosti investice do zařízení ve srovnání s úsporami plynoucími z nižších energetických ztrát v průběhu životního cyklu zařízení.

Pro nadcházející fáze plánování se mimo to doporučují následující technické analýzy:

- podrobné posouzení stavů při výpadku/selhání, zejména s ohledem na bezpečnost v železničním tunelu / záchranný koncept tunelu, údržbu a provoz se sníženým výkonem;
- návrh a podrobné posouzení elektrické rozvodné sítě na české straně, zejména pro uzel Ústí n. L. a plánovanou novou trať Ústí n. L. - Praha, s ohledem na přechod z DC 3 kV na AC 25 kV 50 Hz, začlenění výkonnějších trakčních transformoven (které budou zbudovány) do elektrizační sítě (případně s asymetrií) a možné druhy napájení (konvenční napájení s transformátory a mezifázovým dělením versus napájení pomocí napájecích stanic s SFC).

Seznam použité literatury

- [1] *Inge Planung*: NBS Dresden - Prag: PA 2 – Erzgebirgsbasistunnel, Rettungskonzept, 2023.
- [2] Fišer, Anna: Variantenuntersuchung zur Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels auf der geplanten Neubaustrecke Dresden – Prag unter Nutzung von Simulationsverfahren. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik. Diplomarbeit. 2023
- [3] *Menz; Prien*: Verkehrliche Aufgabenstellung für Strecken und Knoten Neubaustrecke Dresden - Prag im Abschnitt Heidenau - Ústí nad Labem, 2021.
- [4] *DB Netz AG (Hrsg.)*: EBWU NBS Dresden - Prag: Soll-Betriebsprogramm auf Soll-Infrastruktur, 2020.
- [5] <http://www.opentrack.ch>
- [6] <https://www.openpowernet.de>
- [7] IFB Institut für Bahntechnik GmbH: Untersuchung Bahnenergieversorgung Erzgebirgstunnel Strecke Dresden – Prag. Bericht Nr. 2024-712030-699.0. 2024