Projekt Modernizace trati Praha-Výstaviště – Praha-Veleslavín

Odborné posouzení

jménem Správy železnic

Část II – Posouzení variant vedení trasy

Revize: 01

Datum: 3. září 2020

Vypracovali: Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes
ve spolupráci se společností Maidl Tunnelconsultants

Dr.-Ing. Janosch Stascheit

Dipl.-Ing. Stefan Hintz

MSc. Artem Syomik

DocID: PTPVA201_AR_II_01

Č. revize	Datum	Poznámka
00	28.7.2020	Zpráva - Část II
01	3.9.2020	Finální verze

Obsah

1 Úvod a cíl ... 4
1.1 Představení projektu ... 4
1.2 Cíl a rozsah této zprávy ... 4
2 Referenční dokumenty ... 5
2.1 Projektová dokumentace pro studii proveditelnosti ... 5
2.2 Příslušné předpisy, normy a doporučení ... 6
3 Popis a charakteristika variant vedení trasy ... 7
3.1 HLOUBENÁ varianta ... 7
3.1.1 Hloubené úseky ... 8
3.1.2 Úseky tunelované metodou NRTM a metodou želvy ... 10
3.1.3 Okolí ... 12
3.2 Ražené varianty tunelu ... 12
3.2.1 Varianta SEVER ... 12
3.2.2 Varianta STŘED ... 12
3.2.3 Varianta JIH ... 13
4 Metody tunelování a jejich související rizika ... 13
4.1 Hloubené tunely ... 13
4.1.1 Úsek SO 06-171-001 (km 4+030 až 4+760) ... 13
4.1.2 Úsek SO 06-171-002 (km 5+750 až 6+602) ... 15
4.1.3 Úsek SO 06-171-003 (km 7+000 až 7+672) ... 15
4.1.4 Shrnutí hloubených metod ... 15
4.2 Tradiční (NRTM) tunelování ... 16
4.2.1 Metoda výstavby ... 16
4.2.2 Související rizika ... 16
4.2.3 Shrnutí metody NRTM ... 18
4.3 Metoda želvy ... 18
4.4 Mechanizované tunelování (EPB) ... 18
4.4.1 Metoda výstavby ... 18
4.4.2 Související rizika ... 19

5 Numerická analýza sedání ... 21
5.1 Obecný přístup k modelování ... 21
5.2 Hloubené úseky ... 22
5.3 Tunely ražené metodou NRTM ... 23
5.4 Mechanizovaně ražené tunely ... 25
5.4.1 Přístup k modelování ... 25
5.4.2 Výsledky simulace ... 26
5.5 Posouzení výsledků simulace ... 27
6 Další otázky týkající se konkrétních témat ... 29
6.1 Průchod TBM zlomovými pásmy a případné propojení zvodní ... 29
6.2 Výstavba odvětrávacích šachet ... 29
6.3 Další geotechnický průzkum v příští fázi projektu ... 30
6.4 Monitorování povrchu terénu pomocí satelitu ... 31
6.5 Vibrace z tunelování TBM ... 32
6.6 Způsob provozu TBM pro minimalizaci sedání ... 32
7 Porovnání variant vedení trasy ... 33
7.1 Vliv tunelování na konkrétní objekty v oblasti ... 33
7.2 Rizika související s variantami vedení trasy ... 34
7.3 Porovnání variant ... 36
8 Závěrečné poznámky ... 37

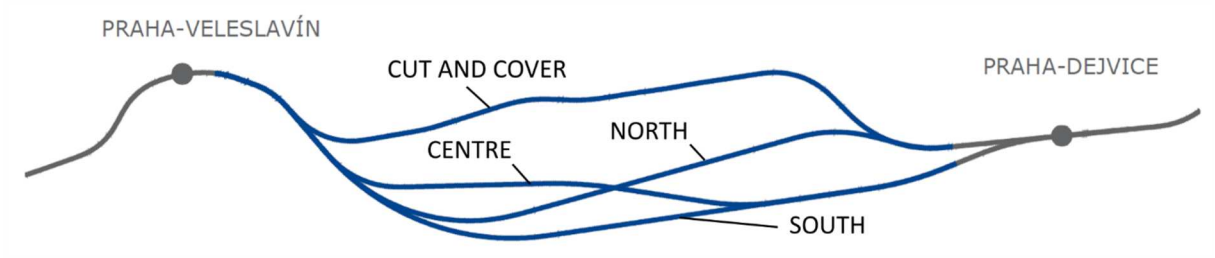
1 Úvod a cíl

1.1 Představení projektu

V rámci železničního spojení mezi centrem Prahy, pražským mezinárodním letištěm a Kladnem je v současnosti zkoumána možnost modernizace a rozšíření stávající železniční trati v úseku Praha-Dejvice a Praha-Veleslavín (dále jen „Projekt“).

Aktuální studie proveditelnosti bere v úvahu pět variant: (1) rozšíření stávající povrchové jednokolejné trati; (2) mělké podzemní vedení trasy kopírující stávající trať (HLOUBENÁ varianta); a (3/4/5) tři různé ražené varianty tunelů (SEVER, STŘED a JIH), které se odchylují od současného vedení trasy a vedou hluboko pod zemským povrchem.

Z důvodu možného zásahu do okolních rezidenčních oblastí podél železniční trati byla již v minulosti vyloučena povrchová varianta. V současné době se zvažují čtyři zbývající varianty (HLOUBENÁ, SEVER, STŘED a JIH) (viz Obrázek 1).



Obrázek 1: Varianty vedení trasy (nákres převzatý z [2], doplněny popisky)

HLOUBENÁ varianta se drží současného vedení trasy železniční trati. Ražené varianty tunelu mají tři různá vedení trasy jižně od stávající železniční trati.

1.2 Cíl a rozsah této zprávy

Autoři Zprávy byli pověřeni Správou železnic, vlastníkem projektu, aby zajistili odborné posouzení čtyř aktuálně zvažovaných variant tunelu pro železniční trať v úseku Praha-Dejvice a Praha-Veleslavín.

Autoři byli zejména požádáni, aby uvedli své stanovisko k těmto třem bodům:

1) Dostatečnost provedených geotechnických průzkumů a jejich interpretace pro výběr preferované varianty vedení tunelu.
2) Technické posouzení všech čtyř variant z hlediska geotechnických rizik, vlivu na okolí a technické vhodnosti. Na základě tohoto posouzení bude uvedeno, která varianta je upřednostňována.
3) Odpověď na několik otázek týkajících se konkrétních témat, které vznesl zadavatel.

Část I naší Zprávy se zabývala prvním z výše uvedených bodů a posuzovala geotechnický průzkum z hlediska vhodnosti a dostatečnosti. Další dva body jsou řešeny v této druhé části naší Zprávy.

Posouzení se zaměřuje na hodnocení vlivu různých tunelových variant na okolí. Z tohoto důvodu byl kladen zvláštní důraz na numerickou analýzu sedání ve dvanácti příčných řezech těchto čtyř variant vedení trasy.

2 Referenční dokumenty

2.1 Projektová dokumentace pro studii proveditelnosti

[1.1] Studie proveditelnosti Železniční spojení Prahy, Letiště Ruzyně a Kladno, Metroprojekt Praha, 2016 (v češtině), ID dokumentu: 16 7021 007 01 03 00 000.

[1.2] Modernizace trati Praha-Výstaviště (mimo) - Praha-Veleslavín (mimo) - studie „Srovnání variant tunelových řešení v úseku Praha-Dejvice – Praha-Veleslavín“, Metroprojekt Praha, 02/2020, anglická verze, ID dokumentu: 18 7461 22 01 00 00 000.

[1.3] Dodatek k úvodnímu projektu 03/2009 Modernizace trati Praha – Kladno s napojením na letiště Ruzyně, fáze I, Sdružení Metroprojekt Praha a SUDOP pro PRaK fáze I, 03/2009, části D (Geotechnický průzkum) a E (Stavební část) pro HLOUBENOU variantu.

[1.4] Modernizace trati Praha-Výstaviště (mimo) – Praha-Veleslavín (mimo), dílčí plnění předkládající technické řešení a geotechnický průzkum pro variantu raženou SEVER, „Společnost MP+SP – Výstaviště-Veleslavín“, (02/2019, v češtině) a anglický překlad zprávy z geotechnického průzkumu pro variantu SEVER (03/2019), ID dokumentu: 18 7461 06 08 01 004.2.

[1.5] Zpráva z geotechnického průzkumu pro ražený tunel, varianta JIH (08/2019), anglický překlad, ID dokumentu: 18 7461 04 02 01 07 006.01.

[1.6] Zpráva z geotechnického průzkumu pro odvětrávací šachtu, varianta JIH (11/2019), anglický překlad, ID dokumentu: 18 7461 04 02 01 07 009.01.

[1.7] Tři geologické řezy pro všechny varianty vedení trasy (měřítko 1:1000/500), včetně situačního plánu, podle e-mailu od společnosti Metroprojekt ze dne 18. května 2020.

[1.8] Vyjasnění otázek týkajících se regionální geologie Prahy, Metroprojekt, 05/2020, ID dokumentu: 18 7461 23 00 00 00 000.

[1.9] Tabulka shrnující laboratorní a terénní zkoušky provedené v každém vrtu – pro varianty raženého tunelu JIH a SEVER, Metroprojekt, 05/2020.

[1.10] Modernizace železniční trati Praha – Kladno s napojením na letiště Ruzyně, fáze 1, E. Stavební část, E.1 Inženýrské stavby, E.1.7 Železniční tunely, stavební oddíl 06 Dejvice – Veleslavín, 08 Veleslavín – Liboc. Technická zpráva, Metroprojekt Praha, 03/2009, anglická verze.

[1.11] Zpráva z geotechnického průzkumu pro ražený tunel, varianta STŘED (07/2020), Metroprojekt Praha, anglický překlad.

[1.12] Geotechnický podélný řez, HLOUBENÁ varianta, Metroprojekt, ID dokumentu: 07 4477 002 05 01 07 001.

[1.13] Geotechnické příčné řezy pro numerickou analýzu, připravené společností Metroprojekt.

2.2 Příslušné předpisy, normy a doporučení

[2.1] DIN EN 1997-1:2014-03, Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla; německá verze EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.

[2.2] DIN EN 1997-2:2010-10, Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy; německá verze.

[2.3] ČSN EN 1997-1, Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla.

[2.4] ČSN EN 1997-2, Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy.

[2.5] DIN 4020:2010-12: Geotechnický průzkum pro stavební účely – Doplňková pravidla k DIN EN 1997-2.

[2.6] DIN 18196:2011-05: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke (Zemní práce a základy – Klasifikace půd pro stavební účely).

[2.7] DIN 18312:2016-09: Německé stavební smlouvy (VOB) – Část C: Obecné technické specifikace ve stavebních smlouvách (ATV) – Podzemní stavební práce.

[2.8] Zpráva ITA o strategii pro geotechnický průzkum tunelových projektů.

[2.9] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (Německý výbor pro tunelování (ITA-AITES)): Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen (Doporučení pro výběr tunelovacích razicích strojů, v němčině), 2020.

[2.10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): „Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ – EANG“, ISBN: 978-3-433-03080-6 (2014).

[2.11] Burland, J. B., a Wroth, C. P. (1974). “Settlement of buildings and associated damage.” (Sedání objektů a související škody.) Proc., Conf. on Settlement of Structures, Pentech Press, Londýn, Anglie, 611-654.

3 Popis a charakteristika variant vedení trasy

Níže jsou stručně popsány charakteristiky čtyř variant posuzovaných v této zprávě (viz Obrázek 1).

3.1 HLOUBENÁ varianta

HLOUBENÁ varianta vede ve stopě stávající železniční trati v mělkém tunelu. Technický návrh této varianty [1.10] uvádí různé úseky tunelu (úseky s různými stavebními metodami), které využívají metod hloubení, nové rakouské tunelovací metody (NRTM) nebo tradiční české metody želva. Tunelové úseky a jejich příslušné stavební metody, definované v geotechnickém podélném řezu [1.12], uvádí Tabulka 1.

Jelikož se vedení trasy drží stávající železniční trati, není nutné zvažovat ohrožení stávajících staveb přímo nad tunelem. V přímém sousedství trasy se ale nachází několik objektů, které vyžadují zvláštní pozornost vzhledem k pohybům půdy vyvolaným výkopovými pracemi pro hloubené tunely. Výstavba železobetonových konstrukcí tunelu a stanic nespadá do rozsahu plnění této Zprávy. Pozornost této Zprávy je zaměřena na části tunelované metodou NRTM a na metody zajištění stavebních jam, a to zejména těch navržených jako vrtané pilotové stěny se střídavě rozloženým záporovým pažením nebo bez něj (metody A a B). Tyto stavební jámy jsou stavebně nejnáročnější a nesou s sebou největší rizika výstavby ve srovnání s ostatními úseky trasy.

Tabulka 1: Tunelové úseky, HLOUBENÁ varianta

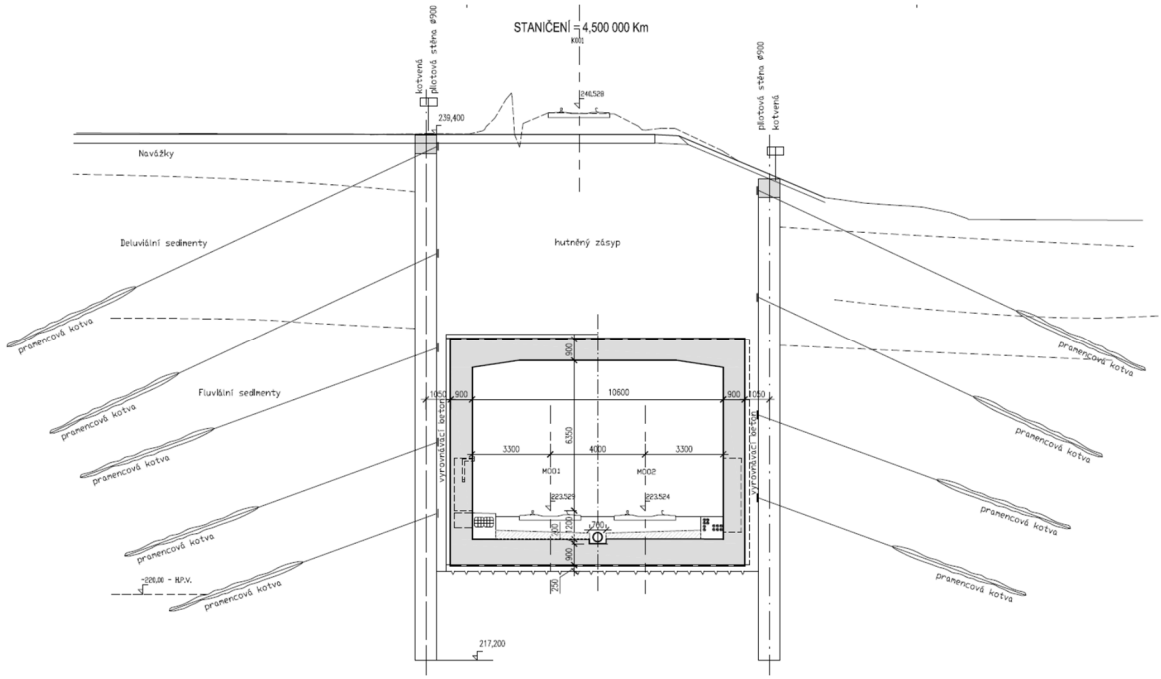
Úsek:	Staničení [km]	Délka	Metoda výstavby (viz kap. 3.1.1/3.1.2)

		:	
SO 06-171-001	4+030 – 4+760	730 m	Hloubený tunel, metoda výstavby ve stavební jámě A/B
SO 06-172-001	4+760 – 5+080	320 m	NRTM
SO 06-172-002	5+080 – 5+235	155 m	Metoda želva
SO 06-172-003	5+235 – 5+750	515 m	NRTM
SO 06-171-002	5+750 – 6+602	852 m	Hloubený tunel, metoda výstavby ve stavební jámě C/D
SO 17-046-001	6+602 – 6+807	205 m	Hloubená stanice, není posužováno v rámci této zprávy.
SO 06-172-004	6+807 – 7+000	193 m	NRTM
SO 06-171-003	7+000 – 7+672	672 m	Hloubený tunel, metoda výstavby ve stavební jámě D
SO 07-171-001 SO 07-141-001 SO 07-146-001 SO 07-141-002 SO 07-171-002	7+672 – 7+675 7+675 – 7+704 7+704 – 7+849 7+849 – 7+853 7+853 – 7+855	3 m 29 m 145 m 4 m 2 m	Hloubená stanice, není součástí plnění této Zprávy
SO 08-171-001	7+855 – 8+070	215 m	Rampa, není součástí plnění této Zprávy

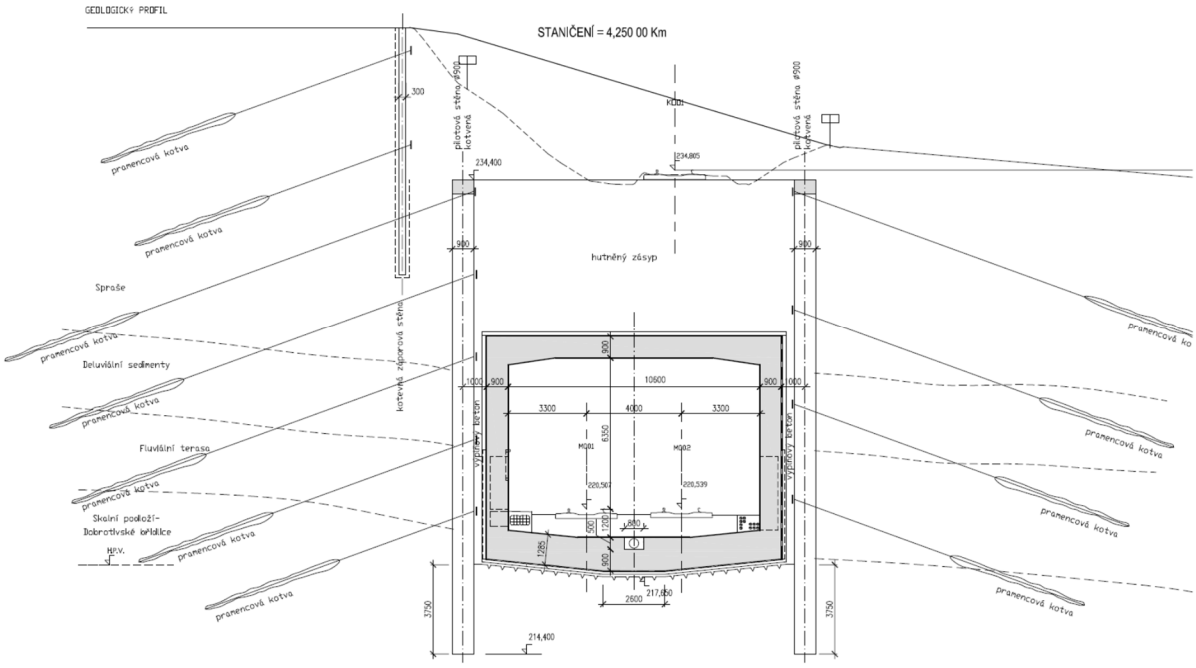
3.1.1 Hloubené úseky

Pro hloubené úseky se jako metoda stabilizace výkopu plánuje jedna z následujících stavebních metod nebo jejich kombinace:

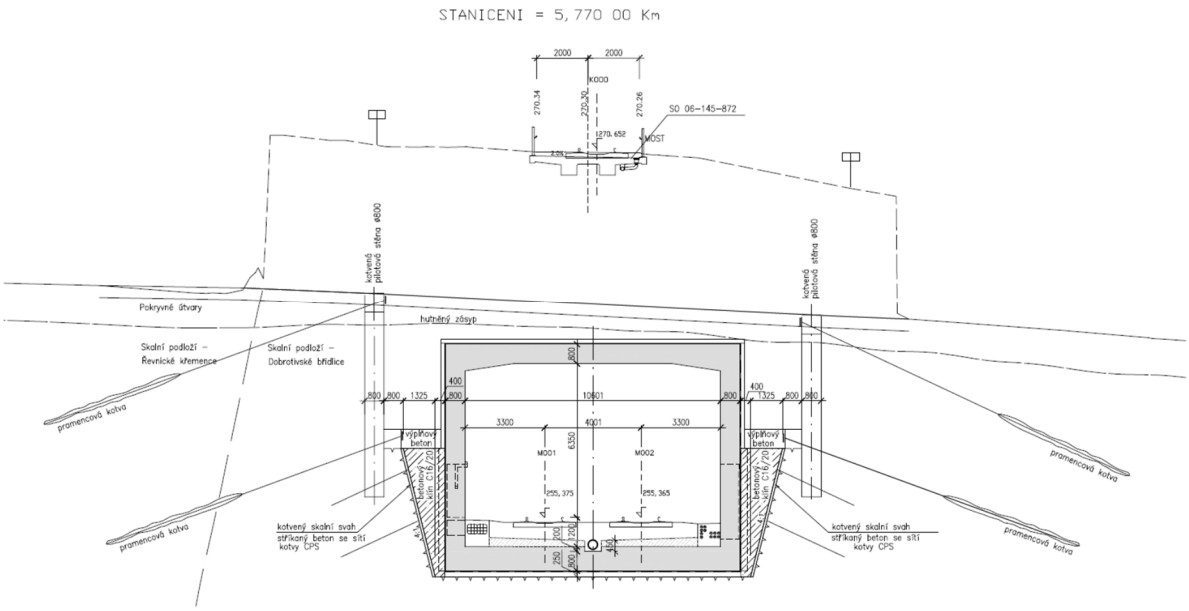
a. Kotvené vrtané pilotové stěny podle úvodního projektu (viz Obrázek 2).
b. Kotvené vrtané pilotové stěny v kombinaci s odsunutým záporovým pažením (viz Obrázek 3).
c. Kombinace vrtaných pilotových stěn se skalním svahem zpevněným hřebíky, zajištěným stříkaným betonem (viz Obrázek 4).
d. Kombinace záporového pažení a skalního svahu zpevněného hřebíky, zajištěného stříkaným betonem (viz Obrázek 5).



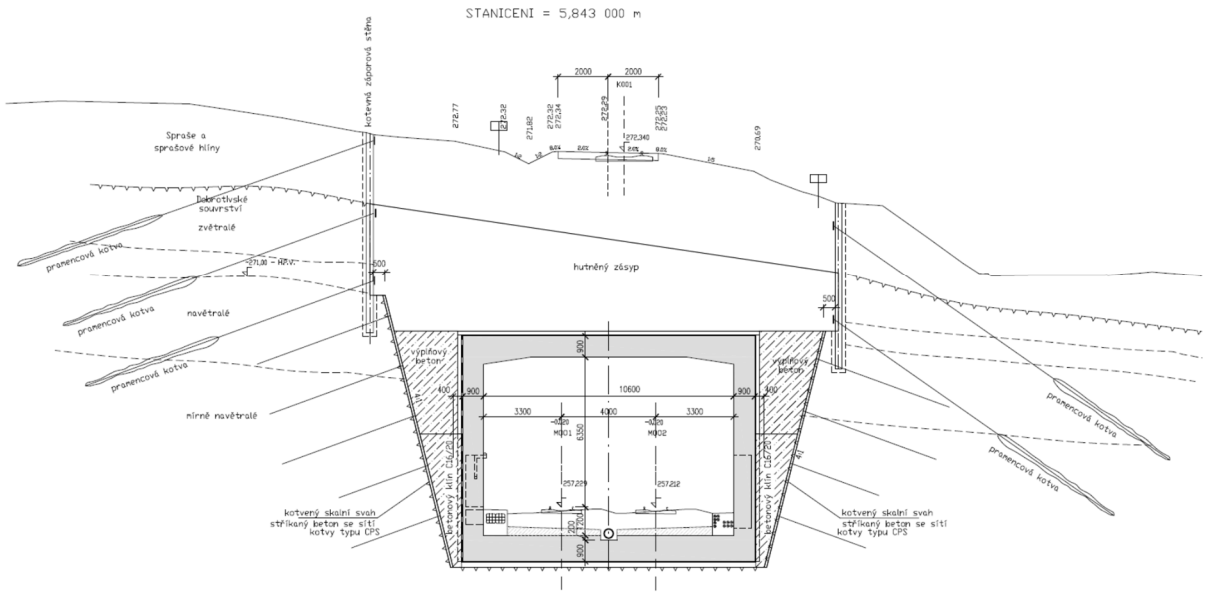
Obrázek 2: Metoda zajištění stavební jámy A: kotvené vrtané pilotové stěny.



Obrázek 3: Metoda zajištění stavební jámy B: kotvené vrtané pilotové stěny se střídavě rozloženým záporovým pažením (nalevo).



Obrázek 4: Metoda zajištění stavební jámy C: vrtané pilotové stěny nahoře, kotvený skalní svah se stříkaným betonem dole.



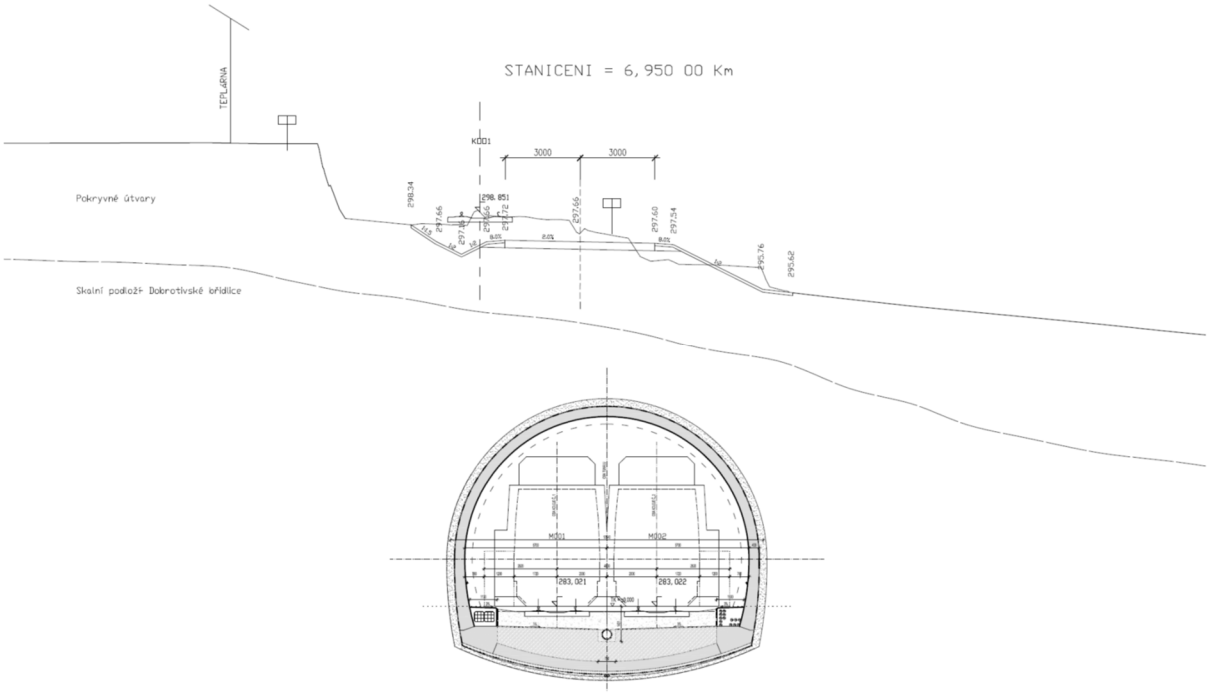
Obrázek 5: Metoda zajištění stavební jámy D: záporové pažení nahoře, kotvený skalní svah se stříkaným betonem dole.

3.1.2 Úseky tunelované metodou NRTM a metodou želvy

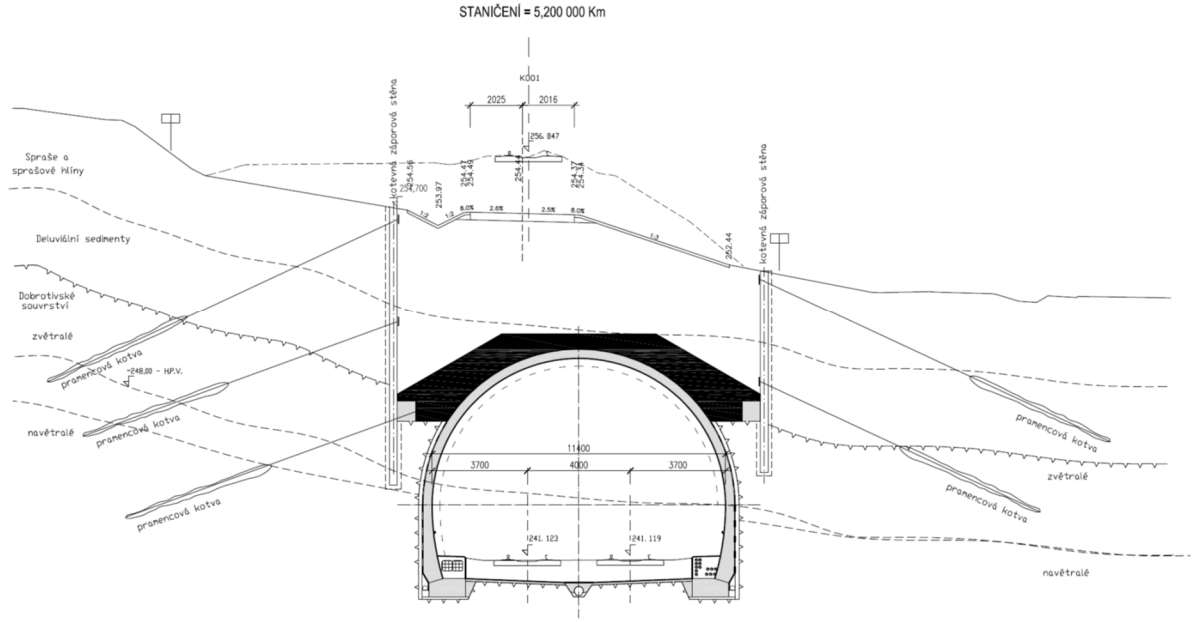
Tři úseky ražby jsou navrženy s využitím nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Typický příčný řez těmito úseky je znázorněn na Obrázek 6. Podle [1.10] se ve většině případů očekává ražba v plném profilu nebo s horizontálním dělením čelby (kalota – opěří – počva). Dle potřeby se plánuje vertikální členění (boční štoly) čelby. V projektu nejsou výslovně uvedena další opatření ke stabilizaci masivu a bude s nimi třeba v dalších fázích přípravy uvažovat podle místních podmínek. Vlastnosti horniny popsané ve zprávě z geotechnického

průzkumu ukazují, že je nutné nejprve vyrazit kalotu s dočasným uzavřením jejího dna. Tato metoda byla zohledněna v numerických analýzách v kapitole 5.

Pro ražbu jsou v [1.10] navržena mechanická rypadla nebo trhací práce. Plánuje se dvouvrstvé ostění tunelu s těsnicí mezivrstvou a železobetonovým vnitřním ostěním.



Obrázek 6: Typický příčný řez pro metodu NRTM.



Obrázek 7: Typický příčný řez pro metodu želva.

Metoda želva (obvyklý řez je zobrazen na Obrázek 7) v sobě spojuje metodu hloubeného tunelu a metodu top-down s metodou NRTM, protože kalota raženého tunelu je před ražbou tunelu zakryta betonovou deskou, vyrobenou uvnitř hloubené stavební jámy vyztužené kotveným pažením. Tato metoda se předpokládá v jednom úseku o délce 155 m.

3.1.3 Okolí

Stávající železniční trať vede městskými částmi Dejvice, Ořechovka a Veleslavín. Plánovaný tunel v HLOUBENÉ variantě by vedl v trase současné železniční trati těsně pod povrchem. Směrem k východnímu portálu tunel prochází vedle vodojemu Bruska s podzemními zásobními nádržemi v bezprostřední blízkosti tunelu. Dále po trase trať prochází vedle zahrádek a garáží. Dále směrem na západ se v těsném sousedství trasy nachází bytové domy, včetně několika památkově chráněných objektů, které mohou být potenciálně náchylné na deformace způsobené stavebními pracemi. Nalevo na konci trasy se v bezprostřední blízkosti tunelu nachází teplárna Veleslavín.

3.2 Ražené varianty tunelu

Tři ražené varianty tunelu by byly ražené pomocí zeminových razicích štítů (EPB TBM). Všechny tři varianty jsou hluboké tunely vedoucí pod skalním hřebenem Střešovic. Každá varianta má rovněž centrálně umístěnou odvětrávací šachtu v místě s vysokým horninovým nadložím. Z hlediska situace jsou navrženy tři různé varianty vedení trasy, SEVER, STŘED a JIH.

3.2.1 Varianta SEVER

Varianta SEVER má prvních asi 500 m stejné vedení trasy jako HLOUBENÁ varianta a následně se odchýlí pod rezidenční čtvrť Ořechovka. Z aluviálních zemin se tunel dostane do břidlicového skalního masivu ve Střešovicích, kde je nadloží výrazně vyšší. Směrem k západnímu portálu vede trasa jižně od teplárny Veleslavín a následně se napojí na původní vedení železniční trati u stanice Veleslavín.

Podél trati ve variantě SEVER se nachází vodojem Bruska, bytové domy v Buštěhradské ulici, Fyzikální ústav Akademie věd ČR a Vojenská nemocnice.

Nejvýchodnější úsek varianty SEVER je navržen jako hloubený tunel (jeho trasa je stejná jako v případě HLOUBENÉ varianty). Ražený tunel pak začíná v místě, kde se trať noří pod rezidenční oblasti. Hloubený úsek doposud nebyl detailně vyprojektován. Proto posouzení této varianty zohledňuje pouze obecné aspekty metody hloubení v tomto úseku.

3.2.2 Varianta STŘED

Varianty JIH a STŘED mají ve východní části stejné vedení trasy, která se odchyluje od stávající železniční trati bezprostředně za stanicí Dejvice. Východní portál se nachází před

Svatovítskou ulicí. Zde tunelová varianta kříží jednu z vjezdových ramp silničního tunelu Blanka. Toto křížení představuje komplexní projektovou úlohu, která není součástí plnění této Zprávy. V následujícím úseku ražby prochází tunel v blízkosti bytových domů v ulici Pod Hradbami a pod tramvajovým depem. Zde se vedení tras STŘED a JIH rozděluje. Trasa STŘED vede podél ulic Střešovická a Na Petřinách a následně se zanořuje pod střešovickou plošinu. Tam sleduje severní svah plošiny, vede severně od Vojenské nemocnice a poté se v blízkosti teplárny napojuje na ostatní trasy.

3.2.3 Varianta JIH

Od místa oddělení v blízkosti tramvajového depa se trasa ve variantě JIH zanořuje pod střešovickou plošinu, kde vede pod kostelem svatého Norberta a pod protestantským kostelem. Po průchodu pod Vojenskou nemocnicí s vysokým nadložím trasa uhýbá na sever, kde se v blízkosti teplárny napojuje na ostatní varianty trasy.

Varianty STŘED i JIH jsou čistě ražené tunely a přesný návrh portálových oblastí bude předmětem dalších fází projektu.

4 Metody tunelování a jejich související rizika

4.1 Hloubené tunely

Hloubené tunely vznikají tak, že se z povrchu země vyhloubí otevřená stavební jáma, v jámě se postaví konstrukce tunelu a následně se jáma zaplní. Tunel je srovnatelný s hlubokou stavební jámou pro budovu a stavební rizika související s touto metodou jsou prakticky totožná s jinými hlubokými výkopy a týkají se především stability a deformací opěrných zdí vyztužujících stavební jámu.

Poznámky ke konkrétním stavebním metodám použitým v různých hloubených úsecích jsou uvedeny níže.

4.1.1 Úsek SO 06-171-001 (km 4+030 až 4+760)

<u>Metody výstavby</u>

Úsek se vyznačuje stavební jámou hlubokou mezi 12,5 m na začátku úseku a maximální hloubkou 23 m pod povrchem. Pro zajištění stavební jámy v mělkých úsecích se používají kotvené vrtané pilotové stěny (∅ 80/90 cm) s několika vrstvami kotvení. Hlubší úseky využívají stupňovité stěny v prvních 6 m s kotveným záporovým pažením následované kotvenými vrtanými pilotovými stěnami do hloubky 17 m.

Hladina podzemní vody se nachází pod dnem výkopu. Po stranách výkopu se nachází některé stavby.

Rizika související s vrtanými pilotovými stěnami

Výstavba vrtaných pilotových stěn představuje známou a osvědčenou metodu stabilizace stavebních jam. Nicméně stejně jako v případě každé komplexní metody výstavby se při ní mohou objevit problémy. Mezi nejčastější očekávané problémy při použití vrtaných pilotových stěn pro hloubené tunely patří:

- Kvůli úzké stavební jámě jsou požadavky na kolmost a přesné umístění pilot velmi vysoké.
- Vyšší opotřebení nástrojů v důsledku vlastností horninového masivu, vedoucí k vyšším nákladům na údržbu a delší době výstavby.
- Povaha stavební jámy, která jako dlouhá liniová stavba vyžaduje zhotovení velkého množství pilot. Jakékoliv systematické prodloužení doby zhotovení pilot tedy vede k významnému prodloužení celkové doby výstavby.
- Emise hluku podél celého úseku stavební jámy budou trvat dlouho, což bude mít významný dopad na místní obyvatele.
- Před výstavbou pilot je nutné zajistit rovnou zpevněnou pracovní plochu. To může vyvolat nutnost dalších prací, zejména na svažitých místech.

Oproti ostatním hlubokým stavebním jamám se očekává, že se bude hladina podzemní vody nacházet pod dnem výkopu. Čerpání vody je tedy omezeno na srážky a výkop není třeba utěsňovat proti přítokům vody z horninového prostředí.

Rizika související s kotvením

Kotvení představuje běžnou stavební metodu, stejně jako vrtání pilot. Pro tento projekt lze očekávat zejména následující rizika:

- Mimořádně vysoké kotvicí síly: Aby byla zajištěna statická stabilita výkopu, je nezbytná instalace vysokého počtu kotev a velké kotvící síly. Pokud by terénní zkoušky kotev tyto vysoké kotvící síly nepotvrdily, byla by nutná dodatečná pomocná opatření pro zajištění stability stavební jámy. Montáž dodatečných kotev je geometricky obtížná, protože kotvy musí mít od sebe určitou vzdálenost.
- Selhání kotev nebo jejich injektážních těles by vedla k okamžitému selhání systému pro zajištění výkopu.
- Na místech, kde kotvené stěny samy o sobě nestačí, by bylo nutné použít rozpěrnou konstrukci, která představuje fyzickou překážku během výstavby tunelu.
- Projektové riziko: Pokud jsou požadovány delší kotvy, které by se dostaly pod soukromé pozemky, může to mít za následek případné zdržení prací a dodatečné náklady na povolení.

4.1.2 Úsek SO 06-171-002 (km 5+750 až 6+602)

Metody výstavby

Stavební jáma v tomto úseku musí být stabilizován dvojitě kotvenými vrtanými pilotovými stěnami (∅ 80 cm) v horní části a skalním svahem zpevněným hřebíky zajištěným stříkaným betonem v dolní části. Vrtané pilotové stěny jsou zajištěny kotvami nahoře (pro stabilitu stěny) a dole (pro zajištění stability paty pilotové stěny).

V oblastech s tvrdším horninovým prostředím se místo vrtaných pilotových stěn použije záporové pažení. Na obou stranách výkopu budou částečně využity obě metody.

Rizika související s metodami výstavby

Obecná rizika popsaná výše pro vrtané pilotové stěny se vztahují i na tento úsek. Menší hloubka vrtaných pilotových stěn ale pomáhá snížit deformace i kotvicí síly.

Se záporovým pažením souvisí v této situaci následující typická rizika:

- Vzhledem k relativní pružnosti jsou deformace vyšší než v případě vrtaných pilotových stěn. Příslušné deformace je třeba zohlednit v návrhu a je nutné nadimenzovat vhodné vzdálenosti pilot a profily nosníků.
- Vrtatelnost půdy může být částečně snížena obsahem křemenců v hornině. Kvůli tomu může být beranění pilot záporového pažení obtížnější.

Skalní hřebíky, které mají být použity v dolní části výkopu, představují zavedenou a běžnou metodu, která by měla omezit deformace stěny asi na 1 až 3 % výšky stěny. Nejdůležitějším faktorem zde je přesné stanovení hloubky skalního podloží, aby bylo možné pevně založit horní opěrnou zeď.

4.1.3 Úsek SO 06-171-003 (km 7+000 až 7+672)

Metody výstavby v tomto úseku jsou stejné jako v úseku SO 06-171-002. Obecné poznámky a případná rizika jsou tedy rovněž totožná jako v předchozím úseku.

4.1.4 Shrnutí hloubených metod

Nejkritičtější řezy v úseku SO 06-171-001 jsou řezy s odstupňovanými opěrnými zdmi v kombinaci s relativně špatnými vlastnostmi horninového masivu. Zde budou nutné další projektové práce a pravděpodobně i projektové změny, aby se zaručila statická únosnost konstrukce a přípustné deformace.

Kromě této problematiky jsou všechny metody výstavby předpokládané v hloubených úsecích známé a osvědčené. Hlavní riziko souvisí s nosností kotev. Zde doporučujeme předběžné průzkumy nosnosti systému kotvení v horninovém masivu.

Výhodou HLOUBENÉHO vedení trasy je hladina podzemní vody, která se předpokládá v celé délce pod dnem výkopu.

Pro všechny hloubené části tunelu je vyžadována podrobná analýza deformačního chování. To platí především pro odstupňované opěrné zdi záporového pažení a skalních stěn zajištěných hřebíky. Z hlediska deformací hrají důležitou úlohu zejména profily nosníků a odstupy pilot záporového pažení.

4.2 Tradiční (NRTM) tunelování

4.2.1 Metoda výstavby

Ražený úsek HLOUBENÉ varianty bude vybudován pomocí nové rakouské tunelovací metody (NRTM), která se spoléhá na observační metodu a příslušná opatření pro zajištění stability a deformací masivu. Tunel je ražen ve flexibilních krocích, buď v plném profilu, nebo v různém členění. Po každé fázi ražby se čelba a líc výrubu dočasně zajistí stříkaným betonem. Pro stabilizaci masivu před čelbou nebo radiálně okolo tunelu jsou možná dodatečná opatření, jako jsou kotvy, mikropilotové deštníky nebo injektáž. Opěří lze založit na mikropilotách a pro zvýšení stability a snížení sedání lze použít dočasnou desku počvy.

Pro tento projekt je tunelování metodou NRTM za daných mezních podmínek náročné z následujících hledisek:

- velmi mělké tunely s nízkým nadložím,
- velké průřezy dvoukolejného tunelu,
- měkká půda s nízkou smykovou pevností,
- městské prostředí, ve kterém se v blízkosti tunelu nachází kritické objekty a objekty citlivé na sedání.

Na druhou stranu je NRTM velmi flexibilní stavební metoda, která umožňuje na základě observační metody přizpůsobit pomocná stabilizační opatření měnící se situaci a nestálým podmínkám masivu. Horninový masiv a jeho deformace lze pozorovat na čelbě, geologové jej mohou interpretovat a následně na jejich základě určit požadovaný rozsah pomocných opatření, jako například kotvy, patkové mikropiloty, dočasné desky počvy, odvodňovací vrty nebo zkrácení kroku ražby.

4.2.2 Související rizika

S tunelováním metodou NRTM souvisí následující rizika:

- Nestabilita čelby (včetně místních nestabilit v přechodových pásmech mezi skalním podložím a měkkou zeminou). Mezi případné závažné následky patří těžké škody způsobené třetím stranám, ohrožení lidských životů a dlouhé prostoje (zvýšení doby

výstavby a nárůst nákladů). Pro zmírnění tohoto rizika bude vyžadováno podrobné posouzení stability čelby a robustní návrh pomocných opatření, např. kotvení čelby, výztužné jádro nebo injektáž pro zesílení masivu.

- Důležitou součástí řízení stability a deformací při tunelování metodou NRTM je volba členění čelby průřezu. Čelba může být svisle nebo vodorovně rozdělena, např. kalota/opěří/počva nebo jádro / boční štoly.
- Obecným rizikem tradiční ražby je nestabilita masivu nezajištěného úseku v oblasti ražby (vrchol klenby a/nebo stěny). Jako protiopatření je nutné využít pomocné prvky, například mikropilotový deštník nebo jehlování. Dalším řešením může být snížení délky záběru (přibližně na 1 m),
- Snížení délky záběru lze použít i v případě, kdy je při ražbě opěří a počvy pozorována nestabilita nebo nadměrné deformace.
- Nepřípustné sedání na povrchu a stávající infrastruktury může být důsledkem velkých deformací na čelbě a líci klenby z důvodu:
    - tunelování (procesy redukce a redistribuce napětí v půdě způsobené ražbou tunelu)
    - procesy konsolidace soudržných zemin s časem (rozptýlení nevyrovnaného pórového tlaku)
- Selhání primárního ostění ze stříkaného betonu z důvodu překročení jeho nosnosti. Protiopatření zahrnují robustní návrh s konzervativními výpočtovými předpoklady a návrhem ostění, kvalitní realizace díla, dozor na staveništi, kontrola kvality realizace a použitých materiálů a monitorování chování horninového masivu a primárního ostění.
- Nestabilita primárního ostění tunelu: místní nestabilita patek primárního ostění kaloty. Protiopatření jsou:
    - Dočasná spodní klenba pro ražbu kaloty (snížení sedání a zvýšení bezpečnosti)
    - rozšíření pat kaloty a/nebo mikropiloty
    - rychlé uzavření dočasného ostění ze stříkaného betonu pro lepší stabilitu a snížení sedání.
- Tvorba efektu přesýpacích hodin, kdy se rozvolněný horninový materiál drolí skrz mezery mezi mikropilotami deštníku.
- Obecné riziko kolize s přívodními trubkami, kabely nebo jinou infrastrukturou, která nemusí být plně dokumentovaná. Toto je obecné riziko mělkého tunelování.
- Nepředvídané pronikání vody v případě, že bude hladina podzemní vody výše, než jaké jsou předpoklady.
- Zhoršení vlastností masivu (soudržná zemina) kvůli kontaktu s vodou nebo vlhkostí.
- Ražba pomocí trhacích prací nemusí být možná s ohledem na emise vibrací a emise hluku. To může mít nepříznivý dopad na rychlost prací.

4.2.3 Shrnutí metody NRTM

S ohledem na okrajové podmínky tohoto projektu je bezpečná tradiční výstavba tunelu s nízkým vlivem na okolí považována za proveditelnou pouze v případě rozsáhlého uplatňování dodatečných pomocných opatření, zkráceného záběru a intenzivního monitorování. To pravděpodobně povede k relativně pomalému postupu práce v rozsahu asi 1 m za pracovní den, zejména v kritických úsecích. Mezi otázky, které je třeba vyřešit v případné další fázi návrhu, patří možnosti provádět odstřely s ohledem na seismické emise a hluk, a dále pak emise vibrací vyvolané hydraulickými razicími nástroji.

4.3 Metoda želvy

Metoda želvy je tradiční tunelovací metoda v České republice, která má určitou podobnost s metodou top-down a kombinuje hloubenou stavební jámu s tradiční ražbou: na úrovni kaloty je z hloubené stavební jámy vybudována deska. Tato deska slouží jako stabilní střecha pro tradičně ražený tunel.

Výhodou této metody je, že hloubka výkopu je mnohem menší než u zcela hloubeného tunelu, a že tradiční ražbu neovlivňuje málo únosná zemina nad tunelem.

Nevýhodou je především vyšší pracnost, kdy se spojují negativní vlivy stavby na povrchu kvůli výkopovým pracem s nároky na podzemní ražbu. Pokud jde o obecná rizika, je třeba zvážit rizika metody hloubených tunelů i metody NRTM. Menší hloubka výkopu a kalota zajištěná horní deskou ale významně tato rizika snižují. Jako dodatečné riziko je třeba zohlednit založení desky. Jelikož se nachází na dně opěrných zdí výkopu, narušuje její výstavba i patky opěrných zdí.

Jako alternativu metody želva lze použít samotnou metodu NRTM s příslušnými pomocnými opatřeními, která nahradí desku.

4.4 Mechanizované tunelování (EPB)

4.4.1 Metoda výstavby

Pro ražené varianty tunelu se používá zeminový razicí štít s vyrovnáváním tlaku horniny (EPB TBM). Štíty EPB TBM jsou konstruovány tak, aby poskytovaly aktivní zajištění čelby díky zhutněné rubanině v utěsněné razicí komoře. Za předpokladu zajištění vhodné konzistence rubaniny lze tlak na čelbu kontrolovat pomocí interakce rychlosti posuvu TBM a rychlosti odvodu materiálu, kde rubanina je z razicí komory odváděna šnekovým dopravníkem, který zajišťuje požadovaný tlakový gradient mezi atmosférickými podmínkami v tunelu a razicí komorou.

Líc raženého tunelu je zajištěn ocelovým štítem, který rovněž kryje prostor pro sestavování ostění z prefabrikovaných dílců s těsněním. Mezera mezi lícem tunelu a skládaným ostěním

je vyplněna injektážním materiálem vstřikovaným přes zadní část štítu. Tento princip umožňuje bezpečnou ražbu a výstavbu ostění s neustálým protitlakem na čelbě, který udrží podzemní vodu i rozvolněnou půdu stabilizovanou.

V oblastech, kde není třeba udržovat režim podzemních vod a čelba je stabilní, lze štít EPB TBM provozovat v otevřeném módu bez aktivního zajištění čelby, kdy se hladina rubaniny v razicí komoře udržuje pouze ve výšce, která umožňuje odvod materiálu šnekovým dopravníkem. Minimalizovat přítok vody na čelbu v propustném, ale staticky stabilním masivu lze dosáhnout i stlačeným vzduchem v razicí komoře s nízkou hladinou rubaniny v tzv. přechodovém módu.

Díky flexibilitě provozních módů a vhodnosti pro všechny převládající typy masivu očekávané v oblasti projektu jsou štíty EPB TBM vhodné pro všechny ražené varianty tunelu.

4.4.2 Související rizika

Správně použitá a monitorovaná ražba metodou EPB představuje zavedenou a bezpečnou metodu výstavby tunelů, která si poradí s mnoha různými geotechnickými podmínkami. Rizika související s raženými tunely obecně a konkrétně s metodou EPB jsou:

- Abrazivita masivu může vést k nadměrnému primárnímu i sekundárnímu opotřebení (řezných nástrojů a konstrukčních dílů TBM). Pro jeho zmírnění je nutná vhodná koncepce úpravy materiálu, průběžné sledování parametrů ražby a pravidelná údržba.
- Některé typy hornin mohou způsobit časté zalepování, pokud nejsou vhodně upravovány. Ucpané nástroje a otvory v razicí hlavě významně snižují rychlost ražby a mohou způsobit odstávku stroje, vyšší opotřebení jiných dílů stroje, obtíže s udržením podpůrného tlaku na čelbě a odvodem materiálu. Aby nedocházelo k ucpávání, je nutné uplatňovat koncepci vhodné úpravy zeminy/horniny.
- Selhání nebo nesprávný provoz systému pro úpravu zeminy/horniny může mít nepříznivý vliv na konzistenci rubaniny. Tím se sníží schopnost udržovat homogenní materiál na čelbě, jenž je nezbytný pro zachování podpůrného tlaku, účinné ražby a také pro odvod materiálu.
- Nedostatečný podpůrný a injektážní tlak může vést k deformacím před a nad TBM, což může mít za následek výrazné sedání masivu. Totéž platí pro nadvýlom materiálu.
- Prstencová mezera mezi lícem klenby tunelu a skládaným ostěním musí být zcela vyplněna injektážním materiálem. Nedosažení zcela vyplněné mezery může vést k vyššímu sedání a nedostatečné podpoře dílců ostění, která zase může způsobit nepřesné umístění, praskliny a poškození segmentů, ale i pronikání podzemní vody těsněním mezi jednotlivými dílci.

- Při vysoké tlačivosti masivu nebo v případě nadměrného opotřebení obrysových řezných nástrojů TBM se může štít v líci klenby tunelu zaseknout. V nejhorším případě to může mít za následek naprostou ztrátu TBM, pokud se stroj sám neuvolní. Jako protiopatření je kromě přizpůsobení nadřezu předpokládaným půdním podmínkám a údržby řezných nástrojů nutné TBM vybavit dostatečnou tlačnou silou a možnostmi pro mazání štítu.
- Jsou možné odchylky od návrhové trasy tunelu ve svislém i vodorovném směru, zejména při provozu stroje v otevřeném režimu, nebo pokud některé části horniny na čelbě mají mnohem vyšší pevnost než jiné části. Odpovídajícím způsobem musejí být také nastaveny a sledovány provozní parametry stroje.

Jak lze vidět, rizika se týkají především pracovních postupů a jen vzácně mají vliv na okolí hlubokých tunelů. Pouze v případě mělkých tunelů v zeminách panuje určité riziko nadměrného sedání, jestliže nastanou provozní problémy tunelovacího stroje. Díky podrobnému sledování provozních parametrů stroje (kontrola procesů) lze sedání kontrolovat a udržet v přípustných limitech.

5 Numerická analýza sedání

Aby bylo možné odhadnout vliv deformací vyvolaných tunelováním na okolí, byly pro každou variantu vedení trasy analyzovány tři reprezentativní řezy pomocí metody konečných prvků.

V HLOUBENÉ variantě jsou navrženy různé stavební postupy. Proto vybrané řezy tvoří jedna reprezentativní analýza hloubeného tunelu a dvě analýzy úseků ražených metodou NRTM. Krátký úsek využívající metodu želva nebyl analyzován, protože jeho situace není pro proveditelnost celé varianty zásadní. Jednak protože je stavební jáma mělčí než ve většině hloubených úseků a jednak protože úseky ražené metodou NRTM bez překryvné desky budou rizikovější než ty s tou deskou.

V případě ražených variant tunelu bylo zvoleno celkem devět řezů, které zahrnují nejvýznamnější povrchové objekty a reprezentativní situace pro všechny tři varianty vedení trasy. Díky tomu lze výsledky analýzy extrapolovat pro celou trasu ve všech variantách.

5.1 Obecný přístup k modelování

Pro numerickou analýzu byl použit software konečných prvků PLAXIS 3D, verze 2019.0, s použitím řezů o tloušťce 1 m (odpovídajícím podmínkám namáhání rovinné deformace). Pro hloubený úsek byl použit řez o tloušťce 2 m (viz příslušný popis modelu níže).

Geometrie každé simulace, tj. tvary povrchu terénu, vrstvy zemin/hornin, hladiny podzemní vody, umístění povrchové infrastruktury, budov, opěrných zdí atd., vychází z výpočtových řezů poskytnutých společností Metroprojekt. Dle potřeby byly zohledněny i informace o konkrétních povrchových objektech a základových zatíženích na základě informací poskytnutých společností Metroprojekt.

Masiv je diskretizován pomocí 10uzlových čtyřstěnů a považován za homogenní, lineárně elastický, dokonale plastický materiál, který splňuje kritérium napětí Mohr-Coulomb s neasociovanou podmínkou plastifikace.

Hornina je v modelu uvažována stejně jako bylo popsáno pro zeminy, a je tedy zjednodušeně idealizována jako homogenní a izotropní materiál s parametry podle příslušných zpráv z geotechnického průzkumu. Anizotropie horniny (s ohledem na stratifikaci horninových vrstev a ploch nespojitosti atd.) není v této fázi analýz zohledněna.

Primární geostatické napětí v zeminách bylo bráno jako litostatické, s ohledem na koeficient zemního tlaku podle běžně používaného vztahu $K_{0,nc} = 1-\sin(\varphi)$ pro normálně konsolidovanou půdu. V případě horninového masivu bylo analyzováno rozmezí koeficientu bočního napětí mezi $K = \nu/(1-\nu)$ a $K = 1{,}0$. Bylo ale zjištěno, že výše uvedený předpoklad $K = 1{,}0$, což je přiměřená hodnota pro horninu s vysokým nadložím, vede k nižšímu sedání povrchu.

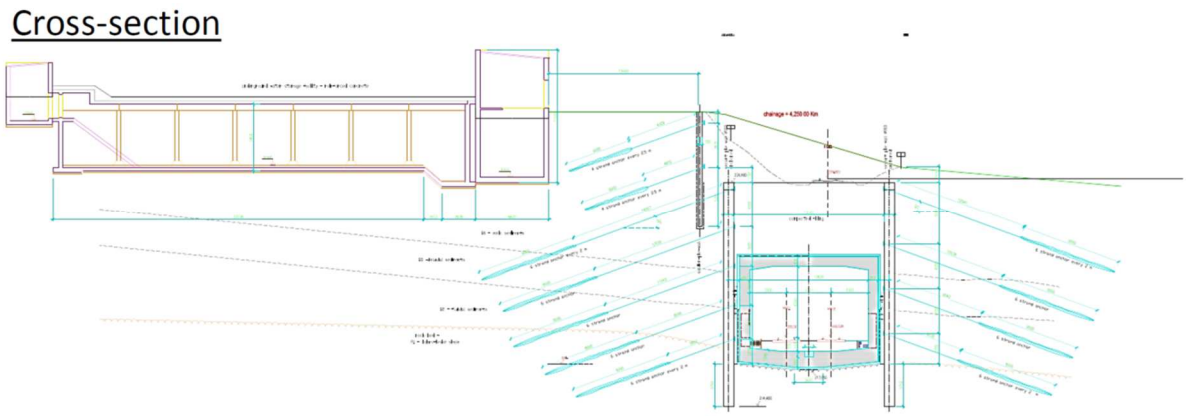
Provedené výpočty se tedy zaměřily na konzervativnější předpoklad K = v/(1-v), který obecně platí pro elastický materiál při stlačení 1D bez možnosti bočního rozpínání. Je třeba uvést, že stav lokálního napětí se může od tohoto předpokladu výrazně lišit, zejména u heterogenních hornin či pásem předchozí tektonické aktivity (zlomová pásma, rotace hlavního napětí). Nicméně v případě úseků s vysokým nadložím se považuje vliv K0 na sedání na zemském povrchu jako spíše zanedbatelný. S ohledem na použité parametry „zhomogenizované“ (redukované) horniny a na současnou projektovou fázi s limitovanými geologickými a geotechnickými znalostmi lze výsledky považovat za přiměřené a na bezpečné straně.

2D simulace procesu výstavby byla provedena po jednotlivých krocích, počínaje výpočtem počátečního stavu napětí. V závislosti na analyzovaném problému, tj. výkop/hloubený úsek, tunelování metodou NRTM nebo EPB-TBM, byly použity různé přístupy k modelování.

5.2 Hloubené úseky

V km 4+250 byl zvolen reprezentativní řez pro hloubený tunel. Ten představuje komplexní konstrukci s využitím převrtávané pilotové stěny, kotvené pomocí lanových kotev, a odstupňovaného kotveného záporového pažení.

Tento řez je pro výstavbu velmi komplexní (dvě vzájemně se ovlivňující metody výstavby opěrných zdí) a s ohledem na blízkost objektu má vyšší citlivost na deformace masivu. Rovněž se jedná o jednu z nejhlubších stavebních jam projektu. Řez je znázorněn na Obrázek 8.



Obrázek 8: Hloubený řez km 4+250.

Pro hloubený úsek je proces výstavby modelován v několika fázích s úrovněmi hloubení přibližně 1 m pod příslušnou řadou kotev. Takto je postupováno dokud není dokončena závěrečná fáze hloubení, tj. není dosaženo spodní úrovně stavební jámy. Proces montáže a předpínání lanových kotev byl simulován realisticky a podrobně v průběžných krocích, vždy před odtěžením půdy na další úroveň hloubení, protože to má zásadní vliv na výsledné deformace masivu.

Podrobnosti o fázích simulace, nastavení modelu a grafech s výsledky výpočtů jsou uvedeny v příloze A.

Smyková pevnost a tuhost zemin ve zvažovaném řezu jsou velmi nízké. V kombinaci s nedalekou budovou, kvůli které musí být deformace opěrných zdí nízké, to způsobuje komplikace současného návrhu systému zajištění. Výsledky simulace naznačují, že odstupňovaná opěrná zeď jako celek čelí riziku statického selhání. V tomto případě se celé kotvení horního záporového pažení nachází v prostoru za smykovou plochou.

Stability lze dosáhnout pouze mobilizací velmi vysokých kotevních sil v převrtávané pilotové stěně, které dosahují až 1000 kN. I poté dosahují deformace čela stěny až 20 cm. Důvodem nepříznivých deformačních charakteristik jsou velmi nízká tuhost zemin (E_{def} = 5 až 8 MPa) a velká hloubka výkopu – 23 m. Doporučujeme tedy během dalších projektových fází znovu zvážit výběr systému kotvení ve prospěch rozpěrné konstrukce s výztuhami uvnitř výkopu.

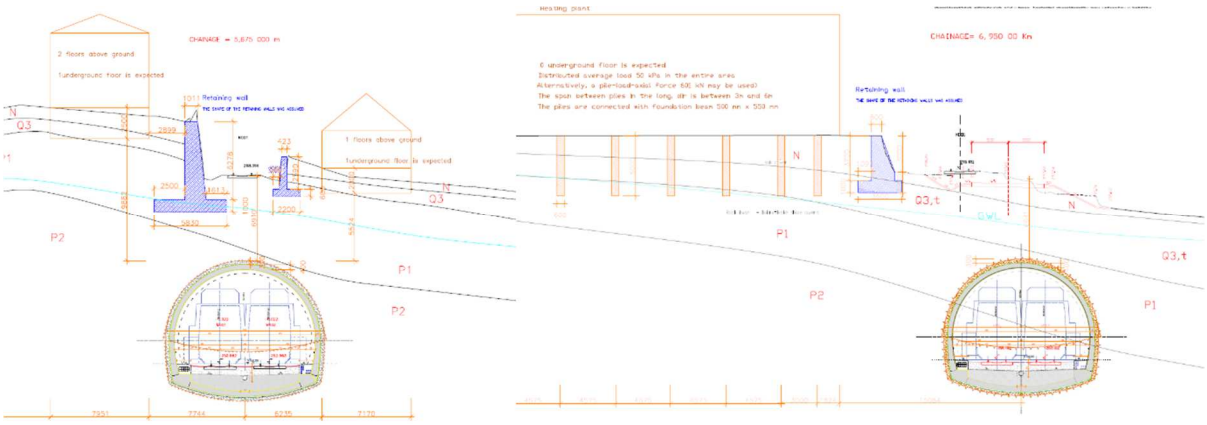
5.3 Tunely ražené metodou NRTM

Tunelování metodou NRTM bylo simulováno v jednotlivých krocích. V prvním kroku byla simulována ražba kaloty tunelu a dočasného ostění. Ve druhém kroku se modelování zaměřilo na ražbu opěří/počvy a dočasného ostění. Procesy redukce a redistribuce napětí v prostoru byly zohledněny běžně používaným způsobem podle tzv. metody pro snížení tlaku, s realizací výpočtových mezikroků. Dále byla zohledněna snížená tuhost dočasného ostění ze stříkaného betonu s ohledem na procesy brzkého zatížení, vzniku trhlin a dotvarování.

V simulaci byly použity materiálové vlastnosti uvedené ve zprávě z geotechnického průzkumu pro HLOUBENOU variantu. V rámci kompenzace nedostatečného zohlednění chování při odlehčení v rámci Mohr-Coulombova modelu byla tuhost masivu přímo pod tunelem zvýšena faktorem 3. Pro další projektové fáze, zejména pro podrobné analýzy sedání, doporučujeme použít pokročilejší materiálové modely. Za tímto účelem je ale nutné stanovit další návrhové parametry masivu.

Byly modelovány dva řezy (viz Obrázek 9):

- km 5+675: Nízké nadloží pod dvěmi opěrnými zdmi s objekty v těsné blízkosti po obou stranách.
- km 6+950: Tunel vedle teplárny s vysokými základovými zatížením.



Obrázek 9: Řezy NRTM km 5+675 (nalevo) a km 6+950 (napravo).

Podrobnosti o fázích simulace, nastavení modelu a předpokladech a grafy s výsledky výpočtů jsou uvedeny v příloze A.

Podle projektu je v úsecích ražených metodou NRTM navržena tradiční metoda použití stříkaného betonu s dělením čelby na kalotu a opěří/počvu. Dočasné ostění ze stříkaného betonu je navrženo v tloušťce 30 cm.

<u>Posouzení výsledků simulace km 5+675</u>

Bez dodatečných opatření jsou deformace relativně vysoké a mohou nepříznivě ovlivnit objekty v blízkosti tunelu. Aby se snížily deformace masivu a zabránilo se rozvolnění masivu před čelbou (tj. aby se snížilo sedání na povrchu terénu), je třeba zvážit krátké záběry, rychlé uzavření primárního ostění kaloty (např. dočasnou spodní klenbou), jehlování a dostatečná opatření pro stabilizaci čelby, např. kotvení čelby nebo výztužné jádro.

<u>Posouzení výsledků simulace km 6+950</u>

Bez dočasné spodní klenby pro kalotu poukazují výsledky na známky nestability celé kaloty během ražby. Aby se zajistila stabilita tunelu a snížily se deformace masivu a sedání povrchu, byla pro výpočty uvažována dočasná spodní klenba kaloty. Ražba s minimalizací deformací povrchu bez dočasné spodní klenby kaloty nebo jiných dodatečných opatření není možná. I v případě dočasné spodní klenby pro kalotu jsou deformace stále relativně velké.

5.4 Mechanizovaně ražené tunely

5.4.1 Přístup k modelování

Určující faktory pro deformace masivu vyvolané tunelováním při uzavřeném módu tunelování zeminovým štítem jsou:

- Aktivní podpůrný tlak na čelbě,
- Nadvýrub a zkosení štítu, určující mezeru pro řízení štítu,
- efektivita z hlediska tlaku a objemu injektáže mezery za rubem ostění,
- a řízené odtěžování materiálu.

Při 2D analýze pomocí metody konečných prvků lze všechny tyto ovlivňující faktory jen obecně aproximovat na základě výpočtu mezikroku redukce a redistribuce napětí v masivu před montáží skládaného ostění, při které je stupeň redukce napětí (poměr zbytkového napětí k počátečnímu napětí $\beta = p/p_0$) zvolen tak, aby byla ve výpočtu reprodukována předpokládaná ztráta objemu zeminy/horniny okolo tunelu. V důsledku výpočtu lze odhadnout vliv tunelování na deformace povrchu a na budovy. To postačuje pro přibližné posouzení poškození objektů (posouzení škod fáze 1) s cílem určit objekty, které by měly být předmětem dalšího zkoumání během procesu projektování.

Tři mechanizovaně ražené varianty tunelu, SEVER, STŘED a JIH, procházejí od východu k západu stejnými geologickými pásmy: s mělkým nadložím v zeminách, s vysokým nadložím v neporušených horninách a pásmy tektonických zlomů. V případě tunelování pomocí TBM byly k simulaci vlivu tunelování na půdní deformace použity různé přístupy v závislosti na tom, zda bylo analyzováno tunelování v zeminách, tunelování zlomovými pásmy nebo tunelování v neporušených horninách. Pro různé případy byly učiněny následující modelové předpoklady:

<u>Ražba v tvrdé hornině (otevřený mód EPB)</u>

V tomto případě se nemodeluje aktivní podpůrný tlak na čelbě. Deformace masivu se objeví ihned po ražbě a jejich konečná forma nastane ještě před montáží ostění. Proto využívá krok ražby redukční faktor pro redukci napětí v masivu asi o 80 %, vyjádřený jako zbytkové napětí, které převezme primární ostění ($\beta = 0{,}2$).

<u>Ražba v zeminách (uzavřený mód EPB)</u>

Předpokládá se poměrně vysoký, aktivní podpůrný tlak, který zajišťuje stability čelby a snižuje pohyby masivu před čelbou. K deformacím masivu dochází především podél štítu a v prstencové štěrbině. Tyto deformace jsou simulovány s předpokladem přiměřených hodnot ztrátu objemu (VL) během průchodu štítu. Je třeba poznamenat, že z nadvýrubu a zkosení

štítu se také mohou vzniknout určité deformace masivu. Na základě zkušeností lze učinit obezřetný odhad

- VL < 0,25 % (obvyklý případ pro dobrý provoz EPB)
- VL = 0,5 % (charakteristický základní případ) a
- VL = 1,0 % (nejhorší případ).

V posouzení vlivu tunelování v této Zprávě byl použit charakteristický základní případ a nejhorší případ. Mějte na paměti, že tunelování metodou EPB se zanedbatelným sedáním je možné a ve většině případů se tak i stává.

Ražba v rozvolněné hornině/zlomovém pásmu (uzavřený mód EPB)

Předpokládá se, že aktivní podpůrný tlak zajistí stabilitu a zabrání zaseknutí štítu, avšak současně má nevýznamný vliv na sedání vyvolané tunelováním. Výpočty jsou provedeny s přiměřenými faktory redukce napětí odpovídajícími předpokládanému podpůrnému tlaku. Má se za to, že zlomová pásma nejsou příliš velkého rozsahu (menší než průměr štítu) a dle předpokladů by neměla probíhat souběžně s osou tunelu. Jelikož 2D analýzy představují situaci rovinné deformace, protáhlo by se každé explicitně modelované zlomové pásmo v osovém směru donekonečna. Proto lze výsledky výpočtů považovat na bezpečné straně.

5.4.2 Výsledky simulace

Nastavení modelu, screenshoty z modelů a grafy výsledků jsou k dispozici v příloze B. Tabulka 2 ukazuje souhrn výsledků simulace. Objekty, které vyžadují další posouzení deformací ve fázi 2, jsou označeny hvězdičkou.

Tabulka 2: Výsledky simulace, ražené tunely (S=sever, J=jih, St=střed)

Řez	Popis	Příslušné sedání povrchu
S 4+634	Pod budovami v Buštěhradské ulici, mělké nadloží, zemina	VL = 0,5 %: 14 mm VL = 1,0 %: 30 mm *
St,J 4+285	Pod ulicí Pod Hradbami, první budova v pásmu vlivu.	VL = 0,5 %: 4 mm VL = 1,0 %: 15 mm *
St,J 4+335	Pod ulicí Pod Hradbami, první soukromý dům v pásmu vlivu.	VL = 0,5 %: 0 mm VL = 1,0 %: 3 mm
S,St,J 7+300	Vedle teplárny, mělké nadloží, zlomové pásmo	s využitím podpůrného tlaku: SP = 1,3 barů:13 mm *
St,J 4+793	Pod tramvajovým depem, hornina se zlomovým pásmem	β = 0,5/0,8: 5 mm
J 5+600	Hluboko pod kostelem Svatého Norberta	β = 0,2: 6 mm

J 6+820	Hluboko pod Vojenskou nemocnicí	β = 0,2: 7 mm
S 6+820	Hluboko pod Vojenskou nemocnicí	β = 0,2: 7 mm
St 6+820	Hluboko pod Vojenskou nemocnicí, v blízkosti svahu, zlomové pásmo v tunelu 1.	β = 0,8/0,2: 2 mm (10 mm nad tunelem ve svahu)

Na základě výsledků simulace pro ražené tunely existují pouze tři řezy, které vykazují sedání povrchu v místě zranitelných objektů: varianta SEVER v km 4+634, kde prochází pod budovami v Buštěhradské ulici, varianty JIH a STŘED, když procházejí pod budovami v ulici Pod Hradbami (avšak s menším sedáním než u budov varianty SEVER), a všechny varianty vedení trasy při průchodu vedle teplárny směrem k západnímu portálu.

5.5 Posouzení výsledků simulace

HLOUBENÁ varianta využívá různých zavedených a osvědčených metod výstavby, které umožňují návrh projektu tak, aby byla dle potřeby splněna případná deformační kritéria. S ohledem na současnou fázi projektu výsledky analýzy naznačují velmi rozsáhlé deformace a částečné problémy se stabilitou, které je třeba v dalších fázích projektu vyřešit.

Lze očekávat, že dodatečná pomocná opatření, jako například vytvoření dočasného ostění kaloty, jehlování nebo mikropilotový deštník povedou ke značné pracnosti úseků ražených metodou NRTM. Pokud jde o hloubené výkopy, budou pravděpodobně nezbytná rozsáhlá kotevní opatření nebo vnitřní rozpěrné konstrukce. V obou případech to povede k vyšší pracnosti, a tedy ke zvýšení nákladů a prodloužení doby výstavby.

Také návrh ražených variant tunelu se bude muset vypořádat s deformacemi masivu zejména u portálových oblastí. Metoda EPB umožňuje ražbu tunelu s velmi malými deformacemi nadloží, pokud je provedena správně a s neustálým monitoringem.

Na základě metodiky posuzování škod na objektech podle Burlanda a Wrotha [2.11] bylo provedeno posouzení sedání - fáze 1 s využitím výsledků simulace jako reprezentativního sedání ve volném terénu. Byla zvolena kritéria posouzení, celkový posun 12 mm na úrovni suterénu budovy a maximální sklon poklesové kotliny η = 1/800. Lokality a budovy, které tyto hodnoty překročí, musejí být zkoumány v rámci budoucího posouzení sedání - fáze 2, jehož součástí je podrobnější modelování a pokročilejší materiálové modely.

Lokality, doporučené pro podrobnější posouzení sedání - fáze 2 během dalších stupňů přípravy, jsou:

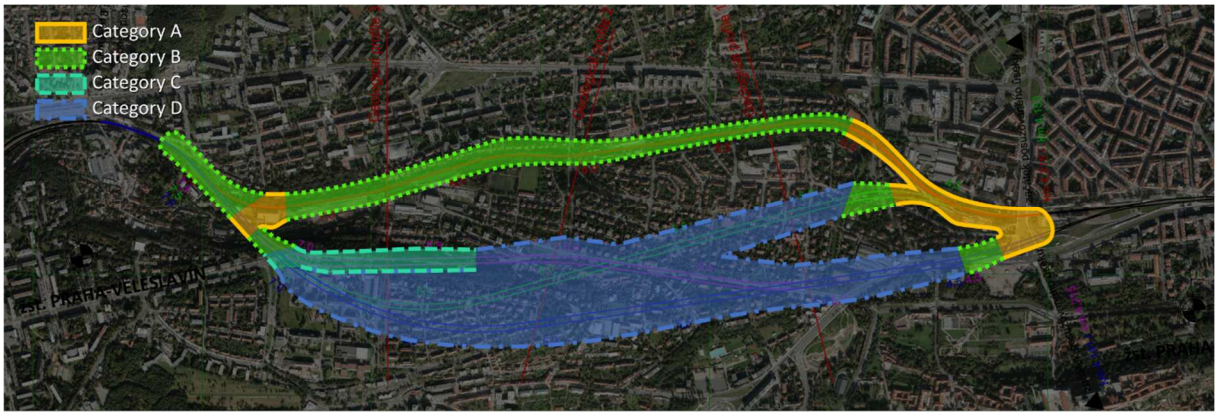
- Prostor východního portálu u varianty SEVER (hloubený úsek v blízkosti vodojemu Bruska).
- Budovy v Buštěhradské ulici u varianty SEVER.
- Křížení s rampou tunelu Blanka u variant STŘED a JIH (není podrobně uvažováno v této Zprávě).
- První budova v ulici Pod Hradbami (km 4+285) u variant STŘED a JIH (v menším rozsahu než budovy v prostoru portálu varianty SEVER).
- Západní portál s ražbou u teplárny (pro všechny varianty).

Ve všech ostatních řešených oblastech bude celkové sedání v místě nadzemních objektů, i v případě nejhorší možné ztráty objemu 1,0 %, nižší než 12 mm a očekávaný sklon poklesové kotliny menší než 1/800.

Pro stanovení předpokládaného vlivu sedání na celou projektovou oblast byly výsledky výpočtů interpolovány a extrapolovány na základě klasifikace rizik. Proto jsou všechny budovy podél navržené trasy přiřazeny do jedné z těchto kategorií:

- Kat. A: Pro zmírnění rizik sedání jsou nutná technická opatření
- Kat. B: Možné riziko způsobené sedáním
- Kat. C: Nízké riziko způsobené sedáním
- Kat. D: Vliv tunelování je pravděpodobně zanedbatelný

Pro budovy kategorie A a B je doporučeno dále posoudit vliv tunelování během dalších fází přípravy. Dle potřeby u těchto objektů by měla být vytvořena technická řešení pro zmírnění rizik spojených s výstavbou tunelu. Příslušná pásma, kde se nacházejí budovy každé kategorie, jsou znázorněna na mapě projektové oblasti na Obrázek 10.



Obrázek 10: Kategorie (Category) rizik pro pozemní objekty v projektové oblasti.

6 Další otázky týkající se konkrétních témat

6.1 Průchod TBM zlomovými pásmy a případné propojení zvodní

Přítomnost předpokládaných pásem vyšší propustnosti v pásmech tektonických zlomů vedla k obavám z případného propojení dvou oddělených zvodní. Aby k tomu nedošlo, je důležité minimalizovat odtok podzemních vod podél trasy tunelu.

Jelikož i mechanické vlastnosti hornin ve zlomových pásmech vyžadují úpravu módu a parametrů ražby, je doporučeno ještě před zasažením těchto lokalit provést průzkumné vrty či jiné prediktivní metody s cílem detekovat zlomová pásma. Při ražbě zlomovým pásmem je nutné zvolit uzavřený mód EPB a uplatňovat aktivní podpůrný tlak na čelbě. Pokud není možné zlomové pásmo předem rozeznat, je nutné při zjištění přítoku vody dočasně uzavřít hradlo šnekového dopravníku, dokud nebude možné udržovat podpůrný tlak. Možný je i preventivní provoz v přechodovém módu, kdy se pro udržení podzemní vody používá stlačený vzduch v těžební komoře.

Aby nedošlo k odvádění vody dokončeným tunelem, musí být prstencová mezera mezi ostěním a masivem řádně vyplněna injektáží. Dále je vhodné zvážit injektážní otvory v dílcích ostění, které lze využít k sekundární těsnicí injektáži (profylaktické nebo při zjištění netěsností).

6.2 Výstavba odvětrávacích šachet

Ražené odvětrávací šachty procházejí oběma zvodněmi a musejí být utěsněny. Toho lze dosáhnout tvorbou injektážních bariér mezi zvodněmi. Za tímto účelem je nutné navrhnout vhodné schéma injektáže alespoň na dvou různých úrovních v závislosti na injektovatelnosti masivu.

V příkladu z referenčního projektu je každá bariérová vrstva tvořena alespoň čtyřmi řadami injektáže po obvodu šachty se střídavým odstupem 0,75 a 1,0 m. Pomocí plášťových trubek a předem vytvořených injektážních otvorů v ostění šachty lze injektáž provést kontrolovaně a vodotěsně. Délka vrtání závisí na propustnosti masivu a musí být dostatečná, aby tvořila neproniknutelnou bariéru. Běžná délka vrtání se pohybuje mezi 3 a 4 m.

Obvyklé materiály používané pro injektáž jsou cementová suspenze nebo akrylátový gel. V obou případech je nutné prověřit bezpečnost pro životní prostředí. Vlastní schéma injektáží a injektážní materiály musejí být zvoleny v nadcházejících fázích projektu.

Aby byla zajištěna kvalita a efektivita injektáže, je nezbytné neustále sledovat injektážní tlaky a objemy. Pro lokální testy efektivity bariéry lze využít přetěsněné testovací vrty mezi dvěma úrovněmi bariér.

Pokud je bariérová injektáž provedena kvalitně, je riziko propojení zvodní nízké.

6.3 Další geotechnický průzkum v příští fázi projektu

V příští fázi projektu ražených variant tunelu se doporučuje provést dodatečný geotechnický průzkum masivu , zejména laboratorní testy s ohledem na nasazení tunelovacího stroje EPB. Obrázek 11 uvádí výňatek z poslední revize doporučení DAUB pro výběr TBM [2.9] zobrazující přehled příslušných parametrů pro tunelovací stroje EPB.

DAUB

Anhänge zur Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen

Anhang 3.5 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien EPB

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Erddruckschildmaschine (EPB) Earth Pressure Balanced shield (EPB)				
	+ Haupteinsatzbereich / main field of application O erweiterter Einsatzbereich / extended application – Einsatz eingeschränkt / application limited				
Lockergestein (Soil)					
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	<5 % –	5 – 15 % O	15 – 40 % O +	>40 % +	
Durchlässigkeit k nach DIN 18130 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high $> 10^{-2}$ –	stark high $10^{-2} – 10^{-4}$ –	durchlässig permeable $10^{-4} – 10^{-6}$ O	schwach low $< 10^{-6}$ +	
Konsistenz (I_C) nach DIN 18122 Consistency (I_C)	breiig very soft 0 – 0,5 O	weich soft 0,5 – 0,75 +	steif stiff 0,75 – 1,0 +	halbfest very stiff 1,0 – 1,25 O	fest hard 1,25 – 1,5 O
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense +	mitteldicht medium dense +	locker loose +		
Stützdruck [bar] Confinement pressure[bar]	0 +	1 – 4 +		4 – 7 O	7 – 15 –
Quellpotential Swelling potential	kein none +	gering little +	mittel fair O	hoch high –	
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasivity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5 +	5 – 15 +	15 – 35 O	35 – 75 O	75 – 100 –
Festgestein (Rock)					
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5 / 5 – 25 O / O	25 – 50 O	50 – 100 –	100 – 250 –	> 250 –
Bohrkern- Gebirgsqualität [RQD] Core sample - rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25 +	gering poor 25 – 50 O	mittel fair 50 – 75 O	gut good 75 – 90 –	ausgezeichnet excellent 90 – 100 –
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20 +	schlecht poor 21 – 40 O	mäßig fair 41 – 60 O	gut good 61 – 80 –	sehr gut very good 81 – 100 –
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0 O	0 – 10 O	10 – 25 O	25 – 125 O	> 125 O
Abrasivität (CAI) Abrasivity (CAI)	kaum abrasiv hardly abrasive 0,3 – 0,5 +	schwach abrasiv slightly abrasive 0,5 – 1 +	abrasiv abrasive 1 – 2 O	stark abrasiv very abrasive 2 – 4 O	extrem abrasiv extremely abrasive 4 – 6 –
Quellpotential Swelling potential	kein none +	gering poor +	mittel fair O	hoch high –	
Stützdruck [bar] Confinement pressure[bar]	0 O	1 – 4 +		4 – 7 O	7 – 15 –

Obrázek 11: Příloha 3.5 doporučení DAUB pro výběr TBM [2.9] (kritéria EPB)

Následující parametry jsou zásadní pro provoz EPB a mohou mít významný vliv na návrh stroje a provozní parametry:

- Požadovaný podpůrný tlak na čelbě: v závislosti na propustnosti zlomových pásem a množství přiváděné vody v těchto oblastech může požadovaný podpůrný tlak dosáhnout „rozšířené oblasti nasazení“ použití podle [2.9]. V takovém případě musí být štít TBM konstruován tak, aby odolal příslušným tlakům (např. těsnění, kompresory atd.).
- Konzistence rubaniny a riziko zalepování v oblastech zemin, zvětralých hornin, ale i hornin rozdrcených razicím štítem: To je požadováno pro koncepci kondicionování rubaniny a návrh systému kondicionování rubaniny. To zahrnuje zkoušky meze plasticity (Atterbergovy hodnoty) všech příslušných zemin a rekonstruovaných vzorků hornin obsahujících jílové minerály. Jelikož se zkoušky meze plasticity podle geotechnických norem provádějí pouze u zemin, je důležité vzít v úvahu, že se jílovité horniny (většinou sedimentární) mohou během odtěžování přeměnit na materiál připomínající zeminu.
- Abrazivita: abrazivita masivu má zásadní důležitost pro návrh koncepce údržby stroje. Vstupy na čelbu ve zvodnělých oblastech mohou být vzhledem k vysokým hydrostatickým tlakům obtížné.
- Pevnost hornin: Pevnost hornin má zásadní vliv nejen na rychlost opotřebení nástrojů, ale i na samotnou rychlost ražby. Předpokládaná rychlost ražby je důležitá pro návrh zásobovacího řetězce, výrobu segmentového ostění a rozdělení pracovních sil a výrobního zařízení.
- Elastické chování masivu pro všechny horniny: pro podrobné posouzení sedání je třeba v dalším průzkumu posoudit chování při odlehčení a opětovném přitížení hornin.

6.4 Monitorování povrchu terénu pomocí satelitu

Monitorování rozsáhlých ploch pomocí satelitní radarové interferometrie představuje osvědčenou metodu, která doplňuje pozemní monitorování deformací tachymetrem. Rozlišení v čase a prostoru sice není takové, aby jej bylo možné použít jako jediný systém monitorování, ale tato technika slouží ke zvětšení oblasti průzkumu, poskytuje dodatečné body měření, a tím posiluje tvorbu průkazné dokumentace a zlepšuje vnímání projektu veřejností.

Pokud jsou na různá místa v oblasti monitorování umístěny konkrétní tachymetrické zaměřovací body, lze údaje ze satelitního monitorování korelovat a dále zvýšit kvalitu měření.

6.5 Vibrace z tunelování TBM

V závislosti na vlastnostech hornin se nízkoúrovňové vibrace působící na horninový masiv při odtěžování půdy pomocí TBM v určité vzdálenosti od razicí hlavy utlumují. Přípustnými emisemi vibrací se zabývá norma ISO 2631 a její česká národní implementace ČSN ISO 2631-2, které se zabývají nízkofrekvenčními vibracemi 1 až 80 Hz.

Podle předpisů je nejdůležitějším aspektem doba trvání rušení. Dočasné emise vibrací jsou přípustné. Průchod TBM je v každém případě dočasným zdrojem vibrací: Buď je ražba rychlá, takže TBM postupuje rychle a rušení je krátké; nebo je TBM v delší nečinnosti. V takovém případě, kdy TBM nerazí, vibrace přestanou.

Na vedení trasy ražených tunelů jsou dva hlavní úseky významné z hlediska posouzení vibrací: oblast zemin s nízkým nadložím v blízkosti portálů (zejména východního portálu) a horninové oblasti s vysokým nadložím podél větší části středního úseku těchto tras.

Pokud jde o emise vibrací, žádné z těchto oblasti nevzbuzují větší obavy:

- Zemina v mělkém úseku má tlumicí vlastnosti, které utlumí vibrace na krátkých vzdálenostech.
- V horninovém úseku je vzdálenost mezi razicí hlavou a povrchem terénu obecně velká.
- Zkušenosti ze srovnatelných projektů ukazují, že vibrace z provozu TBM obvykle nejsou problematické.

Doporučuje se nainstalovat podél trasy tunelu zařízení pro měření vibrací pro lepší shromažďování průkazné dokumentace. Současně s transparentní komunikací stavebních činností a souvisejících emisí hluku a vibrací to může přispět k významnému zlepšení přístupu veřejnosti k projektu. V případě vysokých emisí vibrací patří mezi běžné postupy kompenzace nebo dočasné ubytování obyvatel mimo jejich domovy.

Je třeba zmínit, že výše uvedená hlediska platí pouze pro samotnou ražbu TBM. Vibrace a hluk vyvolaný povrchovým zařízením staveniště zde nejsou uvažovány. Výše uvedené závěry rovněž neberou v potaz provoz tunelu po jeho dokončení.

6.6 Způsob provozu TBM pro minimalizaci sedání

Jak je již popsáno v kapitole 4.4, závisí bezpečnost a efektivita ražby pomocí TBM na návrhu a použití vhodných provozních parametrů stroje. TBM musí být patřičně udržováno, s funkčními řeznými nástroji, aby účinně provádělo ražbu v masivu. Je třeba zabránit zalepování nástrojů, otvorů v razicí hlavě, odtěžovací komory a dopravníkového systému, aby mohl být udržován kontrolovaný podpůrný tlak na čelbě a zajištěn efektivní provoz stroje. Injektáž v prstencové mezeře za rub ostění musí být kontrolována z hlediska tlaků a

objemů, aby se při ražbě zajistila minimální ztráta objemu masivu. Skládané ostění musí být smontováno podle návrhu, musí být správně umístěno, se spolehlivým těsněním a bez poškození.

Štíty TBM jsou vybaveny systémem pro sběr dat, jenž neustále zaznamenává stovky hodnot ze snímačů všech subsystémů stroje. Proto je možné a mimořádně důležité tyto naměřené hodnoty sledovat, analyzovat a posuzovat s cílem udělat si podrobný obrázek o procesu ražby a provozu TBM.

Pomocí integrované platformy pro správu dat lze současně s daty z TBM zobrazit a vyhodnotit údaje z monitorování povrchu, čímž se zlepšuje celková informovanost. Je možné přímo sledovat potenciální dopady provozních rozhodnutí a operátoři a směnoví technici mají přístup ke všem informacím, které potřebují pro optimální provoz stroje.

7 Porovnání variant vedení trasy

7.1 Vliv tunelování na konkrétní objekty v oblasti

V zadání posudku je vyjmenováno několik významných objektů, u nichž je třeba posoudit ovlivnění z hlediska sedání vyvolaného tunelovacími činnosti. Tento seznam budov a infrastruktury představoval důležité kritérium při výběru řezů pro analýzu v kapitole 5. Odhadovaný vliv sedání ve volném terénu, interpolovaný z numerických výpočtů, uvádí Tabulka 3 níže.

Tabulka 3: Vliv sedání půdy vyvolaného tunelováním na významné objekty, S = sedání, η = sklon poklesové kotliny

Objekt/budova	Ovlivněný variantou	Odhadované sedání ve volném terénu	Poznámka
Fyzikální ústav Akademie věd ČR	SEVER	S < 10 mm η < 1/800	Poznámka: vibrace z provozu tunelu nejsou do naší zprávy zahrnuty.
Vojenská fakultní nemocnice Praha	SEVER, STŘED, JIH	S < 12 mm η < 1/800	Vysoké horninové nadloží, zanedbatelný vliv na povrch terénu
Vodojem Bruska	HLOUBENÁ, SEVER	S > 10 mm	Analýza fáze 1 poukazuje na nutnost provedení druhé fáze posouzení
Silniční tunel Blanka	STŘED, JIH	-	Poznámka: Není součástí

			našeho posouzení, viz poznámky v textu.
Tramvajové depo Střešovice	STŘED, JIH	S < 10 mm η < 1/800	Středně mocné horninové nadloží, zanedbatelný vliv na povrch terénu
Kostel Sv. Norberta	JIH	S < 10 mm η < 1/800	Vysoké horninové nadloží, zanedbatelný vliv na povrch terénu
Evangelický kostel ve Střešovicích	JIH	S < 10 mm η < 1/800	Vysoké horninové nadloží, zanedbatelný vliv na povrch terénu
Teplárna Veleslavín	Všechny varianty	S > 10 mm	Analýza fáze 1 poukazuje na nutnost provedení druhé fáze posouzení
Památkově chráněné budovy v oblasti Proboštského Dvora	HLOUBENÁ	S > 10 mm	Sensitivní budovy s vysokým rizikem sedání v přímém sousedství opěrných zdí tunelu, nutné provedení fáze 2 posouzení
Buštěhradská ulice	SEVER	S > 10 mm	Analýza fáze 1 poukazuje na nutnost provedení druhé fáze posouzení
Ulice Pod Hradbami, první budova v pásmu vlivu tunelu (km 4+285)	STŘED, JIH	S > 10 mm při vyšší ztrátě objemu	Analýza fáze 1 poukazuje na nutnost provedení druhé fáze posouzení
Ulice Pod Hradbami, první soukromý objekt (km 4+335)	STŘED, JIH	S < 5 mm η < 1/800	

7.2 Rizika související s variantami vedení trasy

Zatímco základem posouzení jsou numerické analýzy sedání a jeho předpokládaný vliv na objekty podél tras, důležitou úlohu v posouzení hrají i další technické a organizační aspekty. Vzhledem k nedostatku podrobných odhadů nákladů výstavby v současné fázi návrhu vychází následné posouzení rizik z jednoduché, nevážené matice, která obsahuje jednotlivá rizika a obecné posouzení jeho závažnosti – vysoká, střední nebo nízká – pro každou z variant.

Tabulka 4 obsahuje tuto matici rizik pro každou variantu vedení trasy. Jsou zde uvedena jen technická nebo obecná hlediska. Na základě současné fáze návrhu lze stavební pracnost a náklady uvažovat pouze kvalitativně. Předpokládá se, že technická proveditelnost, bezpečnost a potenciál kladného přístupu veřejnosti k projektu převažují nad detailními finančními hledisky. „+“ označuje nízké riziko dané varianty, „o“ střední riziko a „-“ vysoké riziko dané varianty. Každému „+“ a „-“ je přiděleno kladné nebo záporné skóre. Na konci Tabulka 4 je vypočteno celkové skóre každé varianty, kdy je za každé vysoké riziko připočtena hodnota -1, za každé nízké riziko +1 a za každé střední riziko nula. Jen připomínáme, že jednotlivé aspekty nejsou vážené, takže vážená analýza rizik by mohla vést k rozdílným hodnotám skóre.

Tabulka 4: Posouzení rizik pro každou variantu

Riziko (+ = nízké, o = střední, - = vysoké)	**HLOUBENÁ**	**SEVER**	**STŘED**	**JIH**
Pracnost průzkumu a návrhu				
Dodatečné vrtné sondy	+	-	-	-
Dodatečné laboratorní testy	o	-	-	-
Dodatečná posouzení sedání	-	o	o	o
Návrhová rizika				
Ražba pod tunelem Blanka	+	+	-	-
Ochrana budov	-	-	o	o
Ochrana teplárny	-	o	o	o
Utěsnění zvodní	+	-	-	-
Návrh šachet	+	-	-	-
Návrh hloubených tunelů	-	o	+	+
Stavební pracnost				
Pomocná opatření při NRTM	-	+	+	+
Pomocná opatření při HLOUBENÉ variantě	-	+	+	+
Pomocná opatření při stavbě šachet	+	o	o	o
Pomocná opatření pro EPB	+	o	o	o
Prostor pro staveniště	o	o	o	o
Nutné trhací práce?	-	+	+	+
Geologická rizika				
Nedostatečná stabilita masivu	-	+	+	+

Riziko (+ = nízké, o = střední, - = vysoké)	**HLOUBENÁ**	**SEVER**	**STŘED**	**JIH**
Vliv hladiny podzemní vody	+	o	o	o
Tunelování souběžně s patou svahu	+	o	-	o
Odchylka parametrů masivu od předpokládaných parametrů	-	o	o	o
Rizika tunelování				
Rozsah tunelování v zeminách	-	o	+	+
Rizika TBM	+	-	-	-
Rizika NRTM	-	+	+	+
Rizika hloubených tunelů	-	o	+	+
Vliv na okolí				
Sedání	-	o	+	+
Propojení zvodní	+	o	o	o
Vibrace ze stavební činnosti	-	o	+	+
Hluk ze stavební činnosti	-	o	+	+
Znečištění podzemních vod	o	+	+	+
Portálové prostory (rušení obyvatel v sousedství)	-	-	o	o
Odvod podzemních vod tunelem	+	+	+	+
Shrnutí				
Celkové skóre, nevážené	**-5**	**1**	**6**	**7**

7.3 Porovnání variant

Jak lze vidět na neváženém skóre, které ukazuje Tabulka 4, dosáhla HLOUBENÁ varianta nejméně příznivého skóre. To je částečně způsobeno neúplným návrhem v této projekční fázi. S ohledem na technické možnosti zdokonalení návrhu opěrných zdí lze ve většině případů omezit nepříznivý dopad na sedání povrchu. Stále ale přetrvává nevyhnutelné narušení povrchu způsobené výstavbou v otevřené stavební jámě. Vzhledem k velkému počtu pomocných opatření nutných pro řešení problémů se stabilitou a deformací budou úseky realizované hloubením a metodou NRTM náročné a drahé. Hluk a vibrace ze stavební činnosti dále budou rušit obyvatele po celé délce trasy a neomezí se jen na portálové prostory.

Varianta SEVER sdílí v oblasti východního portálu některá rizika hloubené varianty, kde musí být úsek podél vodojemu Bruska postaven v otevřené stavební jámě. Krátce poté prochází ražený tunel pod obytnou budovou s velmi nízkým zeminovým nadložím. Tato oblast je sice

technicky proveditelná, ale nese sebou nejvyšší rizika sedání ze všech ražených variant tunelu. Pokud jde o postoj veřejnosti, existují určité obavy týkající se úseku přímo pod Fyzikálním ústavem, které lze nejjednodušeji vyřešit vedením trasy mimo jeho pozemek.

Další stupeň projektové dokumentace variant STŘED a JIH se bude muset zabývat křížením s rampou tunelu Blanka. Tento aspekt nebyl podrobně zahrnut do hledisek této Zprávy. Kromě tohoto úseku se neočekává žádné větší riziko způsobené sedáním. Několik lokalit (ulice Pod Hradbami a západní portál) budou během dalšího projektování vyžadovat podrobnější analýzy sedání s pokročilejším modelováním. Přesto jsou tyto oblasti méně zranitelné než budovy, na které naráží varianta SEVER.

Po oddělení variant STŘED a JIH tvoří obě trasy hluboké tunely převážně v tvrdé hornině. Zlomová pásma se očekávají ve všech variantách vedení trasy. Jejich přesný rozsah a orientace nejsou známy a proto nebyly v posouzení rizik konkrétně uvažovány. Varianta STŘED ale vede souběžně s patou svahu střešovické plošiny, kde se předpokládá jedno zlomové pásmo. Tím je mírně zvýhodněna varianta JIH. Nadále počet traťových oblouků na trase je menší u varianty JIH než u varianty STŘED, takže tato varianta umožní plynulejší provoz trati.

Výsledkem posouzení je preference varianty vedení trasy JIH. Na druhém místě se umístila varianta STŘED. Varianta SEVER je z ražených variant tunelu nejméně příznivá, zatímco HLOUBENÁ varianta je celkově nejhorší, a to vzhledem k technickým obtížím a rušení obyvatel v sousedství trasy.

8 Závěrečné poznámky

V souhrnu posouzení variant vedení trasy lze uvést, že podrobnost návrhu a objem průzkumů geotechnických podmínek jsou pro danou fázi návrhu mezi studií proveditelnosti a úvodním projektem (pre-design) velmi pokročilé. Je zřejmé, že v dalších fázích návrhu bude nutné vyřešit několik důležitých aspektů. To zahrnuje stavební detaily pro konkrétní lokality, například portálové prostory a úseky u některých budov, návrh opěrných zdí a pomocných opatření pro metodu NRTM, pokud bude zvolena HLOUBENÁ varianta, a návrh TBM a ostění, ale i odvětrávacích šachet pro ražené varianty tunelu.

Pokud bude zvolena ražená varianta tunelu, je doporučen dodatečný průzkum parametrů masivu, které jsou důležité pro návrh a provoz EPB. Dále je třeba prozkoumat vlastnosti masivu z hlediska injektovatelnosti a reakce na bariérovou injektáž, aby bylo možné navrhnout těsnění zvodní jak pro ražený tunel, tak i pro výstavbu šachet. Další stupeň geotechnického průzkumu by měl také zjistit další pásma tektonických zlomů, jejichž znalost lze využít pro zlepšení technického návrhu.

Je důrazně doporučen integrovaný systém správy dat pro kombinaci měření z povrchového monitorování, potenciálního satelitního monitorování, dat z TBM, logistiky, vybavení staveniště a dalších datových zdrojů, který umožní detailní dohled, vedení průkazné dokumentace, lepší interní a externí komunikaci a vhodnou reakci na potenciální nebezpečí. Dále se doporučuje objednat nezávislý odborný posudek tunelování EPB a správy dat již v rané fázi projektu, aby se zajistil hladký proces výběrového řízení a zadání zakázky. Dále je doporučeno najmout nezávislého konzultanta pro analýzu a posouzení dat pro ražbu TBM, staveniště a údaje z monitorování.