



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební  
Katedra geotechniky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

***Vliv průzkumné štoly na ražbu podzemního díla***

*Impact of the exploratory gallery on the underground construction excavation*

**2019**

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: **Ing. Alexandr Butovič, Ph.D.**



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

#### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Podzemský	Jméno: Marek	Osobní číslo: 458616
Zadávající katedra: Geotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

#### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv průzkumné štolý na ražbu podzemního díla

Název bakalářské práce anglicky: Impact of the exploratory gallery on the underground construction excavation

Pokyny pro vypracování:  
Bakalářská práce se bude zabývat problematikou realizace průzkumných štol jako nejpodrobnějších způsobů získání informací o geologických a hydrogeologických podmínkách v trase budoucích tunelů. Bude se zabývat zejména následujícím oblastem:

1. rešerše legislativních podmínek pro realizaci průzkumných štol
2. rešerše realizovaných štol na území ČR, včetně kvantifikace jejich přínosů
3. rešerše přístupu k předemtné problematice v zahraničí
4. význam realizace průzkumných štol
5. technické možnosti realizace průzkumných štol
6. vliv průzkumné štolý na budoucí dílo zejména z napjatostního, deformačního, stabilitního, geologického a hydrogeologického hlediska

Seznam doporučené literatury:

1. Příspěvky ze sborníků tuzemských i zahraničních konferencí o podzemních stavbách
2. Odborné tuzemské i zahraniční časopisy zabývající se problematikou podzemního stavitelství
3. Výsledky IG průzkumů realizovaných formou průzkumné štolý
4. Výsledky geotechnického monitoringu realizovaného u podzemních děl, jímž předcházela ražba průzkumné štolý

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Alexandr Butovič, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 27. 2. 2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 26. 05. 2019  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

#### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

28.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma vliv průzkumné štoly na ražbu podzemního díla vypracoval samostatně pouze za odborných konzultací s vedoucím diplomové práce panem Ing. Alexandrem Butovičem, Ph.D.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny použité informační prameny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 26. 5. 2019

Marek Podzemský



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Alexandru Butovičovi, Ph.D., za odborné rady, za pomoc, za čas strávený konzultacemi a za vedení mé bakalářské práce. Mé poděkování náleží také Ing. Tomáši Louženskému a Ing. Jaroslavu Němečkovi za poskytnutí podkladů.



## Abstrakt

Bakalářská práce se bude zabývat problematikou realizace průzkumných štol jako nejpodrobnějšího způsobu získání informací o geologických a hydrogeologických podmínkách v trase budoucích tunelů.

## Klíčová slova

průzkumná štola, geotechnický průzkum, ražba, primární ostění, metoda konečných prvků

## Abstract

The bachelor thesis will deal with the realization of exploratory gallery as the most detailed way of obtaining information about geological and hydrogeological conditions in the future tunnel route.

## Key words

exploratory gallery, geotechnical survey, excavation, primary lining, finite element method



## OBSAH

1	ÚVOD .....	11
2	LEGISLATIVNÍ PODMÍNKY PRO REALIZACI PRŮZKUMNÝCH ŠTOL .....	12
2.1	Vymezení pojmů.....	12
2.1.1	Geotechnický průzkum (GTP).....	12
2.1.2	Práce GTP .....	12
2.1.3	Průzkumné štoly .....	12
2.2	Vybrané paragrafy vyhlášky č. 55/1996 Sb. [2].....	13
3	REALIZOVANÉ ŠTOLY NA ÚZEMÍ ČR .....	15
3.1	Průzkumná štola silničního tunelu Mrázovka .....	16
3.1.1	Úvod .....	16
3.1.2	Základní informace .....	16
3.1.3	Konstrukční řešení průzkumné štoly .....	17
3.1.4	Inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry .....	17
3.1.5	Výsledky monitoringu.....	19
3.2	Průzkumná štola tunelu Slivenec – Lahovice .....	20
3.2.1	Úvod .....	20
3.2.2	Základní informace .....	20
3.2.3	Inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry .....	20
3.2.4	Konstrukční řešení.....	22
3.2.4.1	Průběh ražby .....	22
3.2.5	Závěr.....	22
3.3	Průzkumné štoly tunelů Dobrovského .....	23
3.3.1	Úvod .....	23
3.3.2	Základní informace .....	23
3.3.3	Inženýrskogeologické poměry.....	24
3.3.3.1	Kvartérní horniny .....	25
3.3.3.2	Neogenní horniny.....	25
3.3.4	Hydrogeologické poměry .....	25
3.3.5	Průběh ražby .....	26
3.3.6	Výsledky monitoringu.....	28
3.4	Průzkumná štola pro tunelový komplex Blanka .....	30
3.4.1	Úvod .....	30
3.4.2	Základní informace .....	31
3.4.3	Konstrukční řešení průzkumné štoly .....	32
3.4.3.1	Primární ostění .....	32
3.4.3.2	Ražba .....	32



3.4.3.3	Sanační injektáže.....	33
3.4.3.4	Odvodnění.....	33
3.4.3.5	Bezpečnost.....	33
3.4.4	Inženýrskogeologické poměry.....	33
3.4.4.1	Horniny skalního podloží.....	34
3.4.5	Hydrogeologické poměry.....	35
3.4.6	Výsledky monitoringu.....	35
3.4.6.1	Deformace povrchu terénu.....	35
3.4.6.2	Deformace nadzemní zástavby.....	36
3.4.6.3	Konvergenční měření.....	36
3.4.6.4	Přítoky do průzkumné štoly.....	37
3.5	Ražená díla jako doplňkový GT průzkum budoucí stanice metra Pankrác D.....	38
3.5.1	Úvod.....	38
3.5.2	Inženýrskogeologické poměry.....	38
3.5.3	Základní informace o ražených dílech.....	40
3.5.3.1	Doplňkový geotechnický průzkum PAD4.....	40
3.5.3.2	Doplňkový geotechnický průzkum VO-OL.....	40
3.5.3.3	Doplňkový geotechnický průzkum OL1.....	41
3.5.3.4	Doplňkový geotechnický průzkum PAD1b.....	41
3.5.4	Závěr.....	42
4	PŘÍSTUP K REALIZACI PRŮZKUMNÝCH ŠTOL V ZAHRANIČÍ.....	43
4.1	Průzkumná štola tunelu Višňové (Slovensko).....	44
4.1.1	Úvod.....	44
4.1.2	Základní informace.....	44
4.1.3	Inženýrskogeologické poměry.....	45
4.1.4	Průběh ražby.....	46
4.1.4.1	Ražba ze západního portálu.....	46
4.1.4.2	Ražba z východního portálu.....	46
4.1.5	Závěr.....	47
4.1	Průzkumná štola Gotthardského bázového tunelu (Švýcarsko).....	48
4.1.1	Úvod.....	48
4.1.2	Základní informace.....	48
4.1.3	Průzkumná štola Piora.....	50
4.1.4	Význam předběžného průzkumu a sondování.....	51
4.2	Brennerský bázový tunel (Rakousko – Itálie).....	52
4.2.1	Úvod.....	52
4.2.2	Základní informace.....	53
4.2.3	Geologické poměry.....	54
4.2.4	Průběh ražby štoly na úseku Aica - Mules.....	54
4.2.5	Postup ražby tunelů na ostatních částech stavby.....	56
5	TECHNICKÉ MOŽNOSTI REALIZACE PRŮZKUMNÝCH ŠTOL.....	57



5.1	Umístění průzkumné štoly .....	57
5.1.1	Umístění v trase tunelové trouby .....	57
5.1.2	Umístění v trase druhé (z hlediska výstavby) tunelové trouby.....	57
5.1.3	Umístění mimo průřez tunelové trouby .....	58
5.1.4	Umístění vzhledem k technologii ražby .....	58
6	MONITORING BĚHEM RAŽBY PRŮZKUMNÉ ŠTOLY .....	59
7	VÝZNAM REALIZACE PRŮZKUMNÉ ŠTOLY .....	60
7.1	Přínos průzkumné štoly pro přípravu a realizaci budoucího tunelu .....	60
8	VÝPOČETNÍ MODELY .....	62
8.1	Úvod .....	62
8.2	Vytvoření modelu.....	62
8.3	Parametry hornin a zemin.....	64
8.4	Primární ostění.....	64
8.5	Výpočet.....	66
8.5.1	Model A (se štolou) .....	66
8.5.1.1	Fáze 1 – primární napjatost.....	66
8.5.1.2	Fáze 2 – výrub štoly .....	67
8.5.1.3	Fáze 3 – primární ostění štoly .....	69
8.5.1.4	Fáze 4 – výrub 1. kaloty.....	69
8.5.1.5	Fáze 5 – primární ostění 1. kaloty .....	70
8.5.1.6	Fáze 6 – výrub 2. kaloty.....	70
8.5.1.7	Fáze 7 – primární ostění 2. kaloty .....	70
8.5.1.8	Fáze 8 – výrub dna.....	71
8.5.1.9	Fáze 9 – primární ostění dna .....	71
8.5.2	Model B (bez štoly).....	71
8.6	Porovnání modelů .....	72
8.6.1	Úroveň povrchu terénu .....	72
8.6.2	Nadloží tunelu .....	73
8.6.3	Primární ostění .....	75
8.7	Porovnání modelu s měřením in situ .....	78
8.8	Zhodnocení výsledků.....	79
9	ZÁVĚR.....	80
9.1	Závěr teoretické části .....	80





9.2	Závěr praktické části.....	81
10	POUŽITÉ ZDROJE .....	82
10.1	Literatura.....	82
10.2	Seznam obrázků .....	84
10.3	Seznam tabulek .....	85
10.4	Seznam grafů.....	85
11	PŘÍLOHY .....	85



## **SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

GTP	geotechnický průzkum
NRTM	nová rakouská tunelovací metoda
TT	technologická třída
ZTT	západní tunelová trouba
VTT	východní tunelová trouba
JTT	jižní tunelová trouba
STT	severní tunelová trouba
SOKP	silniční okruh kolem Prahy
DUR	dokumentace územního rozhodnutí
TBM	tunnel boring machine
ZP	západní portál
VP	východní portál
MKP	metoda konečných prvků
SB	stříkaný beton



# 1 Úvod

Pravděpodobně nejdiskutovanější otázkou, při volbě inženýrskogeologického průzkumu pro podzemní dílo, je realizace průzkumné štoly. Někteří odborníci ji zavrhnou pro vysoké pořizovací náklady a časovou náročnost, jiní ji zase doporučují pro získání „přesných“ a „spolehlivých“ údajů. Tato práce se bude zabývat, v teoretické části, přístupem k realizaci průzkumných štol jak na našem území, tak i v zahraničí a vyhodnocením jejich přínosu.

V praktické části budou vytvořeny dva výpočtové modely metodou konečných prvků (MKP), na kterých bude ukázán vliv průzkumné štoly z hlediska vlivů deformačních, napjatostních a vnitřních sil.



## 2 Legislativní podmínky pro realizaci průzkumných štol

### 2.1 Vymezení pojmů

#### 2.1.1 Geotechnický průzkum (GTP)

GTP pro tunely pozemních komunikací je činnost směřující k získání potřebných poznatků o inženýrskogeologických, hydrogeologických a hydrologických poměrech a o geotechnických podmínkách horninového prostředí pro účely územního plánování, projektování navrhování a realizace tunelů a pro účely sanace přírodních vlivů i důsledků činností člověka na zemský povrch. [1]

GTP je výchozím podkladem pro projektanta a proto musí obsahovat přehledně všechny jednoznačné údaje nezbytné pro jeho návrh ve smyslu Eurokódu č. 7 č. 1. Výstupem musí být jak textová část, tak i výkresová část, propracovány do takové hloubky, aby dle nich bylo možné zpracovat příslušný stupeň projektové dokumentace. [1]

GTP musí být tedy navržen a proveden tak, aby zajistil všechny nezbytné poznatky a podklady pro příslušnou fázi přípravy, návrhu i výstavby tunelu včetně poznatků o historické báňské činnosti. [1]

GTP musí poskytnout dále i údaje nezbytné k hodnocení geotechnických rizik a jiných rizik, spojených se stavbou tunelů na pozemních komunikacích. [1]

GTP je dle TP 76 C ve smyslu zákona o geologických pracích č. 62/1988 Sb. a ČSN 731005 P synonymem pro inženýrskogeologický průzkum. [1]

#### 2.1.2 Práce GTP

Pracemi GTP se rozumí práce přípravné, projektové, sledování a řízení terénních prací, práce vrtné, kopné a prováděné hornickým způsobem (průzkumné štoly), terénní zkoušky a měření, práce měřické a geofyzikální, resp. další (GT monitoring apod.), laboratorní zkoušky a práce vyhodnocovací. [1]

Výstupem GTP jsou inženýrskogeologický a geotechnický model obsahově i formálně zpracované podle projektu GTP a cílů GTP a analýza geotechnických rizik ve vztahu k interakci projektovaného inženýrského díla a zjištěných vlastností horninového prostředí. [1]

GTP musí být vymezen věcně, místně, časově i finančně. [1]

#### 2.1.3 Průzkumné štoly

Průzkumné štoly se řadí mezi práce odkryvné, ke kterým dále patří práce vrtné a kopné doplňkové. Prostřednictvím průzkumných štol se získávají co nejspolehlivější údaje o geologických poměrech podél budoucího tunelu. Zejména se jedná o určení poloh litologických rozhraní jednotlivých typů hornin v trase a stanovení míst a intenzity přítoků podzemních vod. Průzkumné štoly umožní přímé posouzení charakteru a strukturních vlastností štolou procházených ploch nespojitostí a poruch, odběry vzorků horniny pro laboratorní zkoušky a provedení polních zkoušek v rozrážkách, či přímo ve štole. Průzkumné štoly se obvykle razí ze šachet nebo úbočního svahu povrchu do míst s očekávanými velmi komplikovanými geologickými poměry. [1]



Na stavbu tunelu, ražbu průzkumné štoly, případně hloubení průzkumné šachty a tudíž i na práce GTP v průběhu všech těchto děl prováděných, se pohlíží ve smyslu Vyhlášky ČBU č. 265/2012 Sb. (novelizovaná vyhláška ČBU č. 55/1996 Sb.) jako na činnost prováděnou hornickým způsobem. Všechny tyto práce proto musí být prováděny v souladu s touto vyhláškou. GTP pro podzemní stavby musí splňovat požadavky této vyhlášky jak na průzkum, tak i na geologickou dokumentaci podzemního díla. [1]

## 2.2 Vybrané paragrafy vyhlášky č. 55/1996 Sb. [2]

### § 16a - Vedení děl v podzemí a požadavky na projektovou dokumentaci

(1) Vedení podzemního díla je dovoleno jen podle projektu, který zpracoval báňský projektant<sup>24)</sup>, jehož odborná způsobilost byla ověřena podle zvláštních předpisů<sup>13)</sup>.

(2) Podkladem pro zpracování projektu je geologický a inženýrskogeologický průzkum, který musí být zpracován a vyhodnocen podle zvláštních předpisů<sup>25)</sup> před zahájením prací na projektu. Výsledky geologického a inženýrskogeologického průzkumu musí poskytnout dostatek informací pro zpracování projektové dokumentace.

(3) Součástí projektu musí být riziková analýza faktorů ovlivňujících bezpečnost provádění díla a objektů v dosahu možného ovlivnění na základě celkového vyhodnocení výsledků geologického a inženýrskogeologického průzkumu. Projekt rozdělí horninový masiv do kvazihomogenních celků a pro každý z celků určí způsob zajištění stability výrubu a technologický postup prací.

### § 17 - Inženýrskogeologická dokumentace

(1) Vedení podzemního díla je dovoleno, je-li zpracována a doplňována geologická a inženýrskogeologická dokumentace, která zajišťuje potřebné informace o poměrech, ve kterých má být dílo bezpečně vedeno. V případě předpokládaného výskytu podzemních kaveren, důlních a podzemních děl a jiných anomálií, které mohou mít vliv na bezpečnost při vedení podzemních děl, je nezbytné jejich ověření.

(2) Inženýrskogeologická dokumentace obsahuje zejména údaje o

- a) rozdělení horninového masivu na kvazihomogenní celky obdobných vlastností, o inženýrskogeologických vlastnostech horninového masivu a uložení hornin vzhledem k čelbě a k lici výrubu, a to zejména z hlediska vrstevnatosti, přetvárných a pevnostních vlastností hornin, kvality a orientace vrstevních ploch, kvality výplně dutin a kaveren, soudržnosti, nebezpečí vyjždění a zavalování, propustnosti, vrtatelnosti a vhodnosti pro kotvení,
- b) průběhu geologických poruch, předpokládaných místech se zvýšenými tlaky hornin, průběhu pokryvných útvarů, hloubce zvětrání a hladině podzemní vody, výšce celkového a horninového prostředí, v případech podzemních děl uložených mělce pod povrchem údaje o lokalizaci oslabených zón v horninovém masivu s výrazně nižší strukturální pevností, o místech prosakování a výtoku vody,



- c) doporučených parametrech jednotlivých kvazihomogenních celků horninového masivu pro výpočet horninového tlaku, dimenzování výztuže a stanovení způsobu rozpojování a
- d) hydrogeologických a plynových poměrech v rozsahu nutném pro stanovení bezpečnostních opatření.

(3) Inženýrskogeologická dokumentace obsahuje údaje i o okolí podzemního díla do vzdálenosti jeho možného ovlivnění. Údaje o okolí podzemního díla musí obsahovat i podrobné informace o seismických a inženýrskogeologických poměrech, o charakteru nadzemní zástavby, povrchu terénu a inženýrských sítích v dosahu možného ovlivnění podzemním dílem, jejím stavu a odolnosti vůči projevům ražby.

(4) V inženýrskogeologické dokumentaci se vyznačí skutečnosti přímo ověřené, nepřímo ověřené nebo předpokládané.

(5) Pokud jsou v průběhu ražby zastiženy jiné inženýrskogeologické poměry oproti projektu, je nutno před další ražbou tyto zhodnotit, popřípadě provést změnu projektu nebo dodatečný inženýrskogeologický průzkum. Rozsah a obsah dodatečného průzkumu určí báňský projektant, který projekt zpracoval.

#### § 28 - Použití observačních tunelovacích metod

(1) Kromě požadavků definovaných v § 16a projektová dokumentace při použití observačních metod dále stanoví

- a) na základě výsledků inženýrskogeologického průzkumu prognózu rozdělení horninového masivu v trase a okolí díla do kvazihomogenních celků s uvedením předpokládaného chování horninového masivu při ražbě,
- b) rozdělení raženého úseku díla do technologických tříd výrubu podle předpokládaných inženýrskogeologických podmínek v daném kvazihomogenním celku a
- c) možnosti úpravy způsobu zajištění stability výrubu v dané technologické třídě výrubu na základě skutečných inženýrskogeologických podmínek zastižených při ražbě.



### 3 Realizované štoly na území ČR

Od roku 1990 bylo v České republice realizováno 9 silničních a 3 železniční tunely s průzkumnou štolou, z celkového počtu 22 silničních a 7 železničních tunelů. Tato část je věnována vybraným průzkumným štolám, realizovaným na území České republiky, a jejich přínosu pro následnou výstavbu samotného tunelu. U vybraných příkladů jsou prezentovány jejich základní parametry, včetně úvodu k samotnému tunelu, popisu inženýrskogeologických podmínek a výsledků geotechnického monitoringu. Níže uvedený přehled tunelů je seřazen v chronologickém pořadí podle období výstavby. Tunely, které jsou napsány **tučně s kurzívou**, jsou podrobněji popsány v této bakalářské práci. [3]

#### Přehled dopravních tunelů s průzkumnými štolami v chronologickém pořadí [3]

- tunel Hřebeč (1995 – 1996, průzkumná štola 1994) = silniční, délka ražeb 275 m, havárie při ražbě
- **tunel Mrázovka** (1998 – 2002, průzkumné štoly 1995 – 1998) = silniční, délka ražeb 2200 m
- tunel Valík (2004 – 2005, průzkumná štola 2002) = silniční, délka ražeb 660 m
- tunel Panenská (2003 – 2005, průzkumná štola 2001 – 2002) = délka ražeb 4000 m
- tunel Březno (2002 – 2007, průzkumná štola 1996) = železniční, délka ražeb 1500 m, štola mimo profil tunelu, havárie při ražbě
- tunel Nové spojení – Vítkovské tunely (2005 – 2006, průzkumná štola 2002) = železniční, délka ražeb 2400 m
- tunel Komořany SOKP 513 (2007 – 2009, průzkumná štola 2003 – 2004) = silniční, délka ražeb 3350 m
- **tunel Slivenec SOKP 514** (2006 – 2008, průzkumná štola 2004) = silniční, délka ražeb 2550 m
- **Královopolský tunel** (2006 – 2010, průzkumné štoly 2002 – 2003) = silniční, délka ražeb 2100 m
- tunel Prackovice (2008 – 2009, průzkumná štola 2004 – 2005) = silniční, délka ražeb 300 m
- **tunel Královská obora – Špelc** (součástí tunelového komplexu Blanka, 2007 – 2010, průzkumná štola 2002 – 2005) = silniční, délka ražeb 4400 m, havárie při ražbě
- tunel Jablůnkov II. (2007 – 2013) = železniční, délka ražeb 610 m, havárie při ražbě (posun termínu dokončení z 2011 na 2013)

\* průzkumná štola pro tunel Radlice (2014 – 2016):

V rámci projektu stavby Radlická radiála je navržen ražený tunel Radlice. Pro provedení bezpečného a ekonomicky přijatelného návrhu technického řešení všech stavebních objektů je realizován podrobný inženýrskogeologický průzkum, jehož součástí je také 850 m dlouhá průzkumná štola o velikosti příčného profilu 13,46 m<sup>2</sup>. [4]

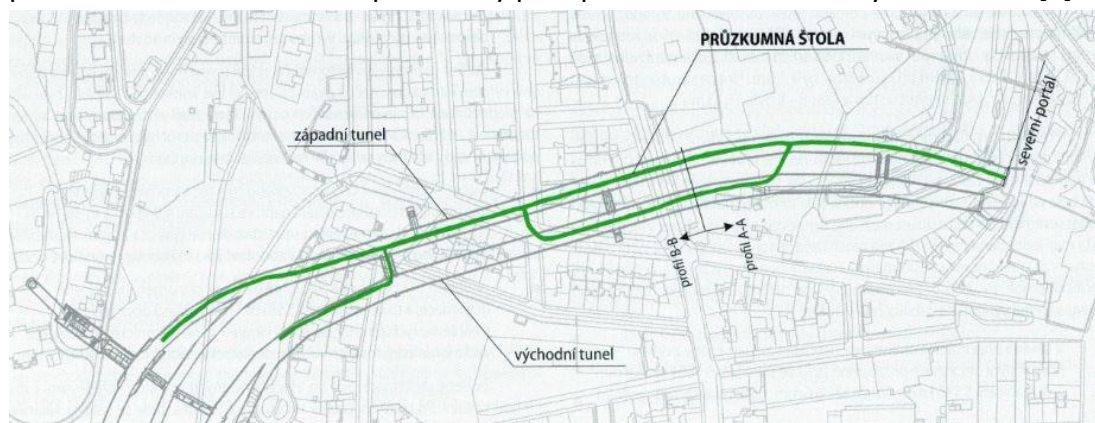


### 3.1 Průzkumná štola silničního tunelu Mrázovka

#### 3.1.1 Úvod

Silniční tunel Mrázovka je součástí pražského středního okruhu a tvoří spojnici Barrandovského mostu a Strahovského tunelu. Investor stavby byl Magistrát hl. m. Prahy – Odbor městského investora zastoupený firmou Výstavba inženýrských staveb a. s. Generálním projektantem tunelu byl PÚDIS a. s. Projekt průzkumné štoly a tunelových objektů zpracovala společnost SATRA, spol. s r. o. Zhotovitelem průzkumné štoly byl Metrostav, a. s. [5]

Tunelový objekt je tvořen dvěma třípruhovými troubami, které se dále větví na dvoupruhové a jednopruhové. Výška nadloží v ražené části se značně měnila (v rozmezí 7 až 45 m). Při projektování tunelu vyvstaly požadavky na konstrukční návrh. Technicky velmi náročné bylo zejména podcházení pod ulicemi Ostrovského, U Nikolajky a U Santošky, kde se nachází hustá zástavba třípatrových obytných domů. Při šířce výrubu tunelu 15,7 m byla v těchto místech celková výška nadloží snížena až na 16 m (z toho pouze 8 m skalního nadloží). Tyto důvody vedly k rozhodnutí realizovat průzkumnou štolu v ose západního tunelu, jakožto doplňujícího inženýrskogeologického průzkumu. Průzkumná štola umožnila ověřit pevnostní a přetvárné vlastnosti horninového prostředí in situ a získat tak parametry pro zpracování matematických modelů. [5]



Obr. 1 Situace průzkumné štoly [5]

#### 3.1.2 Základní informace

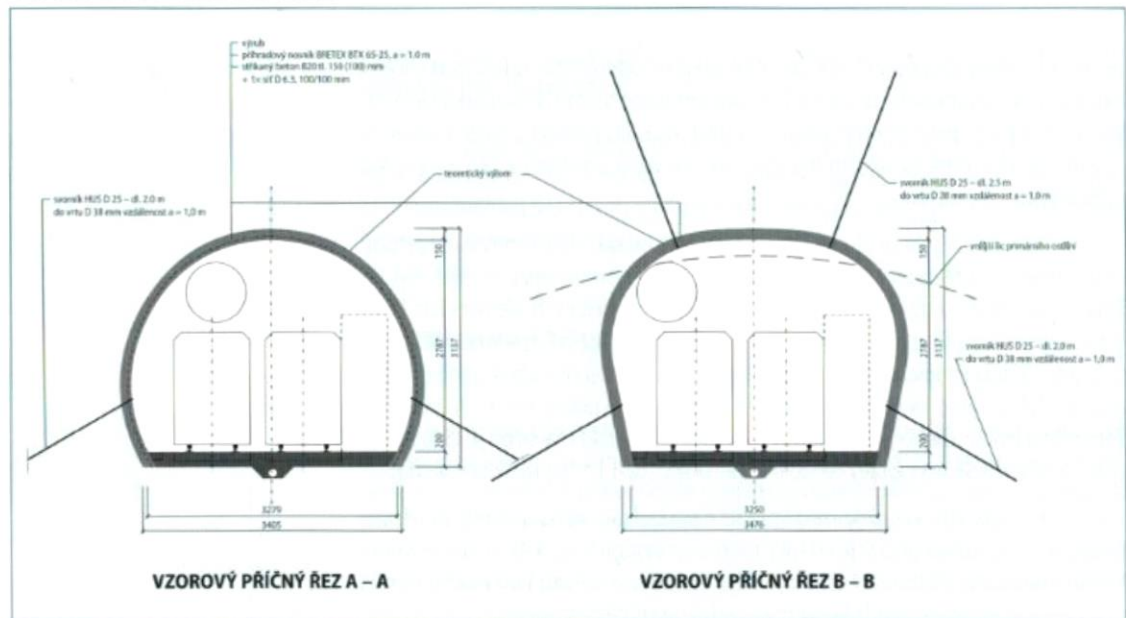
Průzkumná štola i samotný tunel byly provedeny novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). Průzkumná štola tak vytvořila model, na kterém bylo možné modelovat ražení, vystrojování a deformačně napjatostní projev horninového prostředí, včetně vlivu na objekty nadzemní zástavby. [5]

Ražba se prováděla frézou ALPINA AM 50. Trhací práce byly použity jen omezeně (v řevnických křemencích). Profil štoly byl navržen pro dvoukolejnou důlní dopravu. V části severního portálu byl profil průzkumné štoly uprostřed budoucího tunelového profilu (*vzorový příčný řez A-A*; Obr. 2) a postupně přecházel do vrcholu jeho klenby. Důvodem volby toho řešení byla skutečnost, že Západní tunelová trouba (ZTT) u severního portálu má podélný sklon 4,25 % a byla snaha nepřekročit spád 3,5 % pro úklonnou trať důlní dopravy (viz vyhláška č.55/1996 Sb.). [5]





V místě, kde průzkumná štola dosáhla vrcholu klenby budoucího tunelového profilu, se používal vzorový příčný řez B-B (Obr. 2) s plochou klenbou. Během ražby kaloty tunelového profilu zůstávala tato plochá klenba přikotvena ve výrubu a sloužila tak jako ochrana nezajištěného výrubu. Plocha výrubu štoly v řezu A-A byla 10,67 m<sup>2</sup> a v řezu B-B 11,43 m<sup>2</sup>. [5]



Obr. 2 Vzorové příčné řezy průzkumnou štolou [5]

Ražba průzkumné štoly byla zahájena v prosinci roku 1995. Ražba neproběhla v celé délce ZTT, ale skončila ve staničení 789,0 m od severního portálu, kde již byly zastíženy velmi příznivé geologické poměry (pod Pavím vrchem ve flyšovém vývoji letenského souvrství). Kvůli předčasnému ukončení nebyly zjištěny inženýrskogeologické poměry v oblasti jižního portálu ZTT. Ražba průzkumné štoly v trase ZTT trvala necelé 2 roky. [5]

Průzkumná štola se razila i ve dvou úsecích východní tunelové trouby (VTT). První úsek byl délky 138,5 m (včetně dvou napojovacích štol na průzkumnou štolu ZTT na obou koncích) a vedl pod ulicemi Ostrovského a U Santošky. Druhý úsek se razil z tunelové propojky č. 3 jako část pravého opěrového tunelu, měřil 62,0 m a podcházal ulice Bieblova a Na Doubkové. Účelem ražby ve VTT bylo získání podrobných geologických informací v místech nízkého nadloží a husté nadzemní zástavby a provedení předstihových sanačních injektáží horninového prostředí před samotnou ražbou VTT. [5]

### 3.1.3 Konstrukční řešení průzkumné štoly

Průzkumná štola byla zrealizována pouze s primárním ostěním tl. 150 mm ze stříkaného betonu C 16/20, vyztuženého příhradovým rámem BRETEX BTX 65-25 a bylo kotveno pomocí hydraulicky upínaných svorníků HUS Ø 25 mm dl. 2,0 m usazovaných do vrtů Ø 38 mm. Délka jednoho záběru při ražbě štoly byla 1,0 m. [5]

### 3.1.4 Inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry

Trasa tunelu Mrázovka prochází kvarténními geologickými útvary vzniklými erozí a akumulací činností Vltavy spolu s jejími přítoky, Motolským a Radlickým potokem. Tunel byl ražen v horninovém masivu tvořeném sedimenty, které se usazovaly na dně

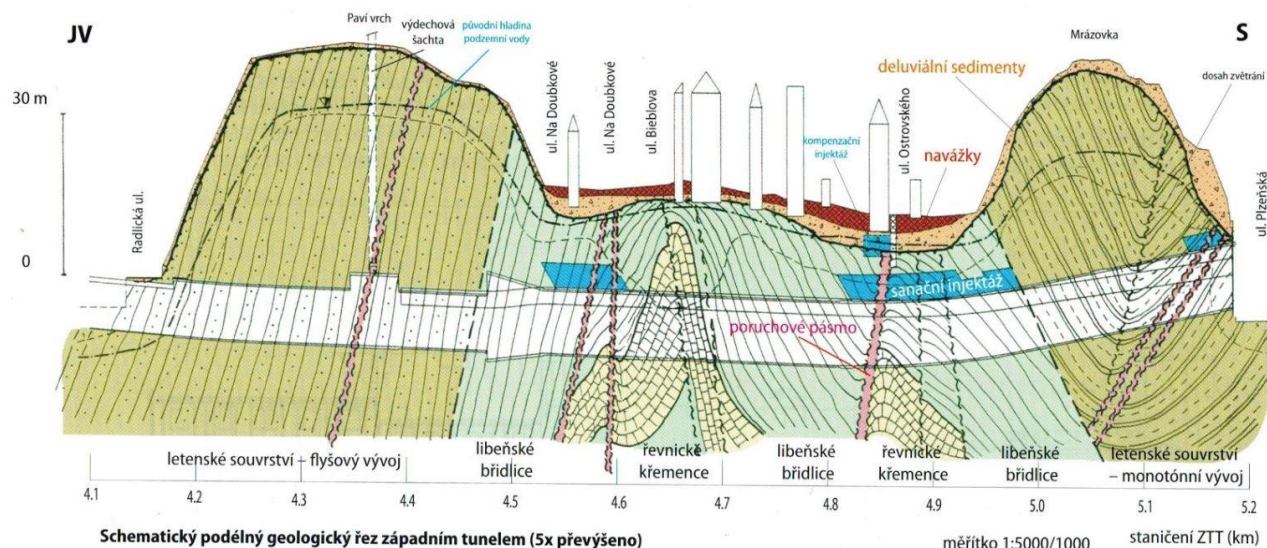


chladného ordovického moře v pražské pánvi, jež je součástí ordovické barrandienské synklinály. Tyto sedimenty byly nejprve vyvrásněny při variském vrásnění, později byly ještě rozlámány podél zlomů či lokálních ploch na jednotlivé tektonické kry. Během kvartéru pak došlo v místech predisponovaných tektonickými liniemi ke vzniku erozních rýh, vyplněných sedimenty občasných vodotečí. Na svazích a jejich úpatí vznikly deluviální (svahové) sedimenty. Na mnoha místech byl terén zarovnan navážkami. [5]

V trase tunelu se projevují horniny letenského a libeňského souvrství. Nejpřínosnější rozčlenění horninového masivu z hlediska inženýrskogeologického je litologické. [5]

Pro tunel Mrázovka ho lze rozdělit na 4 charakteristické typy: [5]

- **monotónní vývoj letenského souvrství** (severní začátek trasy) - prachovitopísčité břidlice, deskovitě vrstevnaté, se střední až velkou hustotou diskontinuit, ojediněle s menšími vložkami křemenců a pískovců.
- **flyšový vývoj letenského souvrství** (jižní konec trasy) - písčité až drobové břidlice, lokálně přecházející až v křemenné pískovce, se střední až malou hustotou diskontinuit, místy s vložkami jemnozrných křemenců.
- **libeňské břidlice (libeňské souvrství)** - jílovité a jílovitoprachovité břidlice, v navětralém stavu šedočerné až černé, jemně slídnaté, s velmi velkou až střední hustotou diskontinuit.
- **řevnické křemence (libeňské souvrství)** - deskovité až lavicovité vrstvy masivních křemenců až křemitých pískovců s vložkami měkkých jílovitých břidlic, se střední až malou hustotou diskontinuit, jsou velmi tvrdé, křehké a nepravidelně rozpukané.



Obr. 3 Schematický podélný geologický řez západním tunelem (5x převýšeno) [5]



Podzemní voda se v zájmové oblasti vyskytuje v pokryvných útvarech (prostředí s průlinovou propustností) a ve skalních horninách (s puklinovou propustností). Tyto zvodně se mezi sebou částečně propojují. Zastižené ordovické horniny jsou v neporušeném a nezvětralém stavu pro vodu velmi málo propustné. Horizont podzemní vody zde vzniká především v pásmu povrchového rozvolnění diskontinuit – ve slabě až silně zvětralé zóně. V pokryvných útvarech a u diluviálních sedimentů vznikají především lokální zvodně v oblastech erozních rýh (např. ulice Ostrovského). [5]

### 3.1.5 Výsledky monitoringu

Konvergence výrubu byly měřeny pětibodově. Maximální horizontální deformace dosáhla 37 mm a svislá v klenbě průzkumné štoly 17 mm. Relativně vysoká hodnota horizontální deformace byla způsobena tím, že nebyl splněn předpoklad uzavřeného prstence, neboť dno štoly se betonovalo s větším odstupem od čelby (vzhledem k nasazení frézy ALPINA AM 50). V místech velkých horizontálních deformací byly v bocích štoly přidány svorníky. Po vybetonování dna štoly se deformace prakticky zastavily. [5]

Měření povrchu terénu a zástavby prokázalo v nejnáročnějším úseku v blízkosti ulice Ostrovského maximální hodnoty poklesů 22 mm (je zde zahrnuta i složka způsobená poklesem hladiny podzemní vody) a šířku poklesové zóny 60 m. [5]

Poznatky získané ze štoly umožňovaly zpřesnění prováděcího projektu z hlediska stabilitního, ekonomického, časového a bezpečnostního. Snížily tak výskyt nepředvídaných geotechnicky komplikovaných úseků a tím uspořili čas a náklady na výstavbu. Informace ze štoly také sloužily k řešení problematiky zabezpečení povrchové zástavby v kritických místech trasy budoucího tunelu. [5]



## 3.2 Průzkumná štola tunelu Slivenec – Lahovice

### 3.2.1 Úvod

Tunely Slivenec jsou součástí Silničního okruhu kolem Prahy (SOKP) a tato část má označení Stavba 514. Nachází se mezi Lochkovem a Radotínem. Celá oblast vedení silničního okruhu je z hlediska životního a přírodního prostředí výjimečná. Vedle sídelních útvarů blízkých obcí jsou v okolí i chráněné krajinné oblasti. [6]

Investorem stavby bylo Ředitelství silnic a dálnic ČR Praha (ŘSD). Společnost SG-Geotechnika, a. s. ve sdružení se společností PUDIS, a. s. zajišťovaly během stavby kompletní geotechnický monitoring, zhotovitelem průzkumné štoly byl Metrostav, a. s. Realizaci tunelů v rámci Sdružení 514 provedla firma Hochtief, a.s., projekt pro dokumentaci pro stavební povolení a zadání stavby zhotovila firma Metroprojekt Praha, a. s., technickým poradcem investora pro tunelové části byla firma D2 Consult Prague, s r. o., která také provedla supervizi ražby průzkumné štoly. [7]

Tunely byly navrženy jako dvě tunelové trouby konvečně ražené pomocí NRTM, dvoupruhová (klesající) a třípruhová (stoupající) o délce ražených úseků cca 1260 m. Již v době zpracování dokumentace územního rozhodnutí (DUR) v letech 1998 – 1999 se uvažovala o ražbě průzkumné štoly v celé délce kaloty třípruhového tunelu. Ta byla následně realizována v roce 2004. [6]

### 3.2.2 Základní informace

Štola byla navržena jako stropní v budoucím pravém (směrem od radotínského portálu) stoupajícím třípruhovém tunelu o profilu 25 m<sup>2</sup> a délce 1313 m. Niveleta štoly byla 3,3 m nad niveletou budoucí tunelové trouby a sklon štoly byl 3,9 %. Štola měla plnou výšku budoucí kaloty a křivost tvaru klenby štoly kopírovala rub primárního ostění tunelu. Ve štole bylo realizováno osm zvětšených geotechnických profilů na celou šířku kaloty v délkách 12 až 42 m s plochou výrubu cca 66 m<sup>2</sup>, které byly využity po dobu ražby i jako výhybny. Ražba průzkumné štoly stála 240 mil. Kč (185 tis. Kč/m; 5900 Kč/m<sup>3</sup>). [6]

### 3.2.3 Inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry

Stavba 514 se nachází na jihozápadním okraji Prahy, z geologického hlediska jde o velmi zajímavou a pestrou oblast. Geomorfologicky jde o kraj Pražské plošiny s jihovýchodně orientovaným svahem vltavského údolí, s převýšením až 130 m. Ražené tunely jsou orientovány v jihovýchodním křídle barrandienu. [7]

Zastižené horniny patří do jižního segmentu sedimentačního prostoru barrandienu, jedná se o horniny svrchního ordoviku (královské a kosovské souvrství) a spodního až svrchního siluru (liteňské až kopaninské souvrství), které mají uložené vrstvy ve směru JZ–SV s úklonem 20°–50° k SZ. Horniny jsou porušeny zlomovou tektonikou v nerovnoměrné intenzitě v příčném i paralelním směru. [7]



Stručné charakteristiky jednotlivých souvrství: [7]

- **kopaninské souvrství** – Jedná se o střídání jílovitých vápnitých břidlic. V prostoru lochkovského portálu silně zvětřalých (třídy R5) a detailně provrásněných, dále zdravých (R3), tence deskovitě až deskovitě vrstevnatých s vložkami mikritických vápenců (mírně zvětřalých až zdravých) a s postupem ražby převážně zdravých deskovitě vrstevnatých.
- **motolské souvrství** – Je zastoupeno bazaltovým tufem (granulátem), šedozeleným, zdravým, třídy R2, s polohami jílovité vápnitě břidlice, zdravé, třídy R3. S výskyty podřadných vložek bituminózního vápence, zdravého, třídy R2. Časté je střídání poloh tufiticko-vápnitě břidlice, šedozelené, zdravé, třídy R4.
- **litohlavské souvrství** – Tvoří ho černé, graptolitové, jílovité, vápnitě břidlice, třídy R4, tence deskovitě vrstevnaté.
- **kosovské souvrství** – Představuje litologicky pestrý sled hornin od břidlic (jílovitoprachovité břidlice, šedé, zdravé W1, třídy R4), prachovců (písčité prachovce, zdravé W1, třídy R3) až po křemité pískovce (křemenné pískovce, šedočerné, zdravé W1, třídy R1 až R2, deskovitě až lavicovitě vrstevnaté). Střídání horninových typů má flyšoidní charakter.
- **královské souvrství** – Tvoří ho jílovité břidlice, tence deskovitě až lavicovitě vrstevnaté (W1, R4), šedé až šedozelené, na povrchu snadno rozvětrávají na jílovité eluvium. Nejvyšší část královského souvrství, i v hloubce cca 60 m pod terénem, má charakter masivních až šedých jílovců. U lahovického portálu (cca do 50 m), jsou horniny královského souvrství postiženy četnými příčnými zlomy, tvořícími poruchové zóny s výplní drcené horniny, a paralelními zlomy. Z geotechnického hlediska se v této příportálové oblasti jedná o silně porušený masiv a vzhledem k minimálnímu horninovému nadloží (4 až 10 m) šlo o nejobtížnější úsek ražby.

Z výše uvedeného je zřejmé, že byly zastíženy velmi odlišné typy horninového masivu – horniny silně zvětřalé až zdravé s proměnlivou pevností v tlaku od 0,5 do 262,7 MPa (hodnoty získané z laboratorních zkoušek na pravidelně odebíraných vzorcích z dokumentovaných hornin), tudíž i zařazení hornin bylo velmi rozdílné od R1 do R6. [7]



Obr. 4 Průzkumná štola v profilu třípruhového tunelu [7]



### 3.2.4 Konstrukční řešení

Ražba průzkumné štoly probíhala protiražbou od obou portálů (lochkovského a radotínského) technologií NRTM. Její ostění tvořil stříkaný beton vyztužený KARI sítěmi a dle technologických tříd i svorníky a příhradovými rámy. Délka záběru se pohybovala v rozmezí 1,5 – 2,5 m. [6]

#### 3.2.4.1 Průběh ražby

Ražba z radotínského portálu byla dovrchní se sklonem 3,9 %. Jejímu začátku předcházely úpravy terénu a výstavba zařízení staveniště. Portál štoly je v místě krátkých hloubených tunelů, které končí raženým portálem tunelů se striktně určeným záborem v přírodně cenném území. Svahy portálu byly zastříkány betonem s vyztužnou sítí a zabezpečeny SN kotvami a trny. Vlastní rozrážka byla zajištěna ochranným deštníkem z mikropilot ve dvou řadách. Také ostatní svahy byly chráněny stříkaným betonem se sítí. Ve spodní části byla stavební jáma zajištěna záporovým pažením.

Na straně lochkovského portálu, ze kterého probíhala úpadní ražba, byla pro přístup provedena rampa ve sklonu 15 %. Její umístění bylo voleno tak, aby co nejméně vadilo v ploše zařízení staveniště. Svah horního portálu se zajistil stříkaným betonem se sítí a trny. Vlastní prorážka byla chráněna deštníkem z mikropilot ve dvou řadách délky 10 m. [6]

Razicí práce na obou čelbách probíhaly jak strojním rozpojováním pomocí mechanismu SCHAEFF ITC, tak pomocí trhacích prací. Vrtání zajišťoval vrtací vůz BOOMER a rubanina se odvážela dampy na mezideponii. [6]

Dovrchní ražba na radotínském portálu byla zahájena 7. ledna 2004 a úpadní na lochkovském portálu 19. března 2004. Denní postupy v jednotlivých třídách dosahovaly v TT3 4 – 5 m, v TT4 2,5 – 3 m a v TT5 1,2 – 2,5 m. [6]

### 3.2.5 Závěr

Štola byla pro ražbu tunelu optimálně situována, horní klenba primárního ostění tunelu byla vyprojektována cca 0,5 m pod strop průzkumné štoly. Zhotovitel ražby tunelu tak odstraňoval pouze boky a případné dno ostění štoly a její horní část zůstávala při výrubu kaloty jako podpůrný prvek v nově zhotovovaném ostění horní klenby tunelu. Štola zde tudíž působila jako ztužující podélný nosník, který evidentně vylepšoval stabilitu čelby tunelu. Dalším pozitivním vlivem zmiňovaného umístění průzkumné štoly pro vedení ražeb bylo snížení hladiny podzemní vody pod dno štoly, což samo o sobě velmi příznivě ovlivnilo ražbu obou tunelů. Zkušenosti z její výstavby potvrzují její důležitost pro získání zpřesňujících hydrogeologických parametrů a podkladů pro projekt tunelu i pro technologii výstavby. [6] [7]



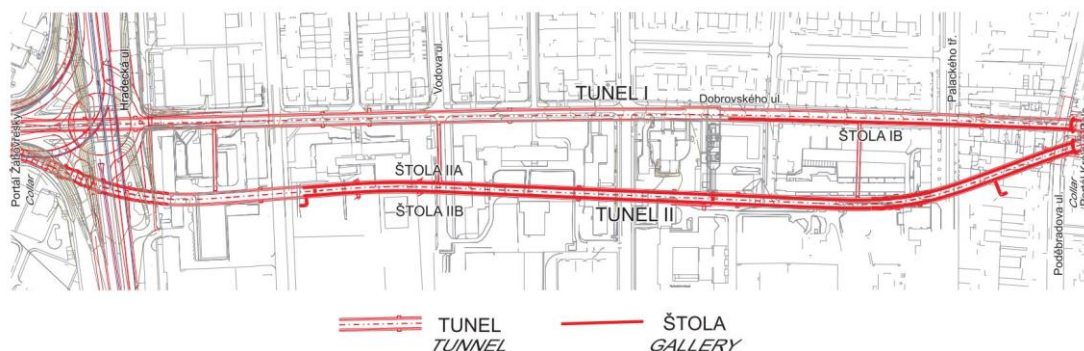
### 3.3 Průzkumné štoly tunelů Dobrovského

#### 3.3.1 Úvod

Tunely Dobrovského jsou součástí stavby Velkého městského okruhu v Brně. Díky podpoře investorských útvarů zastoupených Statutárním městem Brno a Ředitelstvím silnic a dálnic ČR začaly v roce 2001 přípravy investice formou průzkumných štol. Generálním dodavatelem bylo sdružení firem Štoly Dobrovského, jehož součástí byly organizace GEOtest Brno, a.s. (vedoucí sdružení a garant výsledků) a tři stavební firmy: Metrostav, a. s., Subterra, a. s., a ŽS Brno, a. s., zodpovědné za ražbu štol a souvisejících stavebních prací. Generálním projektantem byla firma Amberg Engineering Brno, a. s. [8]\_[9]

V srpnu 2003 byly dokončeny **tři průzkumné štoly**, které sloužily k nalezení optimální technologie ražeb a celkového projekčního řešení stavby. Účelem realizace průzkumných štol a souvisejících prací bylo zejména určení inženýrskogeologických a hydrogeologických poměrů v prostoru tunelu, ověření navrhované technologie ražby, stanovení účinků ražby na nadzemní zástavbu. [8]\_[9]

Tunel je tvořen dvěma troubami, **severní** (označen jako *tunel I*) o délce 1237 m a **jižní** (označen jako *tunel II*) o délce 1258 m (z čehož je ražených 1019 m, resp. 1060 m). Celková doba prováděných stavebních a průzkumných prací byla 24 měsíců, přičemž vlastní ražby asi 12 měsíců. Celkové investiční náklady průzkumných štol dosáhly cca 280 mil. Kč. [8]\_[9]



Obr. 5 Umístění štol a projektovaných tunelů v zástavbě města Brna [8]

#### 3.3.2 Základní informace

Štoly byly zrealizovány přibližně trojúhelníkového příčného profilu v prostoru budoucích tunelových trub při patách jejich kleneb. Jejich celková délka je přes dva kilometry. Ražba byla provedena převážně technologií strojního ražení s dočišťováním výrubu klasickou ruční ražbou. Ve všech třech štolách byl použit razící stroj ITC 112. Plocha teoretického výrubu jedné štoly se pohybovala od 13 do 14 m<sup>2</sup> (dle staničení). Délka jednoho záběru byla 1,0 m. V delších štolách byla použita kolejová doprava a v kratší štolě se uplatnil pneumatický dumper. [8]

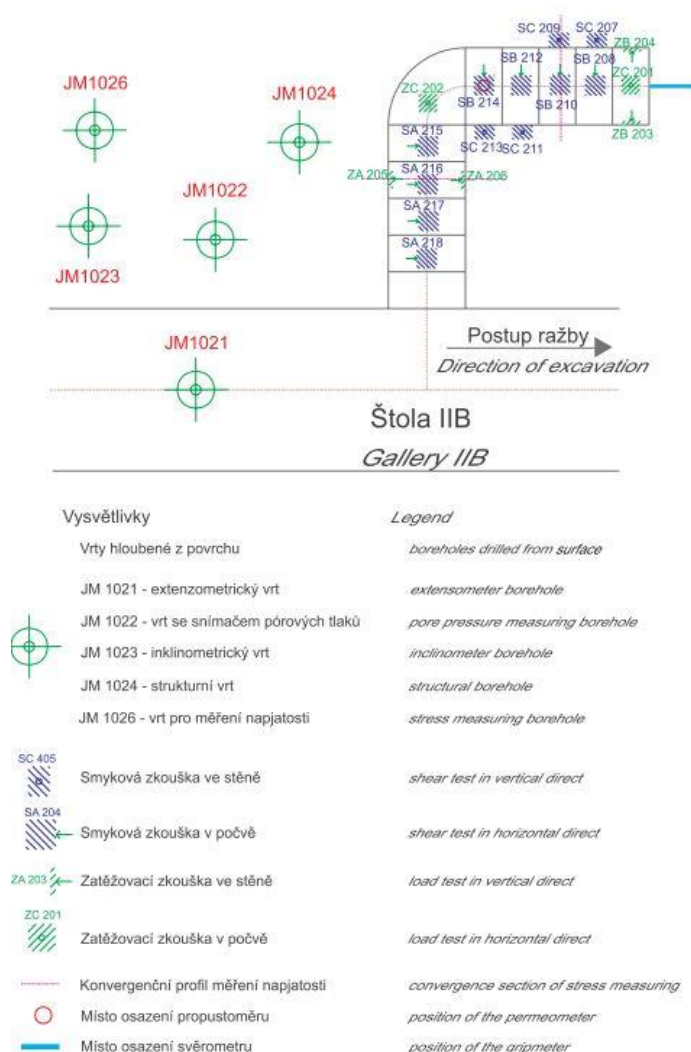
Výpis štol: [9]

- **Štola IA** (zhotovitel Metrostav, a. s.) - doba ražby: květen 2002 – říjen 2002, délka v půdorysném průmětu 365,0 m
- **Štola IIA** (zhotovitel ŽS Brno, a. s.) - doba ražby: duben 2002 – červenec 2003, délka v půdorysném průmětu 831,0 m



- **Štola IIB** (zhotovitel Subterra, a. s.) -  
doba ražby: duben 2002 – červen  
2003, délka v půdorysném průmětu  
831,0 m

Návrh průzkumných prací se sestával z rozsáhlého komplexu prací zaměřených především na vyšetření chování terciérních jíílů, ve kterých byl ražen rozhodující objem tunelových trub. Pro tento účel byly navrženy 4 půdorysně zalomené rozrážky kruhového profilu  $\varnothing$  1900 mm v kterých byly realizovány speciální polní geotechnické zkoušky. Počva rozrážek byla zvýšena o 0,5 m oproti úrovni počvy směrné chodby štoly IIB, z jejíž levé stěny byly rozrážky raženy. Rozrážky byly součástí tzv. míst soustředěného průzkumu, v kterých se koncentrovaly všechny hlavní průzkumné a zkušební metody geotechnického průzkumu i monitoringu. Tato místa mimo to obsahovala celkem 5 vrtů provedených z povrchu (rozmístění je znázorněno na Obr. 6). [8]

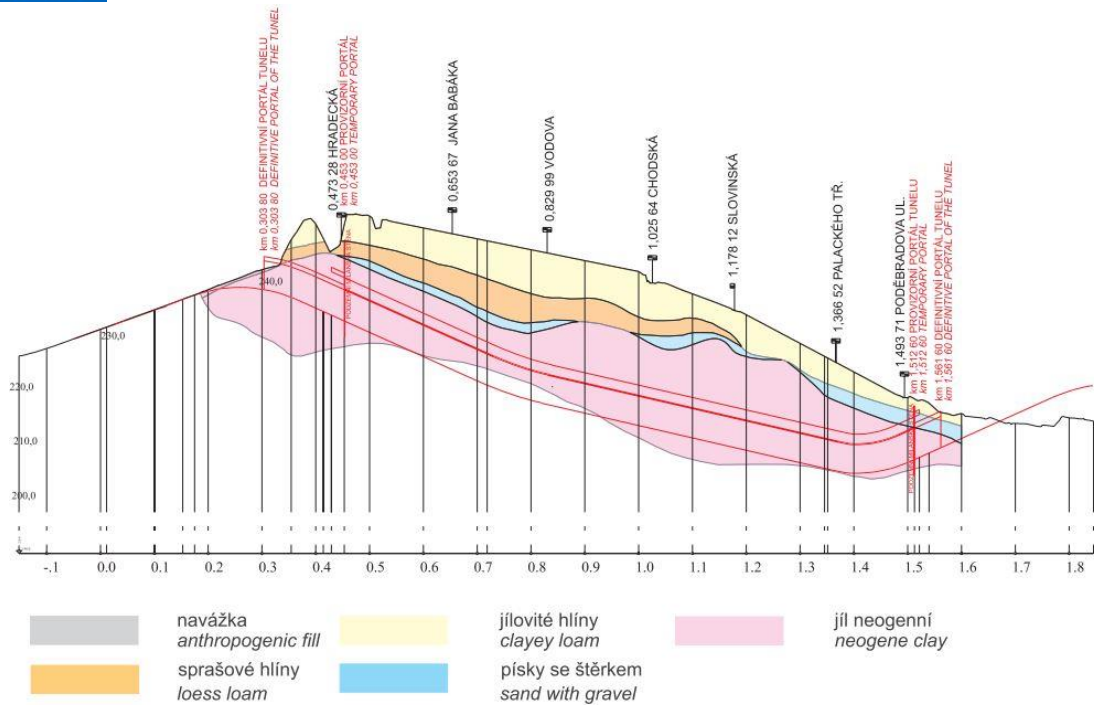


Obr. 6 Rozmístění průzkumných děl v místech soustředěného průzkumu [8]

### 3.3.3 Inženýrskogeologické poměry

Zájmové území projektované dvojice tunelů spadá do oblasti rozšíření mořského neogénu karpatské předhlubně, který zde dosahuje několika stovek metrů. Sedimenty nasedají přímo na horniny brněnského masívu. Značná část průzkumem pokrytého území je zastavěna, převažující část volných ploch je pokryta navážkami, popřípadě konstrukčními vrstvami komunikací. Reliéf terénu, který je v celém nadloží průzkumných štol mírně ukloněný v jednotném sklonu, je v západní části území přetvořen silniční výstavbou, zejména mimoúrovňovou křižovatkou ulic Hradecké a Žabovřeské (navazující části VMO). [8]





Obr. 7 Podélný geologický řez v ose tunelu [8]

### 3.3.3.1 Kvartérní horniny

Pokryv terénu povrchu tvoří sprašové hlíny ukládané eolickou činností během pleistocénu. Vyskytují se několika decimetrové tmavohnědé polohy představující fosilní půdní horizonty. Jílovité hlíny a jíly v podloží spraší mají smíšený eolicko-deluviální původ. [8]

Báze kvartérního pokryvu je zastoupena štěrkovitými sedimenty, velmi často hlinitými či zajílovanými. Štěrkovité uložení mají plošné rozšíření na bázi kvartéru, ale jejich výskyt není zcela souvislý. [8]

### 3.3.3.2 Neogenní horniny

Předkvartérní podloží je v celém zájmovém území tvořeno horninou neogenního spodnobádenského stáří. Jedná se o vápnitý, značně prachovitý jíl. Na vzorcích jílu byly v rámci průzkumných prací provedeny mineralogické analýzy a výsledky prokázaly, že se jedná především o **jílovitý prach** (popř. *prachovec*). Z hlediska rizika deformací je nejdůležitější přítomnost expandujících jílových minerálů kvůli jejich **schopnosti bobtnat a smršťovat se**. Mají nazelenale šedou barvu, v přípovrchové zóně bývá žlutohnědá či rezavohnědá. [8]

Průzkumnými pracemi bylo zjištěno, že jíly jsou značně tektonicky postižené, místy v zónách v mocnosti až několik desítek metrů. Jejich rozpad je hrubě blokovitý až nepravidelně drobně úlomkovitý, často s radiálně paprscitými strukturami na lomu. [8]

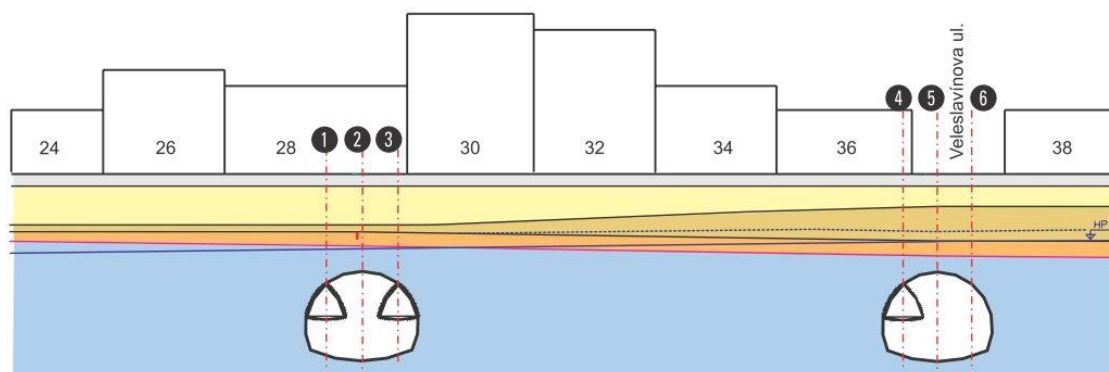
### 3.3.4 Hydrogeologické poměry

Podzemní voda je především vázána na výskyt kvartérních fluvialních sedimentů ve formě štěrkovitých až štěrkopísčitých uložení. Ty vytvářejí velmi dobré podmínky pro vznik, transport a akumulaci podzemní vody. Ve větší části průzkumných děl byly



ověřeny zvodnělé kvartérní fluvialní sedimenty, ale i přesto nebyly zastiženy kolektory průběžné. Šlo je tedy pokládat za plošně omezené čočky propustných sedimentů. Ty zde byly obvykle uzavřené v relativně nepropustných kvartérních jílovitých hlínách nebo vyplňují lokální deprese zvlněného povrchu neogenního podloží. Podzemní voda měla tedy především charakter statických zásob a spojitá hladina zde neexistovala (nespojité zvodně lokálního charakteru). Hladina podzemní vody ve vrtech reagovala na atmosférické srážky velmi pozvolna a k její změně docházelo v průběhu roku v řádech centimetrů. [8]

Staničení km 1.380 tunelu Dobrovského



Legenda:

- rozhraní vrstev
- povrch neogenního podloží
- hladina podzemní vody

Popis vrstev:

- navážka
- sprašová hlína, světlé hnědá, tuhá až pevně
- jílovitá hlína, tmavě hnědá, tuhá
- jílovitá hlína, tmavě hnědá, tuhá až měkká
- hlinitopísčité štěrky, zvodnělé
- jíl zelenohnědý - šedý, tuhý

- 1 Osa štoly IIB
- 2 Osa tunelu Dobrovského II
- 3 Osa štoly IIA
- 4 Osa štoly IB
- 5 Osa tunelu Dobrovského I
- 6 Osa štoly IA (nerealizováno)

Obr. 8 Geologický příčný řez Palackého ulicí [9]

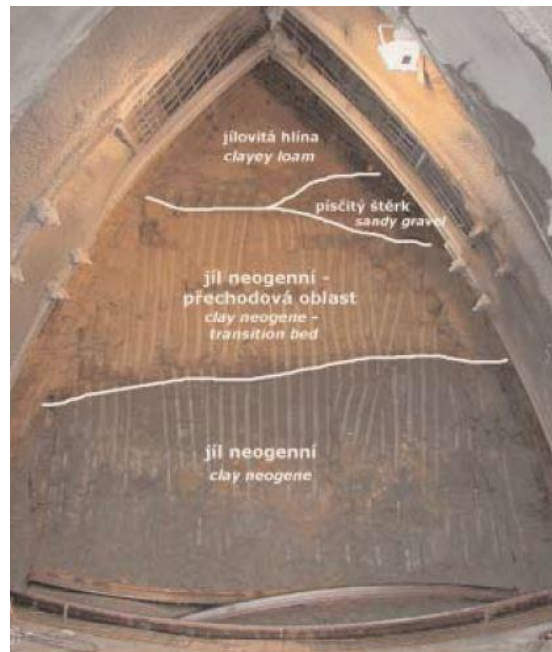
### 3.3.5 Průběh ražby

Vlastní ražba probíhala proti staničení z Králova pole směrem do Žabovřesek. Nejprve však byl realizován provizorní portál Královo pole konstrukcí kotvené podzemní stěny hloubky 18,0 m, do níž po odkrytí lícni části byly vyříznuty otvory ve tvaru ražených štol (šířka v počtvě 4,75 m, max. výška v záklenku 4,03 m). Před vlastní ražbou byly kolem obvodu štol vytvořeny klasické mikropilotové deštníky délky 16 m. Ražba v jílech byla prováděna strojem ITC ve všech třech štolách (vyjma krátkého úvodního úseku). V delších štolách byla použita kolejová doprava a v kratší se využil pneumatikový dumper. Ostění průzkumných štol bylo tvořeno nosnými rámy z válcované dlužní výztuže K 24 v rozestupu 1,0 m a stříkaného betonu SB 20 tl. 100 mm vyztuženého KARI sítí. [8]

Ihned po započetí ražby byly zastiženy nejsložitější geologické podmínky trasy s výskytem kvartérních zvodnělých štěrků v úvodních 60 metrech. Nepředvídatelně chaoticky uložené štěrky říčky Ponávky, meandrující v tomto prostoru, měly v každé ze tří štol proměnlivou mocnost a zastoupení, které se koncentrovalo u vrcholu štol. S ohledem na tyto podmínky bylo přijato mimořádné technické opatření v podobě realizace pěti řad mikropilotových vějířů délky 12 m se čtyřmetrovým překryvem, vrtaných z podzemí po obvodě všech tří průzkumných štol. I když šlo o komplikované a zpomalující opatření, ukázalo se jako účinné. [8]



Pod ochranou mikropilotových deštníků se asi po vzdálenosti 60 m dostala ražba z kvartérních vrstev plným profilem do terciérních jílů. Úvodní část štol byla komplikována nejen nepříznivou geologií, ale také značným přítokem podzemní vody z kvartérní zvodně, nízkým nadložím (4 až 7 m) a čerstvými nástavbami dvou vícepodlažních domů v ulici Poděbradova. Současně se zvýšenými přítoky vody započaly deformace na nejbližší zástavbě. Deformace na objektech zde dosáhly v poklesové kotlině až 50 mm (štoly IIA a IIB). [8]



Obr. 9 Charakteristický sled vrstev v čelbě štoly v počátečním úseku ražby [8]

Dalším problémem bylo podejití ulice Palackého (Obr. 8) s tramvajovým provozem a zástavbou až s šestipatrovými domy (některé ve velmi špatném statickém stavu). Ražba štol IIA a IIB byla s ohledem na bezpečnost na povrchu z preventivních důvodů pozastavena na 2 a 3 měsíce. Tento časový interval byl využit k realizaci provizorních statických opatření ve 3 domech v budoucí poklesové kotlině. Také postup ražby byl upraven s cílem minimalizovat deformace na povrchu. Výztužné rámy se stavěly v hustším rozestupu po 0,5 m, z původních 1,0 m, ve štolách IIA a IIB. Ve štolě IB byla počva vyztužena příčnými nosníky HEB. Ve všech třech štolách byly vkládány pod ocelovou výztuž (K 24) roznášecí betonové prefabrikáty. Rovněž se rozhodlo provést odstup 100 m ražeb štol IIA a IIB. Díky přijatým opatřením zůstaly deformace po obnovení ražby v předvídané hranici 30 mm. [8]

Ražba štol IIA a IIB dále pokračovala bezproblémově, v plném profilu v terciérních jílech s relativně vyšším nadložím. Razilo se dle původního technologického postupu bez vzniku mimořádných deformací (deformace dosahovaly předpokládaných hodnot). Štoly tunelu II byly propojeny dvěma spojovacími chodbami a doplněny o jeden únikový východ na povrch. Během ražby štoly IB se problémy s deformacemi (kromě úvodního úseku 60 m) nevyskytly. Deformace zde dosahovaly 10 až 20 mm a ražba proběhla nepřerušovaně až do konce délky. Denní postup ražbu dosahoval až 4 m při délce jednoho záběru max. 1 m. Ražby trvaly asi 12 měsíců a bylo vytěženo cca 200 000 m<sup>3</sup> materiálu. [8]



### 3.3.6 Výsledky monitoringu

Do osy štol byly z povrchu situovány extenzometrické vrty, které sloužily ke sledování vertikálních deformací masivu. Extenzometry byly umístěny ve 3 hloubkových úrovních. Nulové měření bylo provedeno v dostatečném předstihu, před blížící se ražbou. Deformace kotev z nejspodnější úrovně (osazené v úrovni 0,5 až 1,0 m nad vrcholem kaloty) dosahovaly (po odečtení poklesu terénu) hodnot 5,0 až 29,5 mm, v závislosti na geologii a blízkosti sousední štoly. [8]

Ve vzdálenosti 1,0 až 1,5 m od ostění byly vyhloubeny vrty přesné inklinometrie sledující vertikální posuny masivu. Ty byly navrženy do takové hloubky, aby měření postihlo části horninového masivu, v kterých se předpokládala deformace vlivem ražby budoucích tunelů. Deformace inklinometrických vrtů dosahovaly, po průchodu štoly a následném uklidnění, hodnot v rozmezí 4,5 až 13,0 mm. Z výsledků vertikálního pohybu masivu bylo patrné, že i v hloubce cca 23 metrů pod počvou štoly nejsou deformace zcela uklidněné. [8]

V blízkosti ostění štoly byly vystrojeny vrty měřící změny pórových tlaků v závislosti na průchodu ražby. Snímače pórových tlaků byly do vrtů osazovány v úrovni, ve které se nacházela počva průzkumné štoly. Z měření byl patrný výrazný pokles tlaků v pórech v okamžiku průchodu štoly až na méně než 10 kPa. Hnízda vrtů geotechnického monitoringu zůstala zachována pro pozdější využití při ražbě tunelových trub. [8]

Výše uvedená měření měla za úkol postihnout chování horninového masivu v závislosti na průchodu podzemního díla. Četnost měření se měnila v závislosti na přibližování a posléze vzdalování čelby průzkumné štoly vůči měřenému vrtu. Z povrchu území byly sledovány velikost a tvar poklesové kotliny. Pomocí návrtů do hloubky 0,80 m byly stabilizovány body přesné nivelace, které tvořily síť profilů procházejících kolmo na osy štol. Byl měřen svislý pohyb bodů v závislosti na průchodu štol pod nivelačními profily. [8]

Deformace ostění byly měřeny konvergenčními profily osazenými cca po 150 m, tvořenými třemi body. Součástí monitoringu bylo i nivelační měření konvergenčních bodů, které zároveň sloužily k vedení díla. Hodnoty deformace ostění byly naměřeny v rozmezí 20 až 40 mm, v extrémních případech (při nepříznivé geologii v úvodní části) až 85 mm. U nivelačního měření ostění se pozornost zaměřila zejména na zvedání středu počvy (max. 35 mm) a zabořování pat důlní výztuže (cca 10 mm). Kromě deformací se měřil i tlak na ostění, pomocí tzv. tlakových podušek. Ty byly osazeny ve 3 profilech na zvolená místa za ostění. Na měřidlech byly zaznamenány tlaky (po ustálení) v rozmezí 120 – 400 kPa. [8]

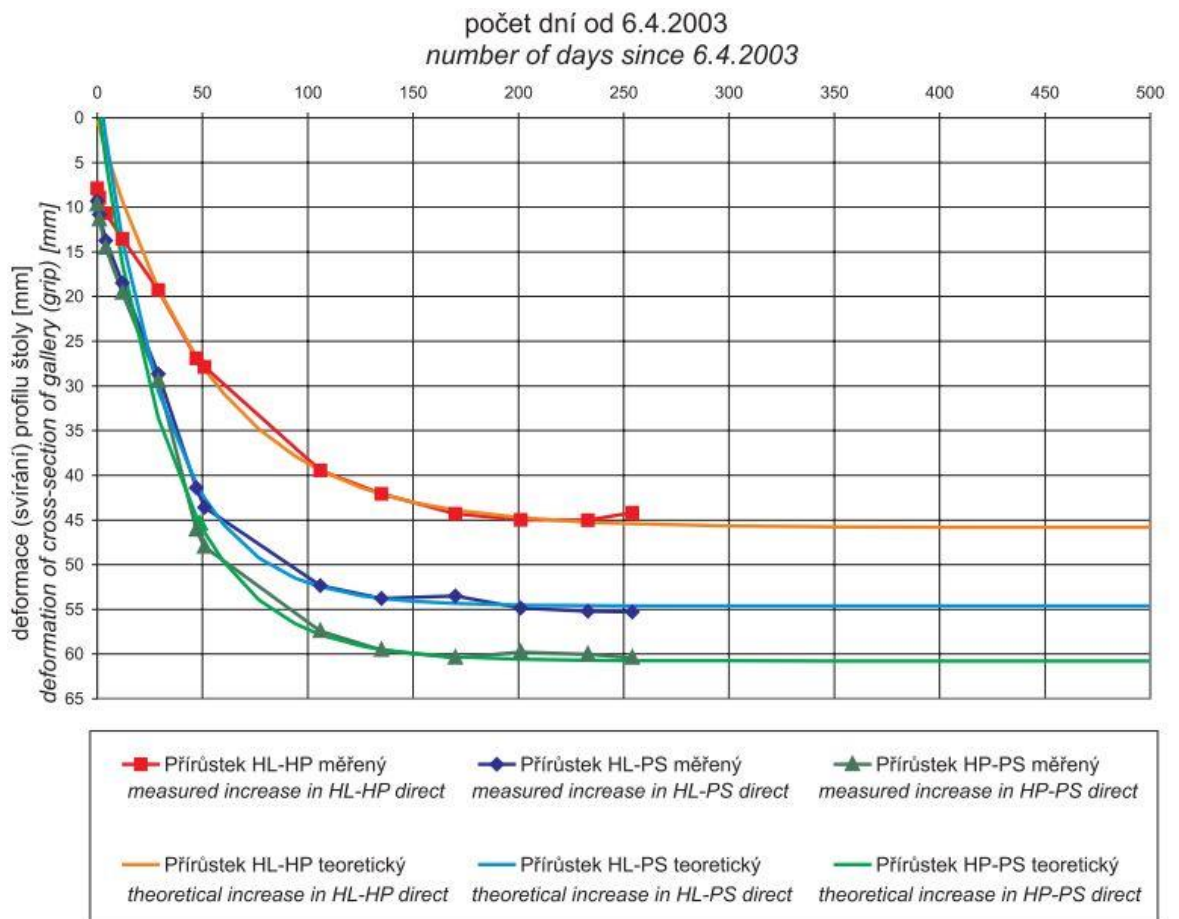
Z naměřených průběhů délkových změn sledovaných konvergenčním měřením a svislých pohybů zjišťovaných nivelačním měřením bylo možno stanovit průběh těchto pohybů i do budoucna. Při konvergenčním měření byla sledována sblížování středů stěn a počvy (3 konvergenční body). Na

Obr. 10 je zobrazen graf závislosti sblížování středů stěn a počvy na počtu dní od provedení primárního ostění. Jednotlivé křivky jsou spojnice dvou bodů, označených takto:

- HL – bod ve střední části výztuže levé stěny,*
- HP – bod ve střední části výztuže pravé stěny,*
- PS – bod ve středu výztuže počvy.*



S postupem ražby (cca 5 až 15 m), resp. sousední štoly, se deformace zpravidla ustalovaly podle exponenciály, díky tomu byly z výsledků stanoveny teoretické deformace v závislosti na čase. [8]



Obr. 10 Průběh deformací konvergenčního profilu ve štole IIB [8]



### 3.4 Průzkumná štola pro tunelový komplex Blanka

#### 3.4.1 Úvod

Rozsáhlý komplex podzemních děl části městského okruhu v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka vyžadoval detailní ověření geotechnických podmínek. Zvláštní pozornost si vyžadoval úsek vedený pod Vltavou, Císařským ostrovem, plavebním kanálem a pod přírodní památkou Královská obora (park Stromovka). Jako nejsložitější úsek se jevila ražba těsně pod zvodněnými sedimenty, v blízkosti Šlechtovy restaurace ve Stromovce. Provedení jakýchkoliv průzkumných prací z povrchu ve Stromovce bylo bohužel vyloučeno. Ražba tunelu v některých úsecích probíhala s minimálním skalním nadložím a podcházela na dvou místech vodní tok. Z těchto důvodů byla nezbytná realizace podrobného geotechnického průzkumu ve formě průzkumné štoly. Její ražbou (ve spojení s ověřovacími vrty) byly získány především důležité informace o skutečném rozhraní mezi skalním nadložím a fluvialními sedimenty. [10] [11]



LEGENDA / LEGEND:

1 - Průzkumná štola v jižním tunelu  
*Exploratory drift in STT*

2 - Průzkumná štola v severním tunelu  
*Exploratory drift in NTT*

3 - Žumpovní chodba a únikový výlez  
*Sump gallery and escape way*

4 - Únikový výlez  
*Escape way*

5 - Rozrážka  
*Side drift*

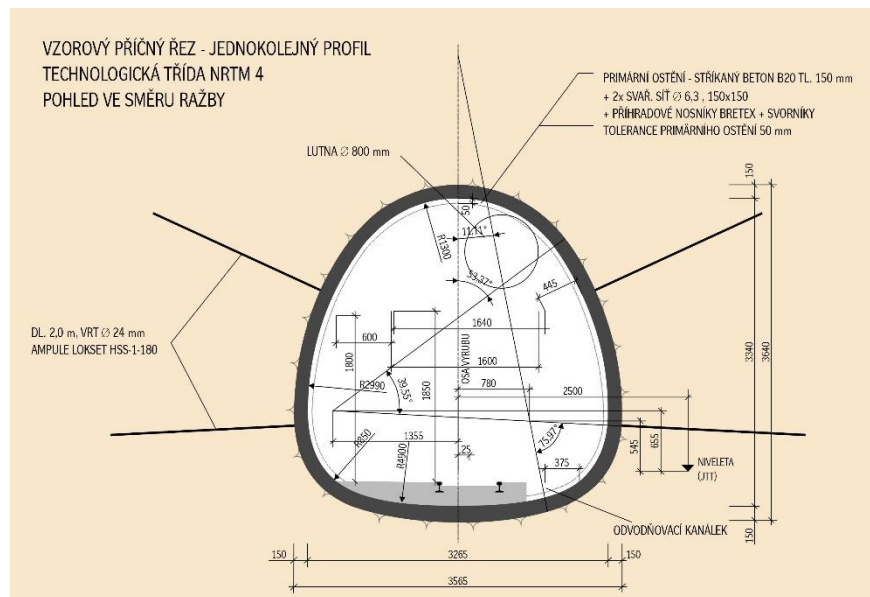
6 - Těžná šachta  
*Hoisting shaft*

Obr. 11 Situace průzkumné štoly [11]



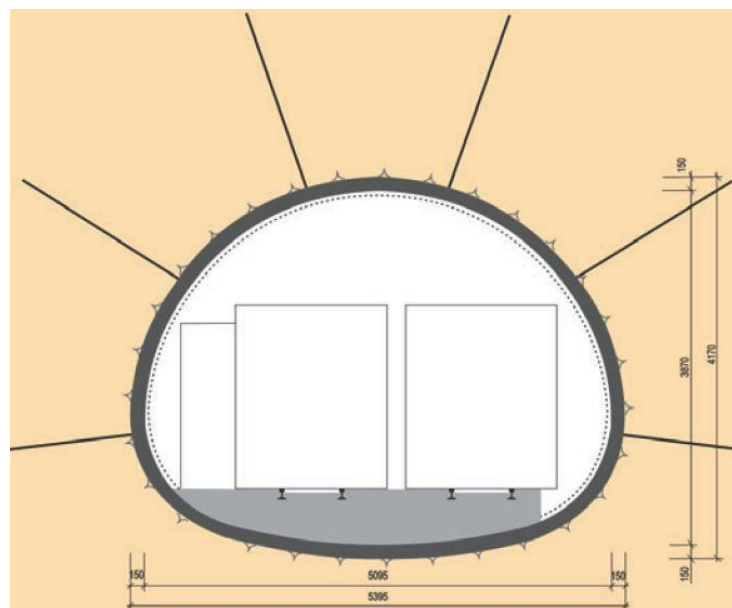
### 3.4.2 Základní informace

Zhotovitelem průzkumné štoly bylo sdružení firem Metrostav a.s. a Energie stavební a báňská Kladno a.s. Celková délka štoly dosáhla 2 150 m a byla převážně vedena v profilu budoucí Jižní tunelové trouby (JTT). Pod Vltavou a v závěrečném úseku na úpatí svahu z Letné, pod Královskou oborou, byla průzkumná štola ražena i v profilu budoucí Severní tunelové trouby (STT). [10]



Obr. 12 Vzorový příčný řez jednokolejným profilem průzkumné štoly [11]

Průzkumná štola byla navržena jako jednokolejná důlní trať (s teoretickým výrubem 10,5 m<sup>2</sup>; obr. 2) s dvoukolejnými výhybními po cca 150 m (o teoretickém výrubu 18,7 m<sup>2</sup>; obr. 3). Její profil, po zkušenostech s ražbou tunelu Mrázovka, je umístěn excentricky do vrcholu kaloty budoucího tunelu. V této poloze štola přináší informace o horninovém prostředí z nejdůležitější oblasti – kaloty tunelu. Tato poloha také umožňuje dílčího členění výrubu v případě zastižení velmi špatných geologických podmínek. Maximální podélný sklon průzkumné štoly je 3,5 %. V trase průzkumné štoly byly navrženy 2 rozrážky sloužící pro provedení geotechnických zkoušek in situ. Ražba byla zahájena v květnu 2002 a skončila v listopadu 2005. [10]



Obr. 13 Příčný řez dvoukolejným profilem [10]



### 3.4.3 Konstrukční řešení průzkumné štoly

Ražba průzkumné štoly byla provedena novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). Dle této metody jsou zastižené podmínky zařizovány do technologických tříd. V tomto případě se předpokládalo zastižení tříd NRTM 2 až 5a. Technologická třída NRTM byla definována jako vztah kvality horniny vyjádřený počtem kvalifikačních bodů QTS, velikostí výrubu a reakcí horniny na otevření výrubu a z toho vyplývajících technických a bezpečnostních opatření. [10] [11]

Pro zařídění do jednotlivých technologických tříd byly posuzovány: [11]

- pevnost horniny, její struktura a textura
- vliv ploch oslabení a nespojitosti v hornině, jejich hustota, kvalita kontaktu, jejich průběh ve vztahu ke směru ražení tunelu
- vliv výplně puklin
- vliv podzemní vody
- způsob přetváření horniny
- vliv rozměrů výlomu, včetně délky předrážení
- hloubka díla pod vrstvou sedimentů (štěrkovou terasou)

Předpoklad zařídění:

<u>Počet bodů QTS</u>		
Jednokolejný profil průzk. štoly	profil výhybný	Technologická
šířka výrubu 3,565 m	šířka výrubu 5,495 m	třída NRTM
58 a více	64 a více	1
49 - 58	53 - 64	2
38 - 49	41 - 53	3
30 - 38	32 - 41	4
méně než 30	méně než 32	5a

#### 3.4.3.1 Primární ostění

Primární ostění bylo navrženo tloušťky 100-200 mm, ze stříkaného betonu SB 20, vyztuženého příhradovými rámy z betonářské oceli, svařovanými sítěmi a svorníky. Primární ostění bylo dimenzováno na horninový a maximální hydrostatický tlak (bezpečnostní opatření), pomocí metody konečných prvků (MKP). [10] [11]

#### 3.4.3.2 Ražba

Ražba byla prováděna s použitím trhacích prací. Po provedení výlomu a případném ochránění nevystrojeného výrubu stabilizační vrstvou ze stříkaného betonu bylo prováděno kotvení lepenými svorníky GEWI  $\varnothing$  18 mm a to v každém druhém záběru. Při ražbě se počítalo s nadvýlomem 150 resp. 200 mm dle technologických tříd NRTM. Nadvýlomy větší než 300 mm a plochy větší než 1,0 m<sup>2</sup>, byly vyztuženy svařovanou sítí. [10] [11]





Podle zastižené technologické třídy NRTM se délky záběrů pohybovaly od 1,0 m do 1,75 m. Po zastříkání případných nadvýlomů byl osazen ocelový příhradový rám (mimo tř. 2 NRTM) a to vždy 1 kus na 1 záběr, ve vzdálenosti 300 mm od čelby (měřeno na osu rámu). Při vnějším i vnitřním líci byla osazena svařovaná síť. Její profil a velikosti ok byly závislé na technologické třídě NRTM. [10] [11]

Samotná ražba probíhala z těžní šachty oválného tvaru, tvořené převrtávanými pilotami, umístěné přibližně 180 m od Vltavy na Trojském nábřeží. Hloubka šachty na dno průzkumné štoly byla 15,85 m, přičemž celková hloubka až na dno akumulární a čerpací jímky činila 20,8 m. Před zahájením ražby vlastní průzkumné štoly, byl pro zvýšení bezpečnosti navržen mikropilotový deštník. [10] [11]

#### 3.4.3.3 Sanační injektáže

Pro zajištění bezpečnosti ražby průzkumné štoly byly v určitých úsecích v jejím předpolí prováděny sanační injektáže horninového prostředí. [10] [11]

#### 3.4.3.4 Odvodnění

Pro odvod vod z čelby a průsaků skrz již provedené primární ostění průzkumné štoly byl v celém předmětném úseku budován v pravé části podlahy (ve směru ražby) odvodňovací žlábek. Ten byl v nejnižším místě průzkumné štoly zaústěn do sedimentační jímky a následně žumpovních chodeb, odkud byla nashromážděná podzemní voda přečerpávána na povrch a následně přes sedimentační jímku a koalescenční odlučovače do Vltavy. Při úpadní části ražeb byl žlábek zakončován v provizorních jímkách a odtud byla podzemní voda čerpána do Troji, odkud byla čerpána do odlehčovacího sběrače DN 2000, který ji odváděl do Vltavy. [10] [11]

#### 3.4.3.5 Bezpečnost

V trase průzkumné štoly byly navrženy dva únikové výlezy ve směru ražby za Vltavou na Císařském ostrově a za plavebním kanálem před Královskou oborou. Únikový výlez na Císařském ostrově byl navržen jako sekundární těžní šachta kruhového otvoru o průměru 3,14 m, s následným využitím pro čerpání balastních vod z průzkumné štoly. Druhý byl navržen jako vrt o průměru 1,2 m, který byl využit také pro větrání. Hloubka obou výlezu se pohybovala okolo 30 m. [10] [11]

Z bezpečnostních důvodů byly v čelbě prováděny v celé trase průzkumné štoly dlouhé dovrchní předvrty. V místech bezprostředního ohrožení průvalem zvodnělých materiálů v poruchovém pásmu v blízkosti Šlechtovy restaurace byly prováděny 2 bezpečnostní předvrty. Důvodem jejich provádění bylo zjištění případných zvodní v předpolí ražby průzkumné štoly. [10] [11]

#### 3.4.4 Inženýrskogeologické poměry

Podkladem pro předběžný inženýrskogeologický průzkum sloužilo vyhodnocení vrtů provedených v prostoru Stromovky, ale žádný z nich nebyl proveden až ke skalnímu podloží. V rámci podrobného IG průzkumu pro průzkumnou štolu bylo nutno provést novou síť vrtů, které by podaly alespoň základní informace o zastižených horninách a mocnostech říční terasy v trase průzkumné štoly. [10] [11]

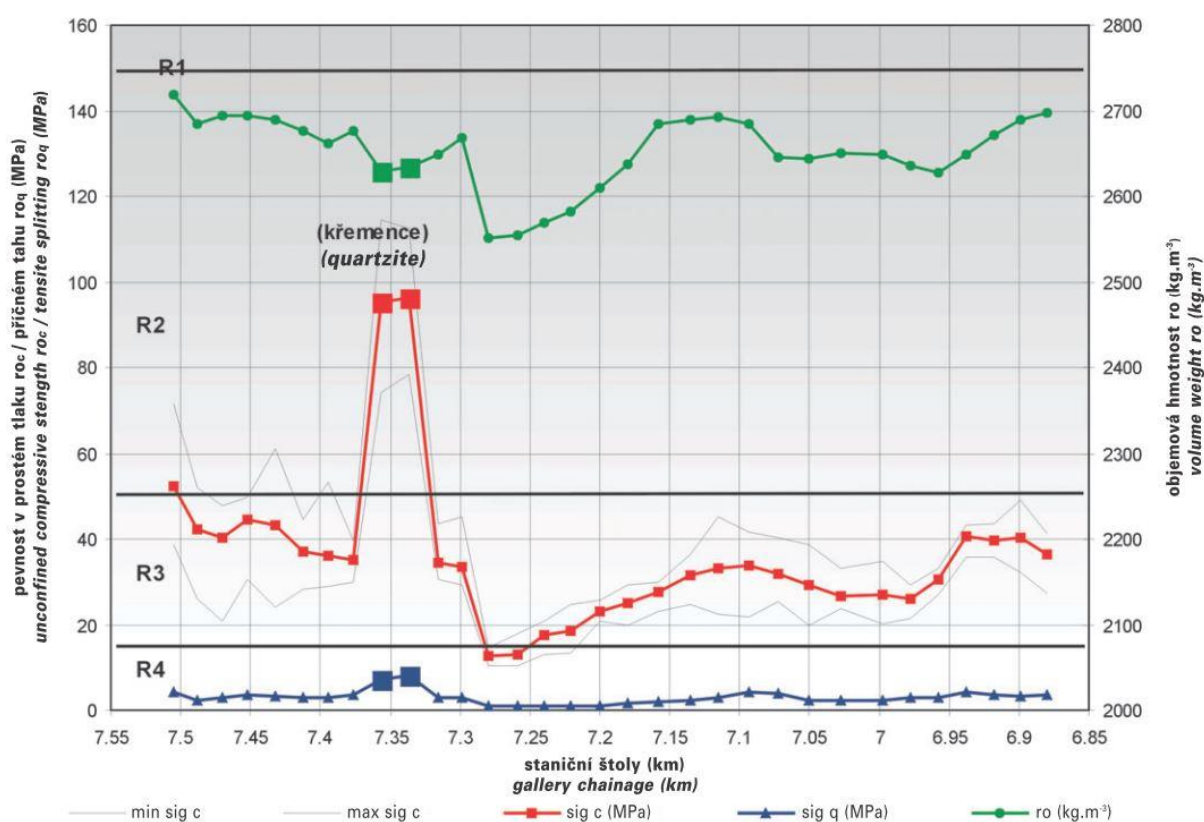


### 3.4.4.1 Horniny skalního podloží

Skalní podloží zájmového území je tvořeno horninami severovýchodní části ordovické barrandienské synklinály. V celém ordovickém komplexu se vystřídá škála pelitických až psamitických hornin. Tato rozmanitost činí potíže při stratigrafickém hodnocení jednotlivých útvarů. Pro potřeby praxe je tedy vhodnější horniny zařadit podle litologických typů. [10] [11]

Jedná se o tyto litologické typy: [10] [11]

- **dobrotivské břidlice** – jílovité břidlice s jemně prachovitou příměsí a slídou. Silně rozpukané a zřetelně vrstevnaté (tenké až tlustě deskovité), takže se snadno rozpadají. Pukliny mají povrch drsný a převážně jsou rovinného charakteru. Na puklinách jsou často vysráženy hydroxidy železa. Řadí se k měkčím a plastičtějším horninám středočeského ordoviku.
- **řevnické křemence** – deskovité až lavicovité vrstvy masivních křemenců až křemitých pískovců s vložkami jílovitých břidlic. Jsou velmi tvrdé, křehké a nepravidelně rozpukané.
- **skalecké křemence** – hustě rozpukané lavice světlešedých křemenných pískovců až jemnozrnných křemenců s vložkami jílovitých a jílovitopísčitých břidlic.
- **libeňské břidlice** – jílovité a jílovitoprachovité břidlice. Jsou v navětralém stavu šedočerné až černé, jemně slídnaté. Jde o monotónní souvrství, bez podstatných petrografických odchylek.



Obr. 14 Graf rozložení pevnosti a objemové hmotnosti podél trasy průzkumné štoly [10]



### 3.4.5 Hydrogeologické poměry

Podzemní vodu v zájmovém území lze zařadit k těmto typům: [11]

- poříční a terasová voda – napájená atmosférickými srážkami a vázaná na údolní nivu a terasu Vltavy.
- podzemní voda v prostředí s průlinovou propustností – v pokryvných sedimentech.
- podzemní voda s puklinovou propustností – horniny ordovického skalního podkladu.

Od litologického typu souvrství se odvíjí i hydrogeologické vlastnosti. Relativně nejméně propustné jsou měkké břidlice v libeňském souvrství. [11]

V srpnu roku 2002 zastihla ražbu průzkumné štoly povodeň na řece Vltavě, která odpovídala 500-leté vodě a zaplavila staveniště a cca 100 m již vyražené průzkumné štoly. [11]

### 3.4.6 Výsledky monitoringu

#### 3.4.6.1 Deformace povrchu terénu

Ražba průzkumné štoly se na povrchu projevila deformacemi, které ve svém maximu dosáhly 21,7 mm (v závěrečném úseku) a jejich průměrná hodnota nepřekročila 4,0 mm. V níže uvedené tabulce jsou uvedeny maximální a průměrné hodnoty deformací povrchu terénu v závislosti na jednotlivých kvazihomogenních celcích. [11]

hor. typ [-]	W max [ mm ]	W prům [ mm ]	typ tunelu [-]	typ horniny [-]	souvrství [-]	nadloží [ m ]
0	9,2	3,6	hloubený	písčité břidlice	dobrotivské	11,4-12,2
1	11,6	6,2	ražený	písčité břidlice	dobrotivské	12,2-15,3
2	1,9	1,5	ražený	písčité břidlice	dobrotivské	15,3-17,3
3	5,5	2,8	ražený	písčité břidlice	dobrotivské	17,3-20
4	10	2,9	ražený	písčité břidlice	dobrotivské	20-22
5	4,4	1,6	ražený	písčité břidlice	dobrotivské	22-22,3
6	3,4	1,3	ražený	písčitoprachovité břidlice	dobrotivské	22,3-20,5
7	6,9	2,3	ražený	jílovitoprachovité břidlice	dobrotivské	20,5-17,1
8	12,6	7,2	ražený	jílovitoprachovité břidlice	dobrotivské	17,1-15,9
9	18,2	14,3	ražený	jílovitoprachovité břidlice	dobrotivské	15,9-14,6
10	11,6	6,1	ražený	jemnozrné křemence	libeňské	14,6-16,1
11	21,7	11,8	ražený	jílovitoprachovité břidlice	libeňské	16,1-23

Tab. 1 Výsledky měření deformací povrchu terénu [11]

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejnižší odezva ražeb byla zaznamenána v úseku s nejvyšším nadložím (celky č.5 a 6), což bylo očekáváno. Průměrná hodnota sedání zde byla okolo **1 mm**. Písčité břidlice obecně vykazují nižší deformace. Nejhorší úsek z deformačního hlediska byl zaznamenán u jílovitoprachovitých břidlic s nízkým nadložím těsně před přechodem do řevnických křemenců. Zde průměrná hodnota



poklesu povrchu terénu dosáhla **14 mm**. Účinek ražeb se v podélném směru projevil v předpolí ražeb maximálně do vzdálenosti **15 m**. [11]

Šířka poklesové kotliny dosáhla v závislosti na hloubce štoly **30 – 40 m**. Zjištěné hodnoty sedání povrchu terénu byly použity pro predikci deformací při ražbách budoucích tunelů. [11]

### 3.4.6.2 Deformace nadzemní zástavby

Před zahájením ražby průzkumné štoly byly vytipovány objekty, u nichž bylo relevantní sledovat vývoj deformace v závislosti na postupu ražeb průzkumné štoly. Část těchto objektů však byla ještě před osazením měřících bodů zničena povodní v srpnu 2002. [11]

Základním měřením bylo měření v objektu Královské dvorany (Šlechtově restauraci). Na objektech železnice ČD, plavebním kanálu a sportovním kanálu byly osazeny geodetické nivelační body na terén. Vyjma Šlechtovy restaurace leží všechny objekty v místech, kde se účinek ražeb projevil jen minimálně, což potvrzují změřené výsledky deformací. U objektů železnice ČD a vodních kanálů byla maximální hodnota deformace v rozmezí 1 – 2 mm. Z tohoto lze konstatovat, že z deformačního hlediska byl vliv ražeb na tyto objekty zcela zanedbatelný. [11]

Maximální hodnota deformace objektu Šlechtovy restaurace dosáhla **15,7 mm**. Tato hodnota byla způsobena zejména 2 důležitými faktory. Horninové prostředí zde představovaly nekvalitní jílovitoprachovité břidlice libeňského souvrství a výška nadloží nepřesahovala 15 m (z toho cca 11 m sedimenty). [11]

### 3.4.6.3 Konvergenční měření

Při ražba průzkumné štoly byly zaznamenány poměrně malé deformace primárního ostění, což je částečně způsobeno výhodným tvarem výrubu a relativně dobrým (z deformačního hlediska) horninovým prostředím. [11]

Maximální hodnota deformace byla zjištěna **30 mm** ve svislém směru a **18 mm** ve vodorovném. Průměrná hodnota sedání se pohybovala do **5 mm**, příčného posunu do **3 mm**. [11]

V následujících tabulkách jsou uvedeny maximální a průměrné deformace dle horninových typů. [11]

č.	sedání		příčná deformace		w <sub>max</sub> [ mm ]	typ horniny [ - ]	nadloží [ m ]
	Max	průměr	max	průměr			
0	10,7	2,2	5,7	2,1	9,2	písčité břidlice	11,4-12,2
1	29,6	6,2	7,6	3,9	11,6	písčité břidlice	12,2-15,3
2	4,5	2,4	18,1	3,4	1,9	písčité břidlice	15,3-17,3
3	10,0	3,7	18,1	2,3	5,5	písčité břidlice	17,3-20
4	9,2	2,0	6,1	1,9	10	písčité břidlice	20-22
5	4,7	1,6	4,4	2,1	4,4	písčité břidlice	22-22,3
6	3,4	1,5	3,6	1,4	3,4	písčitoprachovité břidlice	22,3-20,5
7	3,8	1,3	7,8	1,6	6,9	jílovitoprachovité břidlice	20,5-17,1
8	2,8	1,2	12,9	4,0	12,6	jílovitoprachovité břidlice	17,1-15,9
9	3,4	1,0	6,4	3,6	18,2	jílovitoprachovité břidlice	15,9-14,6
10	4,2	1,5	5,9	3,1	11,6	jemnozrnné křemence	14,6-16,1
11	6,0	1,8	7,8	3,8	21,7	jílovitoprachovité břidlice	16,1-23

Tab. 2 Vyhodnocení def. ostění v jednotlivých horninových typech (JTT) [11]



č.	sedání		příčná deformace		W <sub>max</sub> [ mm ]	typ horniny [ - ]	nadloží [ m ]
	Max	průměr	max	průměr			
9	4,1	1,8	4,1	2,5	12,6	jílovitoprachovité břidlice	17,1-15,9
10	2,7	1,3	5,1	2,9	18,2	jílovitoprachovité břidlice	15,9-14,6
11	2,2	1,2	4,6	2,7	11,6	jemnozrnné křemence	14,6-16,1
12	4,8	1,4	6,6	3,3	21,7	jílovitoprachovité břidlice	16,1-23

Tab. 3 Vyhodnocení def. ostění v jednotlivých horninových typech (STT) [11]

kde : max - maximální hodnota deformace ostění [mm]  
průměr - průměrná hodnota deformace ostění [mm]  
w<sub>max</sub> – maximální deformace povrchu terénu [mm]

#### 3.4.6.4 Přítoky do průzkumné štoly

Při realizaci průzkumné štoly (plocha výrubu 10,5 m<sup>2</sup>) byl zastižen **maximální přítok** do nevystrojeného výrubu 3,5 l/s v jílovitoprachovitých břidlicích (horninový typ č. 11 – viz Tab. 2) ke konci úseku a **maximální přítok z dovrchního bezpečnostního předvrtu** 4,6 l/s v písčítých břidlicích (horninový typ č. 3 – viz Tab. 2). Extrémním případem byly přítoky z vrtů pro sanační injektáže v 10. úseku kdy přítoky dosáhly až na 15 l/s (průměr vrtu 75 mm). Průměrný přítok do nevystrojeného výrubu za celé měřené období byl 0,2 l/s, z bezpečnostního předvrtu 0,4 l/s. [11]

Na základě monitoringu hladin Vltavy pod trojským jezem byla zaznamenána závislost mezi výškou hladiny a přítokem do průzkumné štoly. V případě vyšších hladin docházelo k nárůstu přítoků a to až o 5 l/s. Ve druhé polovině března 2006 byla provedena kontrolní prohlídka průzkumné štoly spojená s měřením přítoků podzemní vody. Celkový přítok do průzkumné štoly k tomuto datu činil 65,3 l/s. [11]

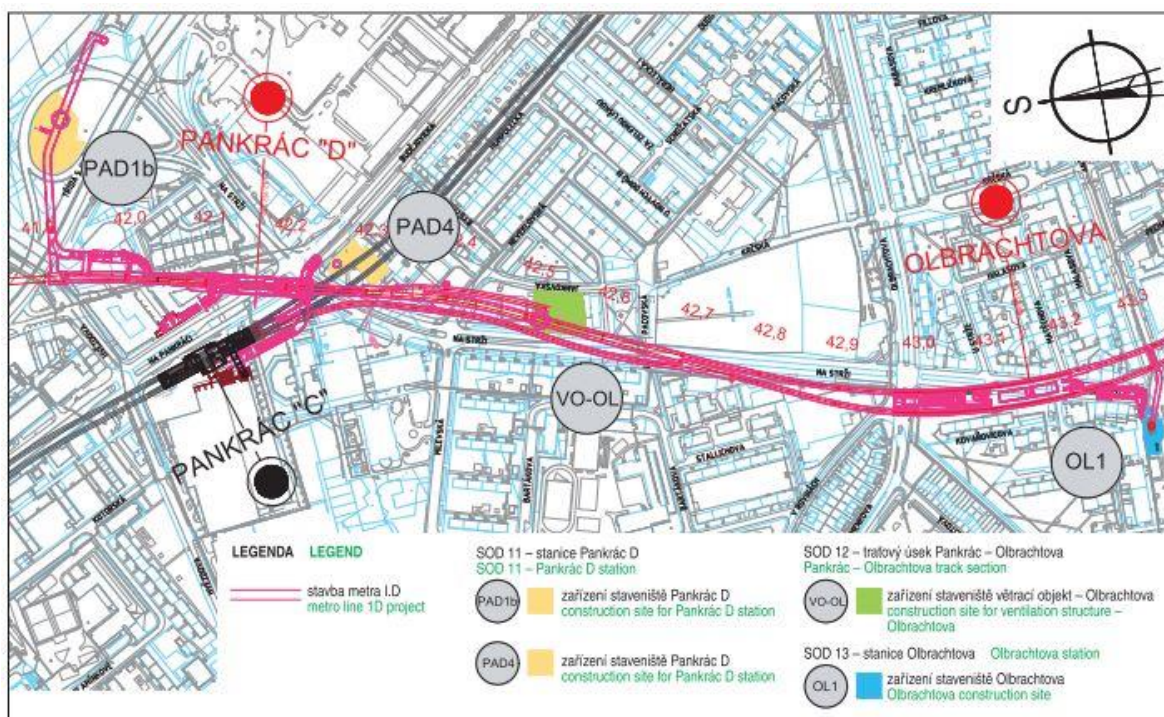


## 3.5 Ražená díla jako doplňkový GT průzkum budoucí stanice metra Pankrác D

### 3.5.1 Úvod

Ražené tunely na stavbě trasy I.D (provozní úsek Náměstí Míru – Depo Písnice) pražského metra v oblasti stanice Pankrác D a navazujícího traťového úseku směrem ke stanici Olbrachtova představují velmi náročný tunelářský komplex. Ten bude realizován nejen ve složitých geologických poměrech ale také s použitím náročných konstrukčních řešení. Z těchto důvodů je nutné při určení rozsahu doplňkového geotechnického průzkumu postupovat podle zásad pro 3. geotechnickou kategorii, tj. se zjištěním přetvárných a pevnostních charakteristik horninového masivu prostřednictvím terénních a laboratorních zkoušek přímo v trase budoucí stavby. [12]

V prostoru křižovatky ulic Na Pankráci, Na Strži a Budějovická bude vyražena jednodílná stanice Pankrác D. Základní profil staničního tunelu má plochu výrubu 344 m<sup>2</sup> a je dlouhý 129,7 m. Jak v prostoru stanice, tak i v přilehlých traťových tunelech je nová trasa metra vedena přibližně ve směru sever-jih. Na severní straně jsou součástí stanice Pankrác D obrátové koleje včetně demontážní komory pro zeminové štíty, přístupový tunel se strojovou hlavního větrání metra a samostatný technologický tunel. Na jižním konci staničního tunelu je náročné prostorové uspořádání souvisejících objektů. Jsou to příčné výstupní a přestupní tunely a v nadloží traťové tunely stávající trasy metra C. [12]



Obr. 15 Celková situace stanice Pankrác D [12]

### 3.5.2 Inženýrskogeologické poměry

Předkvarterní podloží na pankrácké pláni tvoří horniny paleozoika, a to převážně ordoviku a v blízkosti závěru barrandienské brachysynklinály (cca 480 m severně od středu stanice Pankrác D), v úseku délky cca 600 m jsou to i silurské horniny. Na trase



I.D jsou horninová souvrství seřazena od nejstarších po nejmladší proti směru staničení, od Krčského údolí. [12]

Výpis jednotlivých souvrství, od nejstarších po nejmladší, proti směru staničení:

- **bohdalecké souvrství** – velmi jemné jílovité břidlice černošedé barvy, velmi drobně slídnaté, místy tektonicky porušené. Zastiženy budou horniny od zcela zvětřalých až po zdravé (avšak velmi silně rozpukané, podrcené a rozpadavá).  
*Úsek trasy zde bude dlouhý 1,9 km, začínající v Krčském údolí a končící před stanicí Pankrác cca v km 42,425.* [12]
- **královské souvrství** – jílovité břidlice velmi jemně slídnaté, tenče vrstevnaté až lupenité, šedé až zelenošedé barvy, podléhající intenzivnímu a hlubokému zvětřávání a rozpadající se na zelenohnědou jílovitou hlínu.  
*Celková mocnost souvrství je 60 až 80 m.* [12]
- **kosovské souvrství** – rychlé střídání zelenavých jílovitých, prachovitých a písčitých tenče vrstevnatých břidlic a destičkovitě až lavicovitě odlučných křemených pískovců, křemenců a drob. Horniny jsou také velmi tektonicky porušené a silně rozpukané. Jde o nejmladší ordovické souvrství (zde je zastiženo ve flyšovém vývoji, kvůli kterému jsou horniny náchylné k sesouvání). Ve svrchní části souvrství převládají hrubozrnné lavicovité pískovce.  
*Souvrství začíná cca 70 před jižním koncem staničního tunelu stanice Pankrác D. Celková mocnost souvrství je 80 až 100 m.* [12]

Na podložních ordovických horninách leží mladší silurské horniny. V siluru sedimentace jílovitých a písčitých sedimentů postupně přechází do sedimentace karbonátové a je spjata s vulkanismem, jehož produktem jsou diabasy. [12]

- **liteňské souvrství** – tmavě šedé až černé jílovité až prachovité vápenné břidlice, které ve své svrchní části obsahují časté polohy a čočky velmi pevných vápenců (časté jsou i polohy tufitů).  
*Celková mocnost souvrství je 30 až 80 m.* [12]
- **kopaninské souvrství** - spodní část je vyvinuta převážně jako hnědošedé až černé vápenné jílovité a prachovité břidlice, které obsahují hojně polohy čoček a konglomerátů vápenců a polohy s příměsí vulkanických hornin – tufické břidlice a tufy. Na rozhraní liteňského a kopaninského souvrství je v celé oblasti vyvinuta poloha tufů, tufitů a diabasů.)  
*Celková mocnost souvrství je 110 až 250 m.* [12]
- **přídolské souvrství** – šedé kalové vápence s vložkami slídnatých břidlic. Vápence jsou deskovitě až lavicovitě odlučné, značně rozpukané a jsou postiženy intenzivní zlomovou tektonikou. Vyskytují se jen omezeně a tvoří závěr barrandienské brachysynklinály.  
*Jde o nejmladší souvrství silurských hornin a zároveň nejmladší horniny zastižené v trase metra I.D. Celková mocnost souvrství je 20 až 40 m.* [12]

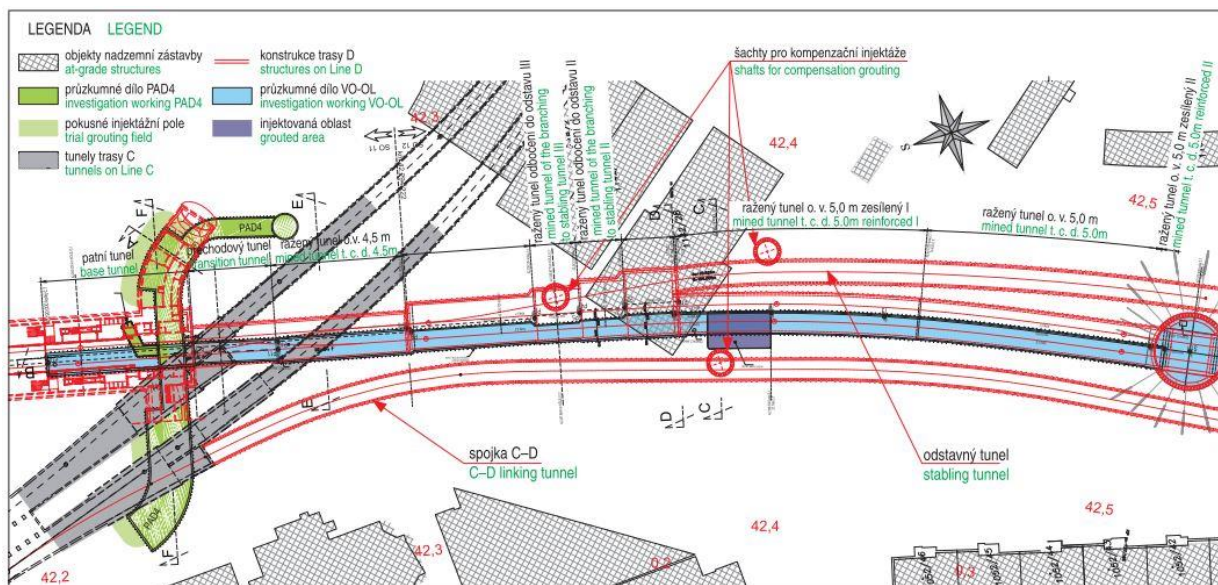
Na svrchnoordovické a spodnosilurské sedimenty je vázán diabasový vulkanismus. Diabasy jsou zelenavě šedé, obecně velmi tvrdé horniny, které tvoří především proniky



ložních žil nebo plošné výlevy v různých hloubkách sedimentace. *Diabasové žíly zde dosahují maximální mocnosti 10–30 m.* [12]

### 3.5.3 Základní informace o ražených dílech

Pro doplňkový geotechnický průzkum jsou navržena 4 ražená průzkumná díla, která budou realizována ze záborů pro zařízení staveniště (ZS) stavby trasy I.D metra v dané lokalitě. Průzkumná díla jsou označena podle zařízení staveniště, z nichž budou prováděna (viz Obr. 15). [12]



Obr. 16 Půdorys průzkumných děl PAD4 a VO-OL [12]

#### 3.5.3.1 Doplňkový geotechnický průzkum PAD4

Je zde zahrnuta kruhová šachta do hloubky 29,9 m,  $\varnothing$  8,6 m (osa pilot), zajištěná převrtávanými pilotami délky 33 m ( $\varnothing$  1000 mm). Na šachtu navazuje ražený vodorovný průzkumný tunel celkové délky 116,7 m. Ten je rozdělen na přístupový a budoucí přestupní tunel. Zároveň je tunel rozdělen na 4 typy výrubu podle velikosti a tvaru. Tloušťka primárního ostění výrubů, prováděných v kalotě budoucího přestupního tunelu stanice Pankrác D závisí na technologické třídě výrubu (TT) a pohybuje se v rozsahu 350–450 mm. Půdorys průzkumného díla je na Obr. 16. [12]

#### 3.5.3.2 Doplňkový geotechnický průzkum VO-OL

Součástí je kruhová šachta hluboká 36,6 m,  $\varnothing$  21 m (osa pilot), zajištěná převrtávanými pilotami délky 24,5 m ( $\varnothing$  1200 mm). Do konečné hloubky 37,5 m budou prodlouženy pouze sekundární armované piloty. Hlavy pilot jsou spojeny ztužujícím ŽB věncem a třemi kruhovými ŽB převázkami. Ve dně jsou piloty rozepřeny ŽB deskou. Na šachtu navazuje ražený vodorovný průzkumný tunel celkové délky 322,2 m, který je rozdělen na 10 typů výrubů. Na tyto výrubu při stavbě trasy metra I.D navážou další dílčí výrubu příslušných profilů traťových tunelů a v závěrečném úseku průzkumného tunelu v délce 44,4 m to bude profil staničního tunelu stanice Pankrác D. Tloušťka primárního ostění se pohybuje v rozmezí 300 až 550 mm. Půdorys průzkumného díla je na Obr. 16. [12]

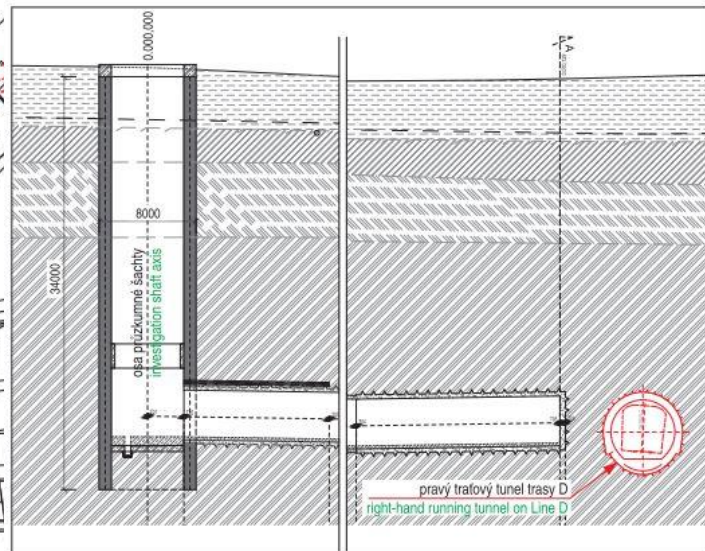
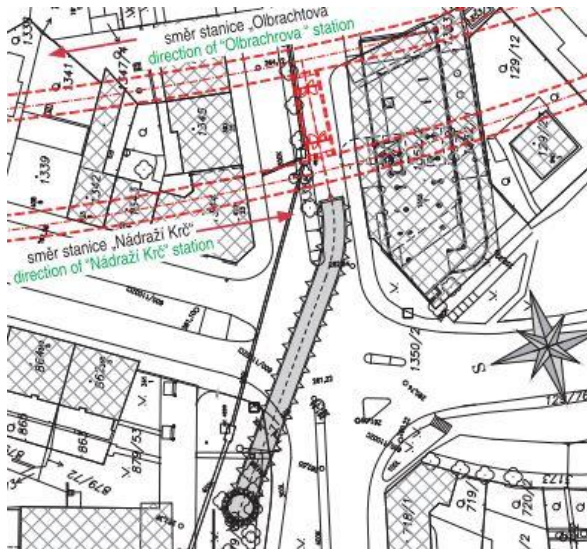




### 3.5.3.3 Doplňkový geotechnický průzkum OL1

Průzkum zahrnuje kruhovou hloubenou šachtu  $\varnothing$  8,6 m (osa pilot) hlubokou 29,9 m. Je zapažena převrtávanými pilotami délky 34 m ( $\varnothing$  1000 mm), které jsou v hlavách spojeny ztužujícím ŽB věncem. Nad vrcholem klenby navazujícího vodorovného průzkumného tunelu je v šachtě umístěna kruhová ŽB převážka. Ražený průzkumný tunel má celkovou délku 67,6 m, a je rozdělen na 2 části podle tloušťky primárního ostění (300 mm a 350 mm). Světlý průřez tunelu zůstává stejný. Průzkumné dílo OL1 je zobrazeno na Obr. 17 a Obr. 18. [12]

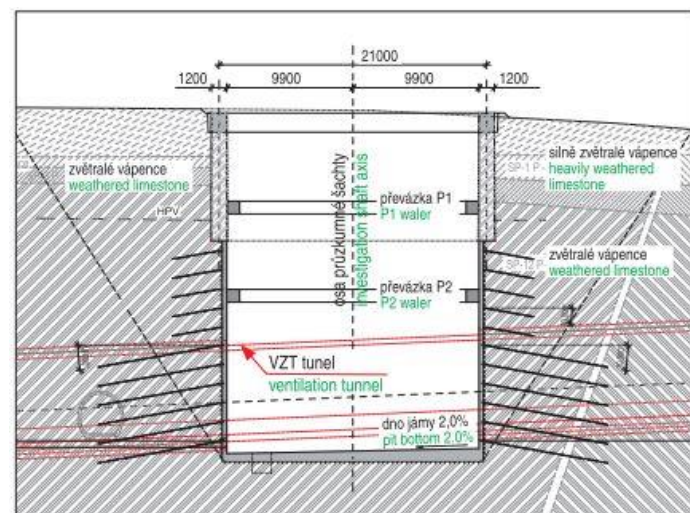
Obr. 17 Podélný řez průzkumným dílem OL1 [12]



Obr. 18 Půdorys průzkumného díla OL1 [12]

### 3.5.3.4 Doplňkový geotechnický průzkum PAD1b

Součástí je kruhová šachta  $\varnothing$  21,0 m (osa pilot), hluboká 27,25 m. V horní části od povrchu do hloubky 10,0 m bude šachta zapažena převrtávanými pilotami  $\varnothing$  1200 mm, rozepřenými hlavovým věncem a jednou ŽB převázkou. Zbývající část šachty (hluboká 17,25 m) je navržena hornickým způsobem dalšími převázkami. Stěny budou zajištěny stříkaným betonem tloušťky 350 mm v kombinaci s kotvením a rozepřením. Dno šachty bude zajištěno ŽB deskou tloušťky 500 až 900 mm. V budoucnu bude na tuto šachtu navazovat ražený vzduchotechnický tunel v rámci stavby trasy metra I.D1. [12]



Obr. 19 Svislý řez průzkumnou šachtou - PAD1b [12]



### 3.5.4 Závěr

V roce 2015 byly provedeny průzkumné vrty v prostoru stanice Pankrác D. Výsledky vrtního průzkumu odhalily velmi nepříznivé geotechnické parametry kosovského souvrství na jižním konci staničního tunelu. To bylo podnětem pro další doplňkový průzkum provedený v roce 2017. Ten tvořily 2 vrty o celkové délce 88,3 m. V tomtéž roce byl v létě proveden injektážní pokus v kosovském souvrství, v místě, kde bude následně provedena hloubená jáma pro průzkumné dílo PAD4. Zkušební injektáž byla provedena v 1 z 3 vrtů (hlubokých cca 22 až 25 m). Výsledky presiometrických zkoušek z injektovaného vrtu, dokladovaly zvýšení hodnot presiometrického modulu přetvárnosti  $E_{def,p}$ . Navíc injektáží došlo ke zkompaktnění horninového prostředí tak, že presiometrické měření se mohlo uskutečnit i ve velké hloubce, bez hrozby ztráty sondy (která v případě vrtu bez injektáže hrozila). Na základě těchto informací a výsledků byl navržen doplňkový geotechnický průzkum za použití ražených děl. Jehož primární úkol je v ověření účinnosti horninových injektáží velkého rozsahu a určení změn geomechanických vlastností injektovaného prostředí. [12]

Výsledky doplňkového geotechnického průzkumu budou sloužit jako podklad pro kvalitní a efektivní návrh ražeb jednolodní stanice Pankrác D a pro doplňková opatření během ražby stanice i přilehlých traťových tunelů. Projektantem bylo provedeno i kontrolní ocenění doplňkových průzkumných prací. Průzkumná díla budou při vlastní stavbě úvodního úseku Pankrác – Olbrachtova téměř v plném rozsahu využita jako úvodní dílčí výrubky. Průzkumné práce představují jen 9 % z celkových nákladů na tento průzkum (91 % jsou náklady na ražbu průzkumných šachet a tunelů, které se v plném rozsahu využijí při vlastní výstavbě trasy I.D1). [12]



## 4 Přístup k realizaci průzkumných štol v zahraničí

V této části bakalářské práce byly vybrány k podrobnějšímu seznámení tři zahraniční podzemní díla na území Evropy, u kterých byl proveden geotechnický průzkum ve formě průzkumné štoly/pilotního tunelu. Jsou zde zastoupeny podzemní díla ze Slovenska, Švýcarska a jedno částečně v Rakousku a Itálii.

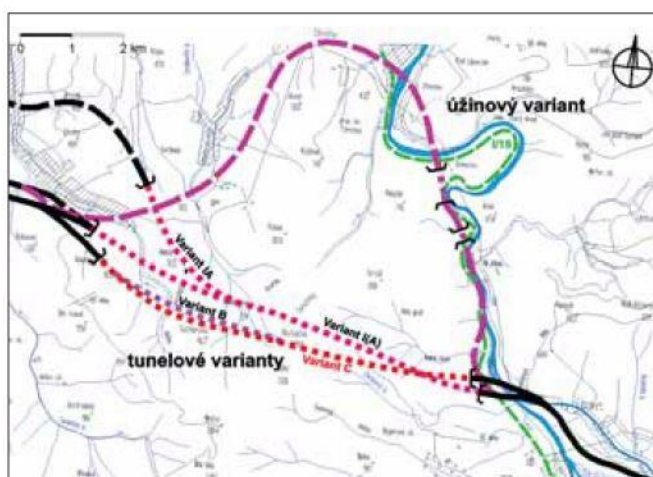


## 4.1 Průzkumná štola tunelu Višňové (Slovensko)

### 4.1.1 Úvod

Tunel Višňové je součástí dálničního úseku D1 Lietavská Lúčka – Turany a po vybudování se stane se svojí délkou 7404 m nejdelším tunelem slovenské dálniční sítě. S ohledem na jeho délku, náročné geomorfologické poměry území Malej Fatry v jeho koridoru (nedostupnost terénu na povrchu a hloubka trasy tunelu až 700 m), nebylo možné realizovat průzkum žádnou jinou metodou než průzkumnou štolou. Rozhodnutí o realizaci průzkumné štoly, v celé délce budoucího tunelu, se uskutečnilo na základě inženýrskogeologického a hydrogeologického průzkumu provedeného v letech 1997 až 1998. Dle těchto průzkumů byla zvolena varianta trasy A (Obr. 20). [13]

Samotná realizace průzkumné štoly se sestávala ze dvou zadání, stavebního vyražení štoly stanovenými technologiemi a podrobného IGHP geotechnického monitoringu. Ražbu průzkumné štoly realizoval Doprastav, a. s., Bratislava se svým poddodavatelem Metrostav Slovakia, a. s. Realizaci podrobného IGHP provedlo sdružení GEO-Višňové: INGEO, a. s., Žilina, Geofos, spol. s r. o., Žilina a Geoconsult, spol. s r. o., Bratislava ve spolupráci s Geconsult Austria a Metroprojekt Praha pro realizační dokumentaci. Zadavatelem a investorem byla Slovenská správa ciest Bratislava. [14]



Obr. 20 Varianty návrhu trasy v etapě hodnocení EIA [13]

### 4.1.2 Základní informace

Štola byla realizována v jižní tunelové troubě, v koridoru trasy dálnice v úseku Višňové - Martin. Její délka byla 7480 m a dle zadání se razila od obou portálů. Ražba ze západní strany probíhala technologií NRTM s příčným profilem podkovitého tvaru s plochou výrubu 11,6 m<sup>2</sup> a se spodní klenbou 12,9 m<sup>2</sup>. Ražba z východní strany byla provedena plnoprofilově pomocí razicího stroje TBM o průměru 3,5 m a ploše výrubu 9,6 m<sup>2</sup>. Podélný sklon od západního portálu stoupal 0,5 % na délku štoly 704 m a potom klesal ve sklonu 2,27 % v délce 6776 m k východnímu portálu. Původní rozdělení technologií bylo NRTM v délce 1873 m a TBM 5607 m, ale reálné rozdělení bylo nakonec 3118 m NRTM a 4362 m TBM. Průzkumná štola po úpravě a propojovacích chodbách sloužila jako úniková štola pro severní tunel (v pořadí druhý budovaný). Ražba štoly započala v květnu 1998 a byla dokončena v srpnu 2002. [14]



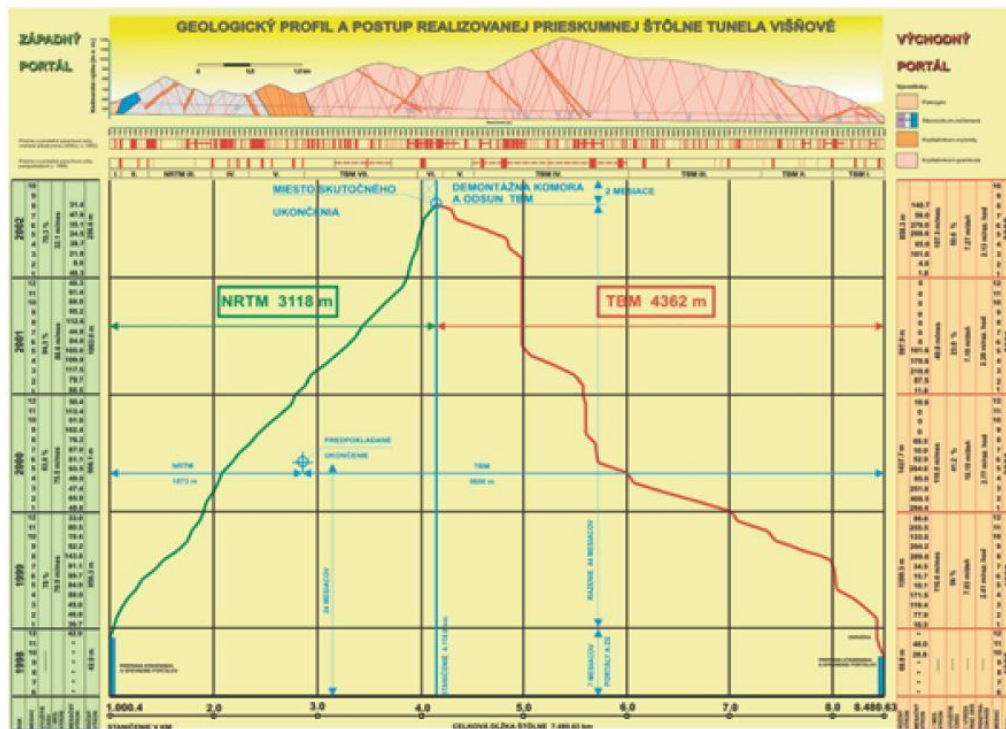
#### 4.1.3 Inženýrskogeologické poměry

Průzkumná štola byla ražena v jádrovém pohoří Malej Fatry, kde procházela širokou škálou litologických typů hornin, z kterých nejvíce byly zastoupeny horniny krystalinika. Směrem od západního portálu se štola nacházela okrajově v horninách **centrálního karpatského paleogénu Žilinskej kotliny**, zastoupené především jílovcí. Oblast západního portálu byla porušená svahovými deformacemi, které dosahovaly až pod niveletu průzkumné štoly. Po 115 metrech od západního portálu (ZP) přešly horniny z paleogénu do *mezozoika*. [14]

**Mezozoický masiv** tvoří nejvíce dolomity, vápence s ohraničenými zónami karbonitických brekcií, jílové vápence a slítnité břidlice. Masiv byl porušený různě orientovanými tektonickými zónami. [14]

Ve staničení 1430 až 1470 od ZP se objevuje 40 m široká přesmyková zóna, tvořená silně kataklasticky porušeným masivem zemitého charakteru. Za touto zónou, se už nachází **masiv krystalinika Malej Fatry**. Ten je zastoupen především žulami s různým stupněm mylonitizace (změnou velikosti zrna v průběhu deformace) a porušení. [14]

Heterogenita horninového masivu se váže na složitý tektonický vývoj, který výrazně změnil geotechnické vlastnosti hornin mezozoika, ale obzvláště hornin krystalinika. Pohoří *Malej Fatry* bylo významně ovlivněno vymožením v období třetihor, kdy došlo k výraznému rozvolnění na jeho okrajích a predisponovaných zónách ve vrcholné a centrální části pohoří. Pro průzkumnou štolu bylo nejpodstatnější, že rozvolnění dosahovalo až pod niveletu štoly. Otevření zlomů a zón diskontinuit (i v horninách krystalinika) velmi nepříznivě ovlivnilo hydrologické poměry a s tím zpomalilo i postup ražeb. Vystřídaly se zde úseky s různými intenzitami přítoku podzemní vody do čelby ražby v řádech litrů, častěji ale s hodnotou 10 až 20, dokonce i 100 l/s. Proudící vodou (dosahující tlaků až 3,1 MPa) docházelo k sufozy horninového masivu a ta při průchodu poruchovými zónami způsobovala zavalení. [14]



Obr. 21 Geologický profil a postup realizované průzkumné štoly tunelu Višňové [14]



#### 4.1.4 Průběh ražby

##### 4.1.4.1 Ražba ze západního portálu

Ze západního portálu byla ražba provedena technologií NRTM. Po úvodních 125 metrech se rozpojování výrubu začalo provádět pomocí trhavin ve vápencových, dolomitických a v posledním úseku i žulových horninách. Z konstrukčního hlediska byl použit k zabezpečení stability výrubu štoly suchý stříkaný beton vyztužený kari sítěmi, ocelové SN kotvy a svorníky Swelex (různé délky). V horších podmínkách se osazovaly ocelové nosníky VTX. [14]

Ve vzdálenosti 400 m od západního portálu (ZP) se zaznamenaly zvýšené přítoky do 50 l/s. V úseku cca 900 m od ZP přítoky dosáhly hodnoty až 100 l/s, což vedlo k nutnosti vyřešení nového konceptu odvodnění. To bylo realizováno systémem čerpacích jímek, umístěných ve zvětšených profilech výhyben cca každých 300 m od sebe. Dohromady se těchto jímek provedlo 7, z kterých pak voda byla odčerpána výkonnými čerpadly. Největší hodnota přítoku se vyšplhala na 154 l/s v červnu 2001. Pokud vznikla vážnější porucha na čerpadle nebo elektrickém připojení, způsobilo to během několika desítek minut zatopení štoly včetně vybavení. S postupem ražby narůstala spotřeba elektrické energie, která se v roce 2002 vyrovnala spotřebě TBM. [14]

Ve vzdálenosti 2920 m od ZP byla provedena sanace TH výztuží (ocelové rámy a zajištění boků kotvami a stříkaným betonem se sítěmi), jako odezva na zával z malých úlomků, zrn a jílu, způsobený přítokem vody v čelbě (20 až 30 l/s, později stabilizován na 10 až 20 l/s). Další ražba už byla pod ochranou mikropilotového deštníku. Dohromady se vytvořily 3 překrývající se deštníky až do vzdálenosti 2930 m od ZP. 80 m před prorážkou tunelu (3118 m od ZP), se objevila ještě jedna zvodnělá porucha ve vzdálenosti 3037 m od ZP, sanace byla vyřešena obdobně jako předešlého případu. Ohromnou výhodou technologie NRTM byl dobry přístup mechanismů potřebných ke zvládnutí sanačních opatření. [14]



Obr. 22 Zával způsobený sufozními účinky tlakové vody v tektonické poruše ZP [14]

##### 4.1.4.2 Ražba z východního portálu

Z východního portálu byla ražba provedena plnoprofilovým razícím strojem (TBM) ATB 35 HA systém DEMAG s  $\varnothing$  řezné hlavy 3,5 m, zapůjčeným od rakouské stavební firmy. Šlo o otevřený razící TBM určený do tvrdých hornin s pevností až 280 MPa. Razící stroj byl kompletně vybaven dopravní technikou, vagóny na rubaninu o objemu 4,75 m<sup>3</sup>, speciálními vagóny na tubingy dna, stříkaný beton a dopravu personálu. Vagónové



soupravy byly taženy dvěma diesellovými lokomotivami (s prodloužením dopravní vzdálenosti se přidala i třetí). Ve vybavení razicího stroje byla také sondovací vrtačka s možností předvrtu 26 m před hlavu, účinný větrací systém, skrápěcí zařízení a filtr pro zabránění prašnosti při ražbě. [14]

Na začátku se provedla zarážka technologií NRTM v délce 68,8 m, prodloužené z původních 20 m, z důvodu tektonicky porušeného masivu, silně zvětralých hornin a různých stupňů zvodnění (střídání suchých a mokrých úseků). Došlo k nahromadění nepříznivých faktorů, které komplikovaly postup práce, z kterých se jako největší problém jevila zvodnělost masivu, která byla v krystaliniku neobvyklá. Předpokládalo se, že zvodnělé horniny v krystaliniku Malej Fatry se nacházejí pouze v zónách rozvolnění a zvětrání pláště hornin (hloubka 30 až 50 m, ojediněle 100 m). [14]

Při realizaci štoly došlo k úplnému opaku předpokladu. Přítok podzemní vody do štoly se postupně ukázal jako trvalý a jeho hraniční hodnota dosáhla až 120 l/s na čelbě, s tlakem až 3,1 MPa. Největší přítok se vyšplhal až na hodnotu 420 l/s. Proudící tlaková voda, se svými sufozními účinky, způsobovala v poruchových zónách závaly. To vedlo k **nutnosti zastavení prací** a provedení doplňujících sanačních opatření. Nejúčinnějším opatřením se ukázalo provedení mikropilotového deštníku, jako nosného prvku který bránil sufozním účinkům tlakové vody, který postupně zpevnil a utěsnil horninu. [14]

#### 4.1.5 Závěr

Zjištěním z předběžného IGHP (provedeného v letech 1997-1998) bylo patrné, že geologické poměry v trase budoucího tunelu budou složité. Investor se tak správně rozhodl pro realizaci průzkumné štoly v celé délce tunelu. Průzkumnou štolou se zjistily o dost nepříznivé geologické poměry, oproti původně uvažovaným. Výskyt poruchových zón dosahoval až pod úroveň nivelety tunelu (do hloubky až 700 m od povrchu) a do šířky v okruhu 7 km. V rozvolněných horninách se ověřil značný výskyt trvale proudící podzemní vody do štoly. [14]

Profil štoly 3,5 m byl z důvodu složité geologie nedostatečný. Problémy byly především u technologie TBM, kde byl nedostatek prostoru při řešení sanací horninového prostředí. I přes obrovské časové ztráty se povedlo vyrazit s technologií TBM o 1250 m víc jako s NRTM, přestože razicí stroj nebyl vybaven na zastižené geologické poměry. Technologie NRTM se ukázalo jako flexibilní při řešení sanací, což byla její nesporná výhoda, díky které dosahovala pravidelných výkonů (avšak relativně pomalejších). [14]

Průzkumná štola i za cenu větších nákladů a délky výstavby přinesla cenné inženýrskogeologické a hydrogeologické poznatky. Zároveň se ražbou průzkumné štoly odstranily nejhroší tlakové projevy podzemní vody. [14]



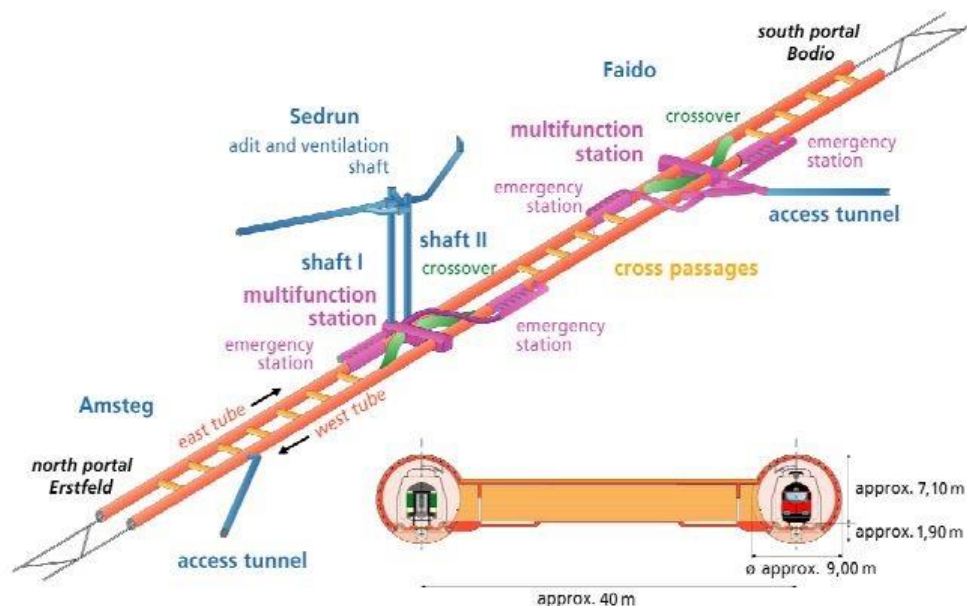
## 4.1 Průzkumná štola Gotthardského bázového tunelu (Švýcarsko)

### 4.1.1 Úvod

Gotthardský železniční bázový tunel je největší samostatnou stavbou švýcarského transalpského železničního systému. Význam stavby spočívá ve zrychlení železničního spojení přes Alpy mezi Curychem a Milánem. Vzhledem ke své mimořádné délce 57 km bylo evidentní, že tunel může být realizován v rozumném čase jen za použití dvou hlavních konceptů. Ražby nejen z portálů, ale také z několika mezilehlých míst a za pomoci především technologií TBM. [15]

Tunel se skládá ze dvou paralelních jednokolejných trub s proměnným profilem  $\varnothing$  8,8 až 9,5 m, mezi sebou propojených každých 312 metrů. Pro zkrácení doby výstavby byla délka tunelu rozdělena do pěti částí. Na trati se nacházejí dvě multifunkční stanice v části Sedrun a Faido, ty budou sloužit k přesměrování vlaků do druhé tunelové trouby přes výhybky, umístění technické infrastruktury a vybavení a jako nouzové stanice pro evakuaci cestujících. [16]

Na projektu se podílely společnosti Lombardi, s. r. o., Amberg Engineering, s. r. o. a Pöyry Infra, s. r. o. V roce 1996 byly zahájeny přípravné práce ražbou přístupových tunelů a šachet. Hlavní stavební práce byly zahájeny v roce 2002. Slavnostní otevření tunelu proběhlo dne 1. června 2016, tunel byl zprovozněn pro pravidelnou dopravu 11. prosince 2016. Celková cena výstavby tunelu byla cca 12 miliard USD. [15]



Obr. 23 Schéma systému Gotthardského tunelu [17]

### 4.1.2 Základní informace

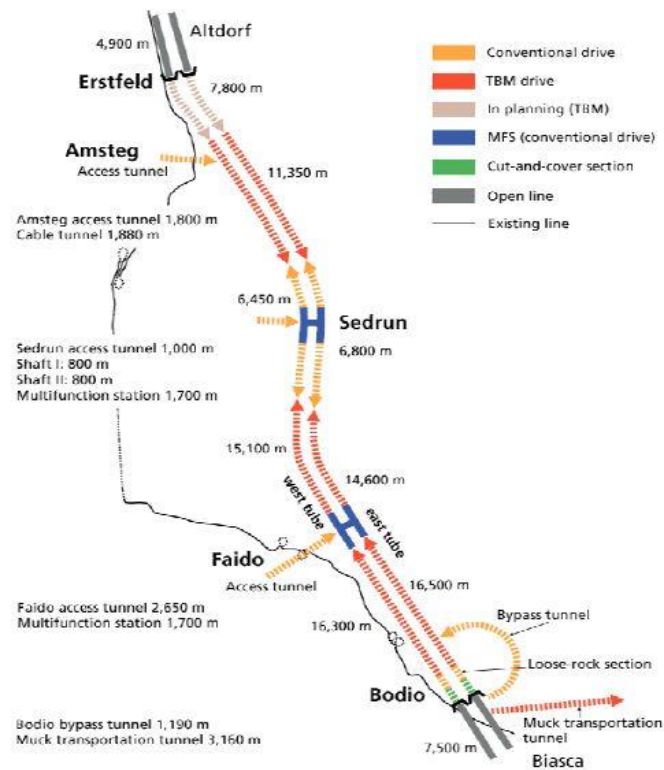
Velká část tunelu má velmi vysoké nadloží, největší hodnota je cca 2400 m. Okolo 30 km tunelu bude mít nadloží více než 1000 m, 20 km trasy pak 1500 m a cca 5 km přes 2000 m. [16]

Trasa tunelu není přímá linie, ale zlehka se tvaruje do písmene S (viz Obr. 24). Tento návrh je opodstatněn ražbou z mezilehlých míst a geologickou situací. Tvar byl navrhnout tak aby využil poměrně dobré horninové vlastnosti podél hlavní části trasy, vyhnul se maximální výšce nadloží (zejména při přechodu alpského hřebene) a jedné





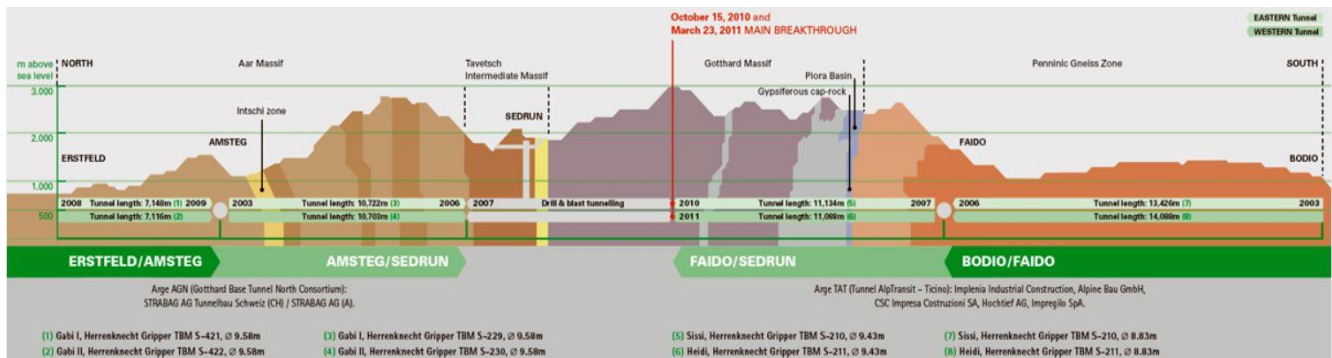
přehradové nádrži vzdálené necelý 1 km od trasy tunelu. Přibližně dvě třetiny celkových ražeb budou provedeny metodou TBM. Konvenční metoda je omezená především na část Sedrun, kde tunel prochází poněkud měkkou skálou, a na komplexní kavernový systém multifunkčních stanic. [15]



Obr. 24 Situace použití několika tunelovacích metod Gotthardského tunelu [15]

Ražba začala z několika míst, zahájena byla z portálu v Erstfeldu na severu (rok 2004) a v Bodio na jihu (rok 2002), stejně tak ze tří mezilehlých míst na trase tunelu z přístupových tunelů v Amstegu (rok 1999) a Faido (rok 1999), a ze dvou vertikálních šachet v Sedrunu (rok 1996). [16]

Během předběžné fáze (v 90. letech) byly pomocí TBM provedeny tři doplňkové štoly. Byla to průzkumná štola Piora (ražená z Faido) délky 5,5 km a průměru 5 m, štola pro pásový dopravník v blízkosti jižního portálu Bodio dlouhá 3,2 km a 0,45 km dlouhá šikmá šachta pro vývod vzduchu v Sedrunu. Všechny tyto doplňkové práce, byly provedeny bez velkých geologických obtíží, kromě úseku Piora. [15]



Obr. 25 Obecný podélný řez Gotthardského tunelu [18]

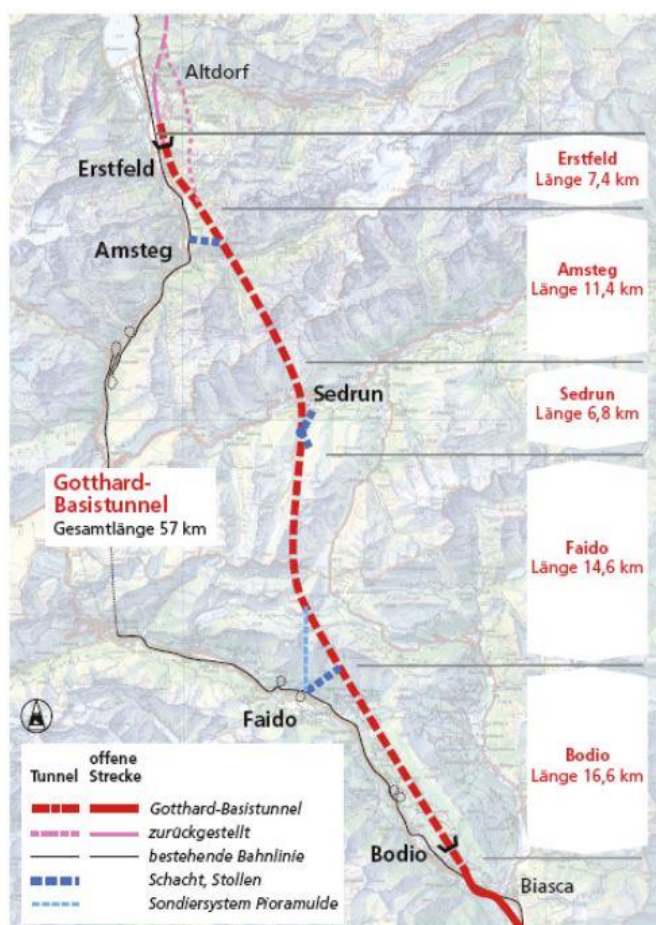


#### 4.1.3 Průzkumná štola Pióra

Velmi kritickou a nejzajímavější se ukázala ražba průzkumné štoly Pióra, ražené z Faido směrem na geologickou poruchovou zónu nazývanou Pióra-Mulde. Ražba byla provedena pomocí TBM. Během ražby v březnu 1996 byl proveden sondovací vrt, v kterém se během tří hodin zvedl tlak přítokové podzemní vody až na 15 MPa (150 bar) a skrze vrt  $\varnothing$  100 mm se do výrubu dostalo 1400 m<sup>3</sup> jemnozrnného dolomitu. Razicí stroj byl obnoven a čelba musela být zapečetěna betonovým špuntem tloušťky 8 m. [19]

Přístup spočíval ve snaze vyhnout se střetu TBM s povodím. Dlouho před předpokládanou nejnižší úrovní povodí byly prováděny pokročilé vrty, a posledních 80 až 120 m byly provedeny překrývající se vrty délky 10 až 20 m. Vrtná souprava na TBM byla vybavena ochranným zařízením, schopným zadržet tlaky vody až o 15 MPa (150 bar). Pravidelné hydrogeologické zkoušky ukázaly skutečný tlak vody v rozmezí 7 až 10 MPa (70 až 100 bar), jen několik metrů od stěny tunelu. [15]

Laboratorní výsledky jader z 19 provedených sondovacích vrtů odhalily horniny s relativně dobrými mechanickými vlastnostmi v trase hlavního tunelu cca 350 m pod průzkumnou štolou. To byl významný objev a jedno z hlavních geologických potvrzení pro pokračování projektu. Naštěstí při vlastní ražbě hlavních tunelů, v září roku 2008, byly potvrzeny tyto předpoklady. Na hlavní trase tunelu byly tak dolomity v Pióra-Mulde zdravé, nepropustné a vhodné pro mechanizované tunelování. [19]



Obr. 26 Situace stavebních částí Gotthardského bazového tunelu [19]



#### 4.1.4 Význam předběžného průzkumu a sondování

Počínaje předběžnými studiemi koncem osmdesátých let, až po finální návrh o deset let později, celý projekt byl doplněn řadou geologických a hydrologických výzkumných programů. Počáteční nejistota v oblasti Piora byla vyřešena rozsáhlým průzkumným systémem, skládajícím se z 5,5 km dlouhé průzkumné štoly a 19 sofistikovaných vrtů s dlouhým dosahem. [15]

Veškeré TBM byly vybaveny automatickým přístrojem pro záznam dat, zaznamenávajícím široký rozsah provozních parametrů, z nichž většina přímo souvisí se systémem řízení TBM. Především se jednalo o data přítlačných válců, sloužících k posunu vpřed tlakem do dílců ostění, a jednoho ze štítových zvedáků, který podává informace jak o postupu TBM, tak i o horninovém tlaku masivu. Kromě sběru dat, byla věnována pozornost použití těchto parametrů v reálném čase. To umožnilo vyladění činnosti TBM, především v nepříznivých podmínkách. [15]

Související zpětná vazba byla použita pro opakovanou revizi uspořádání projektu a podporných metod v předpolí ražby. Bylo zřejmé, že předběžné průzkumy z povrchu nebudou stačit k zajištění bezpečné ražby TBM s nadložím 1000 a více metrů. Vzhledem k omezené flexibilitě reagovat na nepředvídané události na čelbě ražby, spojené s možným zaseknutím TBM, předpolí ražby bylo systematicky doplňováno pokročilými vrty z čelby. [15]



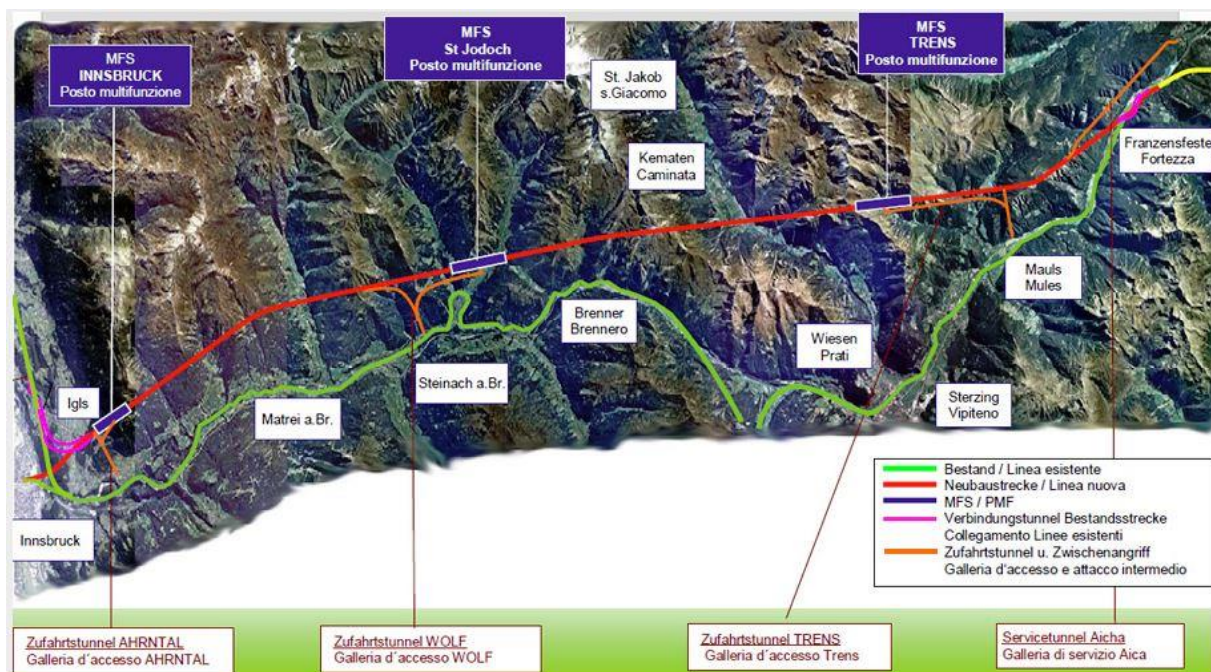
## 4.2 Brennerský bázový tunel (Rakousko – Itálie)

### 4.2.1 Úvod

Bázový tunel podchází Brennerský průsmyk, který leží mezi Stuaiskými a Zillertálskými Alpami. Poměrně nízké nadmořské výšce 1374 m n. m. je Brennerský průsmyk nejnižším v Alpách. Prehistorickou stezku zde začali využívat Římané od roku 48 n. l. Silnice vede sedlem od roku 1772, železnice od roku 1867 a provoz Brennerské dálnice byl zahájen roku 1974. [20]

Již v roce 1847 uvažoval italský inženýr Giovanni Qualizza o železničním tunelu pod Brennerským průsmykem. Se svým nápadem však neuspěl. Až v roce 1971 rozhodla mezinárodní železniční unie o vytvoření skupiny expertů státních železnic, zastoupených z Německa, Rakouska a Itálie, který měla vypracovat studii nové Brennerské dráhy s využitím bázového tunelu. Mezistátní dohoda mezi Rakouskem a Itálií o výstavbě tunelu byla uzavřena v dubnu 2004 a vlastní práce byly zahájeny v roce 2008, kdy byla u obce Aica severně od Brixenu zahájena ražba průzkumné štoly pomocí TBM. [20]

Stará železniční trať z Innsbrucku do Bolzanu byla postavena v letech 1864 až 1867. Na její trase bylo nutné vyrazit 22 tunelů o celkové délce 5233 m. Výškový rozdíl mezi Innsbruckem a Brennerským průsmykem je 786 m. Malé poloměry směrových oblouků a podélný sklon, který dosahuje až 25 ‰, komplikují železniční dopravu. Nová Brennerská trať by měla mít maximální podélný sklon v tunelu okolo 7 ‰. Lokomotivy by tedy měly být schopny přepravovat více než dvojnásobek hmotnosti dosavadního nákladu. Nová trať by měla snížit dobu cestování z Innsbrucku do Bolzanu ze dvou hodin na méně než jednu. Spuštění provozu Brennerského bázového tunelu je odhadováno na rok 2026. [20]



Obr. 27 Situace Brennerského bázového tunelu [21]

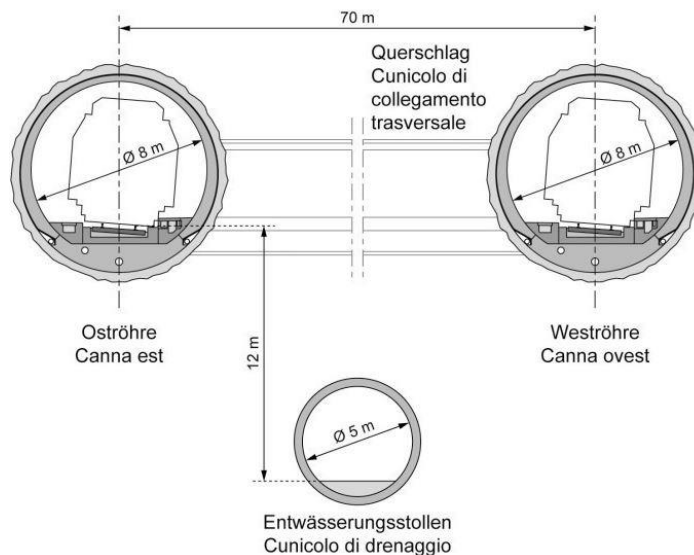


#### 4.2.2 Základní informace

Vlastní bázový tunel mezi severním portálem Innsbruck (Rakousko) a jižním portálem Fortezza nad Brixenem (Itálie) má délku 55 km. S přičtením délky 9 km únikového tunelu od portálu Tulfes, půjde tak o nejdelší podzemní železniční trať na světě s celkovou délkou 64 km. Tunel je tvořen dvěma jednokolejnými troubami o vnitřním  $\varnothing$  8 m, které budou od sebe vzdáleny 70 m (měřeno v ose). Každých 333 m budou propojky mezi troubami, takže v případě mimořádné události bude druhá trouba sloužit jako úniková cesta. Podélný sklon tunelů se pohybuje od 5 do 6,7 ‰. [20] [22]

V bázovém tunelu budou vybudovány celkem tři podzemní multifunkční stanice (MFS na Obr. 27). MSF Innsbruck 5 km od innsbruckého portálu, přibližně na 25 km MFS Jodok a na 45 km MFS Trens. Bázový tunel se také v podzemí propojí, s dříve dokončeným a provozovaným železničním obchvatem města Innsbruck, pomocí 9 km dlouhého únikového tunelu. [20]

Zvláštností Brennerského tunelu je průzkumná štola o vnitřním  $\varnothing$  5 m, umístěná 12 m pod úroveň hlavních trub a to uprostřed mezi troubami v celé délce bázového tunelu. Ta byla vyražena před zahájením prací na tunelových troubách. Pouze začátek průzkumné štoly Aica je veden mimo hlavní trasu. [20]



Obr. 28 Příčný řez brennerským bázovým tunelem [22]

Průzkumná štola je stavebně rozdělena do šesti částí: Aica, Mules a Vize v Itálii; Wolf, Ahrental a Innsbruck v Rakousku. Hlavní funkcí průzkumné štoly je prozkoumání podmínek, vlastností a chování horninového masivu po celé délce bázového tunelu a poskytnout tak důležité údaje pro jeho návrh a výstavbu. V průběhu stavby vlastních tunelových trub bude štola také sloužit pro dopravu rubaniny a po jejich uvedení do provozu bude odvádět průsaky z hlavních tunelů a současně umožňovat jejich inspekci a údržbu bez přerušení železniční dopravy, zároveň bude štola sloužit k převodu elektrických a datových kabelů mezi Rakouskem a Itálií. [20]

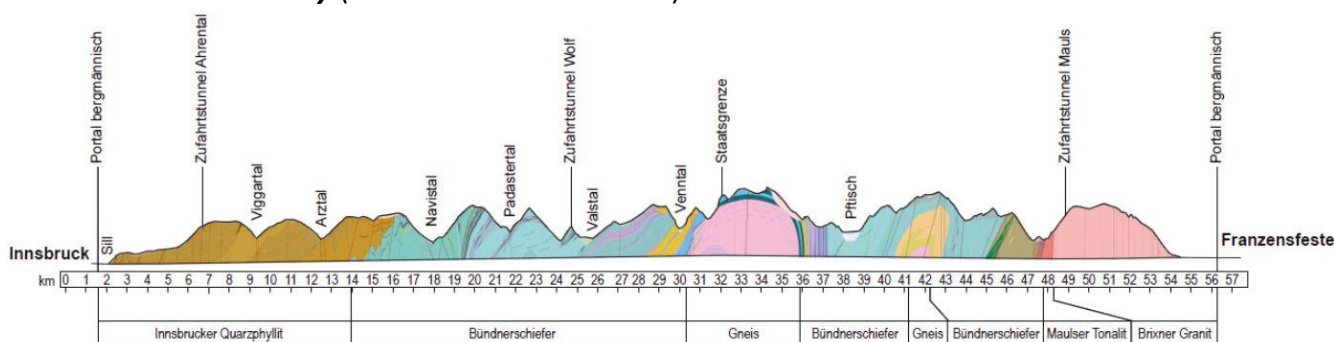


#### 4.2.3 Geologické poměry

Geologie podél trasy je tvořena zónami hornin, zobrazených na Obr. 29.

Jedná se o tyto horniny:

- **křemenný fylit** (v němčině *Innsbrucker Quarzphyllit*)
- **bundnerské břidlice** obsahující dolomity, křemeny, anhydrity, drobové pískovce a další břidlice (v němčině *Bündnerschiefer*)
- **ruly** (v němčině *Gneis*)
- **brixnerské žuly** (v němčině *Brixner Granit*)



Obr. 29 Podélný geologický řez Brennerským masivem [23]

Výška nadloží v geologickém řezu dosahuje nejvýše cca 1600 m, v místě mírně vzdáleném od středu směrem na jih (do Itálie). V tomto místě se také objevují poruchové zóny související s obtížnými hydrogeologickými podmínkami. Ve staničení 47 – 48 km (severně od brixnerských žul) se také nachází hranice tektonické desky. [23]

#### 4.2.4 Průběh ražby štoly na úseku Aica - Mules

Prvním krokem k realizaci Brennerského bazového tunelu bylo provedení 10,5 km dlouhé *průzkumné štoly mezi částí Aica a Mules, včetně přístupového tunelu Mules* délky 1,8 km. [24]

*Přístupový tunel Mules* o délce 1,8 km, profilu 105 m<sup>2</sup> a sklonu 8,5 % byl ražen trhačími pracemi. Po délce trasy byly z 95 % zastíženy kompaktní odolné horniny, trhačí práce byly tak použity na celé délce. Ražba byla dokončena v roce 2009. [22]

Ražba 10,5 km dlouhé štoly, která začala v dubnu roku 2008, byla provedena TBM o průměru 6,3 m, s dvojitým štítem. Ostění štoly je tvořeno prstencem složeným z pěti prefabrikovaných betonových segmentů tloušťky 20 cm a délky 1,5 m. Toto ostění bylo navrženo a zkonstruováno tak, aby čelilo konkrétním podmínkám, které zahrnovaly asymetrické tahy v ostění, náhlé a prudké popraskání horniny, široké poruchy horninové masivu paralelně s osou štoly a přítoky podzemní tlakové vody. V místech vysokých asymetrických tahů byla použita speciální ocelová výztuž. [24] [23]

Postup ražby byl poměrně pomalý, za polovinu času určeného smlouvou byla vyražena pouze jedna třetina délky štoly. Pevnost masivu dosahovala až 220 MPa, což způsobovalo vysoké opotřebení řezných nástrojů a malou míru průniku. Na 6 km ražba procházela skrz poruchovou zónu. V srpnu roku 2009 zde utrpěl úsek ostění poškození



tlakem podzemní vody až 2,7 MPa. Sanační opatření zahrnovalo stabilizaci zeminy, odstranění poškozených prstenců ostění, injektáž polymerů do porušeného úseku a instalaci speciální ocelové výztuže po délce a kousek za poruchovou zónou. V prosinci 2009 ražba mohla opět pokračovat. Úseku byl úspěšně dokončen v září roku 2010, v montážní kaverně na křížení trasy štoly a budoucího bázového tunelu. Průměrný denní postup činil 16 m za den. [23]

Na staveništi Mules, na italské straně, byl již proveden největší objem prací. Z přístupového tunelu Mules byla také zahájena první ražba vlastních tunelových trub na celé stavbě, pomocí konvenční metody. [20]



Obr. 30 Segmentové ostění průzkumné štoly Aica [23]



Obr. 31 Prorážka průzkumné štoly [24]

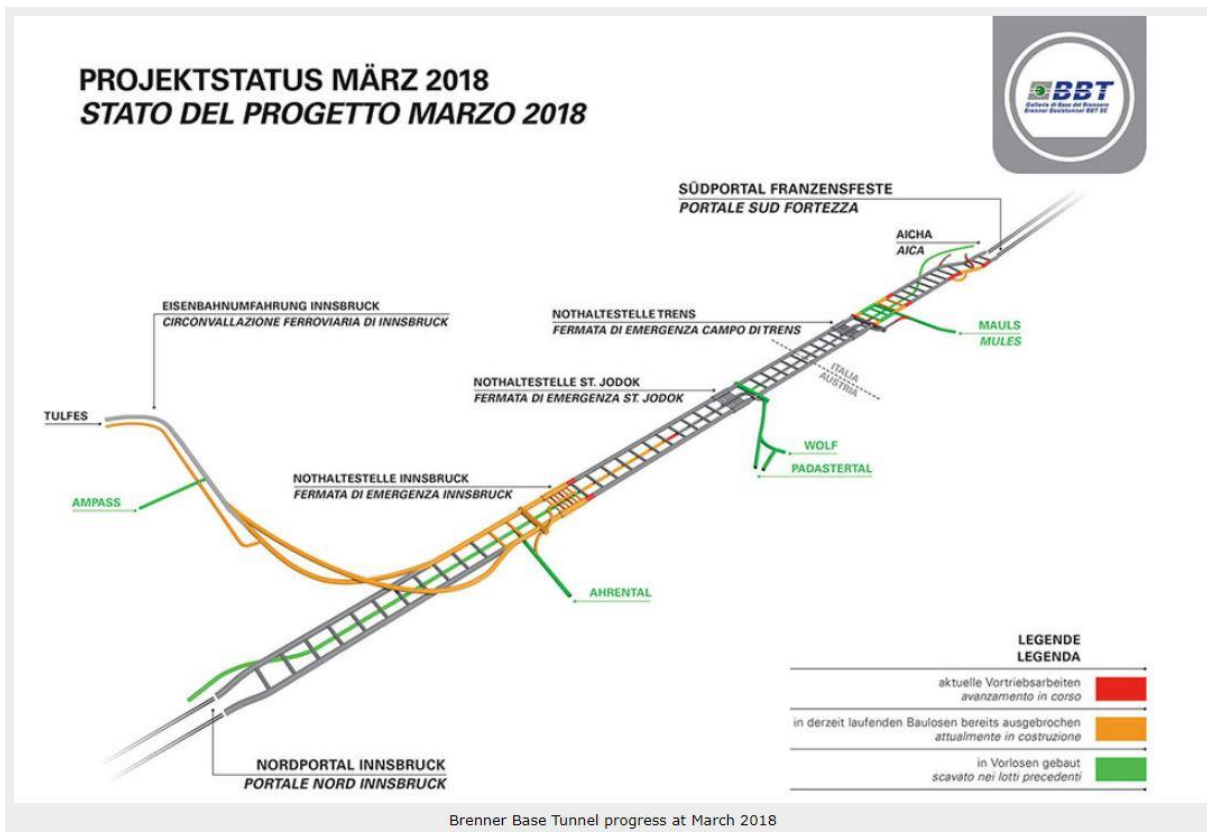


#### 4.2.5 Postup ražby tunelů na ostatních částech stavby

Na Obr. 32 je znázorněn postup výstavby na jednotlivých stavenišťích datovaný k březnu roku 2018. Zelené úseky jsou již realizované, oranžové aktuálně ve výstavbě a červené označují probíhající pokrok. [25]

Na stavební části Tulfes – Pfnos je aktuálně ve výstavbě únikový tunel délky 9 km, profilu 30 až 40 m<sup>2</sup>. Je ražen od září 2014 konvenční metodou od portálu v Tulfes. Před zahájením ražby byl dokončen **přístupový tunel Ampass** délky 1348 m, z kterého bude provedena ražba spojovacích železničních tunelů propojujících obchvat města Innsbruck a Brennerský bázový tunelu. Napojení stávajícího a nového tunelu proběhne ještě před multifunkční stanicí Innsbruck. Tato stanice se začala razit v roce 2015 z dokončeného **přístupového tunelu Ahrental**, délky 2426 m, profilu m a se sklonem 10 %. K místu křížení přístupového tunelu Ahrental s hlavní trasou, již byla vyražena 6 km průzkumná štola od portálu Innsbruck. [20]

Dalším dokončeným dílem je konvenčně ražený přístupový tunel Wolf délky 4060 m, s profilem 120 m<sup>2</sup> a sestupným sklonem 10 %. Jeho ražba byla zahájena v prosinci 2013 a vedla přibližně do 25 km hlavní trasy, kde se bude nacházet MFS Jodok. [20]



Obr. 32 Postup výstavby Brennerského bázového tunelu k březnu 2018 [25]





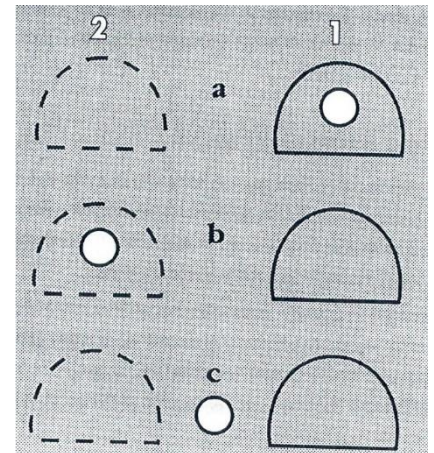
## 5 Technické možnosti realizace průzkumných štol

Průzkumná štola může být i významnou součástí technologie ražby budoucího tunelu avšak technologické cíle průzkumné štoly nesmějí být v rozporu s cíli GTP. Zvláštní pozornost je nezbytné věnovat umístění průzkumné štoly v profilu budoucího tunelu a statickému vyřešení spolupůsobení ostění průzkumné štoly a tunelu (pokud je tak navrženo). Období mezi dokončením ražeb průzkumné štoly a tunelu by mělo být co nejkratší. [26]

### 5.1 Umístění průzkumné štoly

Při návrhu průzkumné štoly je nutné pečlivě zvážit její umístění. Může být umístěna do trasy budoucího raženého tunelu nebo mimo ní. Při etapovém budování dvoutroubových dálničních tunelů přichází ke zvážení i umístění průzkumné štoly do průřezu druhé (z hlediska výstavby) tunelové trouby. Každé řešení má své výhody a nevýhody. [26]

Obr. 33 Umístění průzkumné štoly vzhledem k ražení dvou tunelových trub [26]



#### 5.1.1 Umístění v trase tunelové trouby

Průzkumná štola umístěná v trase budoucího tunelu nejspolehlivěji vypovídá o geologických podmínkách v trase. Nesmírnou výhodou je i odečet kubatury výrubu štoly od kubatury výrubu tunelu a snížení nákladů na ražbu tunelu. Nevýhodou je, že ražení tunelu může začít až po dokončení průzkumné štoly. [26]

#### 5.1.2 Umístění v trase druhé (z hlediska výstavby) tunelové trouby

Toto umístění nám přináší řadu výhod. Jde především o tyto:

- ražba tunelu může začít ještě před ukončením ražby průzkumné štoly, přičemž můžeme výsledky průzkumu postupně zapracovat do projektu
- z průzkumné štoly můžeme otevřít další pracoviště a tím výstavbu tunelu urychlit
- průzkumnou štolu můžeme využít na zlepšení podmínek ražení tunelu (větrání, odvodnění, umístění rozvodů)
- po uvedení první tunelové trouby do provozu, může být průzkumná štola upravena na únikovou chodbu pro účastníky dopravy v tunelu, v případě požáru a dopravních havárií

Jistou nevýhodou je, že se náklady na ražbu průzkumné štoly z části odpočítávají až z nákladů na ražbu druhé tunelové trouby. [26]



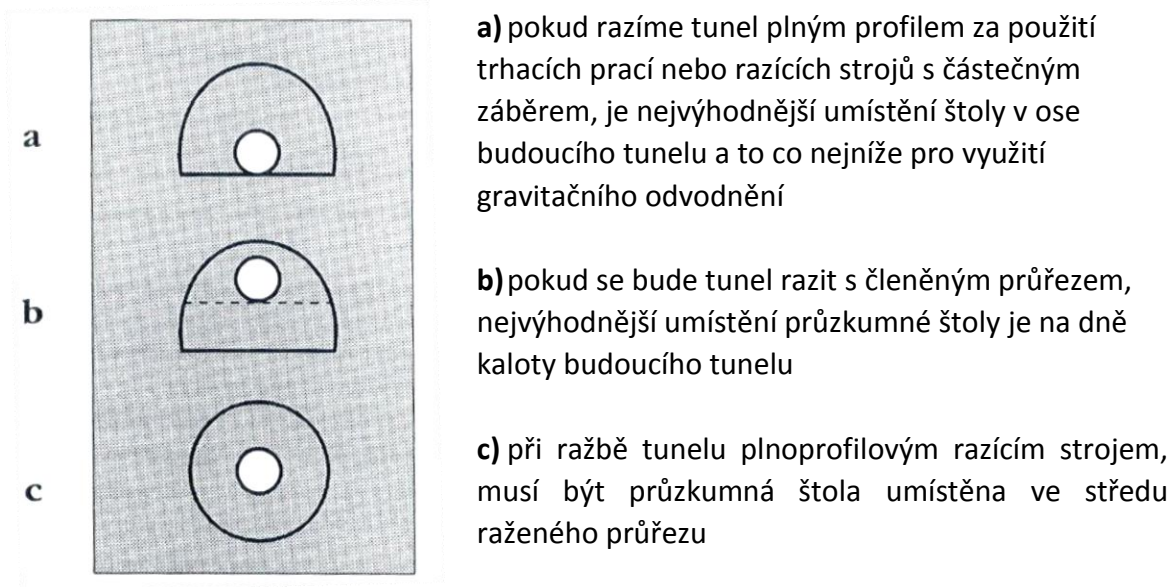
### 5.1.3 Umístění mimo průřez tunelové trouby

Ražba průzkumné štoly mimo navrhovanou trasu tunelu je odůvodnitelná: [26]

- při jednoduchých dopravních (silničních a železničních) tunelů, pokud se počítá s využitím průzkumné štoly (po uvedení tunelu do provozu) jako únikové chodby, resp. pokud se využije na urychlení výstavby vlastního tunelu
- u tunelů budovaných v obzvláště obtížných hydrogeologických podmínkách, pokud se využije jako součást technologického vybavení (odvodnění, větrání)

### 5.1.4 Umístění vzhledem k technologii ražby

Umístění průzkumné štoly v samotném průřezu může být různé, ale musí zohledňovat zejména způsob ražení vlastního tunelu. [26]



Obr. 34 Umístění průzkumné štoly vzhledem k technologii výstavby [26]

Pokud je průzkumná štola umístěná v průřezu druhé (z hlediska výstavby) tunelové trouby, musí být navržena tak, aby nepřekážela při její výstavbě, tím pádem pro tento případ platí stejná kritéria jako pro umístění do průřezu první tunelové trouby.



## 6 Monitoring během ražby průzkumné štoly

S geotechnickým průzkumem a ražbou štoly souvisí i geotechnický monitoring. Geotechnické podmínky a nároky technického řešení budoucích ražených objektů vedou ke stanovení rozsahu geotechnických prací.

Jedná se pak o tato měření: [1] [11]

- 1) Geodetické body na terénu
  - Geodetická nivelace
  - Trigonometrie
- 2) Měření deformací objektů nadzemní zástavby
  - Geodetická nivelace
  - Trigonometrie
- 3) Sledování a měření poruch objektů nadzemní zástavby
  - Vznik a průběh poklesové kotliny
  - Sledování poruch
  - Sádrové pásky v objektech nadzemní zástavby
  - Hrotové deformometry v objektech nadzemní zástavby
- 4) Konvergenční měření
- 5) Presiometrická měření
- 6) Kontrola po injektáži
- 7) Geotechnické a geologické sledování výrubů
- 8) Hydrogeologické sledování
  - Pokles hladiny podzemní vody
  - Monitoring vrtů na povrchu
  - Piezometrické měření hydrostatického tlaku
  - Laboratorní rozbory
- 9) Bilance přiváděné a odváděné vody z průzkumné štoly
- 10) Vodní tlakové zkoušky
  - Před provedením sanačních injektáží
  - Po provedení sanačních injektáží
- 11) Dynamická a akustická měření
- 12) Průkazná měření únosnosti svorníků
- 13) Dlouhodobé sledování na svornících
- 14) Geofyzikální měření
- 15) Extenzometrická měření
- 16) Inklinometrická měření (příp. klouzavé deformetry)
- 17) Měření napětí v primárním ostění

Pro geotechnický monitoring v průběhu ražby průzkumné štoly platí v přiměřeném rozsahu *TP 237 Geotechnický monitoring tunelů pozemních komunikací*.



## 7 Význam realizace průzkumné štoly

Dopravní tunely patří mezi velké a náročné podzemní stavby. Aby jejich výstavba probíhala spolehlivě, rychle a hospodárně, je nutná realizace podrobného inženýrskogeologického průzkumu. Ten musí poskytnout zpracovateli projektu dostatečné podklady pro projektování. U každého podzemního díla je potřeba zvážit, jaká forma inženýrskogeologického průzkumu má být zvolena. [26]

Ve skalních horninách, je nezbytné pomocí inženýrskogeologického průzkumu zjistit především celkovou stavbu horninového masivu a typy hornin, které ho tvoří, mocnosti pokryvných útvarů, hloubku zvětrávání, zvodnělost horninového masivu, množství, mocnost a charakter poruchových zón a úložné poměry (směr, sklon, hustota a charakter ploch diskontinuit, vztažených k ose budoucího podzemního díla). Kromě hornin musíme také věnovat pozornost, ne-li větší, zjištění charakteristik zemin. [26]

Ze strany projektanta ale i realizátora výstavby je však nutné zjistit i tyto charakteristiky:

- mechanicko-fyzikální charakteristiky
- pevnostní a deformační charakteristiky horninového prostředí
- napjatost v masivu a jeho deformování okolo výrubu
- velikost tlaků na výztuž
- charakter podzemních vod (druh agresivity)

V závislosti na zvolené technologii výstavby, musíme znát i tyto *technologické vlastnosti*: vrtatelnost, rozpojitelnost, abrazivitu, štěpitelnost, pevnost při bodovém zatížení, dobu stability nevystrojeného výrubu atd. [26]

Díky poznání výše uvedených charakteristik a vlastností můžeme tunel rozčlenit na kvazihomogenní úseky, určit optimální délky záběrů, členění profilu a optimální způsoby zabezpečení výrubu. Čím přesnější a spolehlivější údaje průzkumu budou získány, tím bude návrh i jeho realizace hospodárnější a přinese méně problémů. [5]

### 7.1 Přínos průzkumné štoly pro přípravu a realizaci budoucího tunelu

V porovnání s geotechnickým průzkumem prováděným z povrchu má průzkumná štola zejména tyto výhody: [1] [3]

- poznání geologických podmínek spojitě po celé délce trasy tunelu (důležité v případech, kde se geologické podmínky často střídají)
- možnost provést mechanické zkoušky in situ (deformační případně i pevnostní) a geofyzikální měření ke zjištění dosahu rozvolněné zóny a k rozdělení horninového masivu do kvazihomogenních celků podél tunelu
- identifikování úseků zvýšených horninových tlaků, přítoků podzemní vody a místa tvoření velkých nadvýlomů
- provedení sanačních injektáží horninového prostředí, včetně jejich zkoušek
- využití praktických zkušeností z ražby štoly při ražbě tunelu
- štola samotná může působit jako mohutný horizontální svorník, a zvýšit tak stabilitu čelbě budoucího tunelu
- může sloužit k odvodnění, větrání nebo jako únikový východ
- při bourání ostění průzkumné štoly může stropní klenba štoly tvořit ochranu stropu výrubu v nezajištěném záběru



Příprava a realizace průzkumné štoly může mít i jiné než geotechnické důvody, které mohou být velmi významné: [1] [3]

- předstihové zahájení projektu realizací průzkumné štoly na základě jiných než stavebních předpisů
- předstihové vytvoření podmínek pro budoucí stavbu (zařízení staveniště, komunikace, doprava, energie, média)
- politický důvod – pokud se realizuje průzkumná štola, většinou dojde i na realizaci samotného tunelu

S průzkumnými štolami jsou spojeny i některé nevýhody, např.: [1] [3]

- zvýšené pořizovací náklady
- částečné vyšší rozvolnění horninového prostředí
- obtíže při bourání ostění průzkumné štoly při ražbě tunelu
- komplikace s odvodněním (vytékající podzemní voda z průzkumné štoly)



## 8 Výpočetní modely

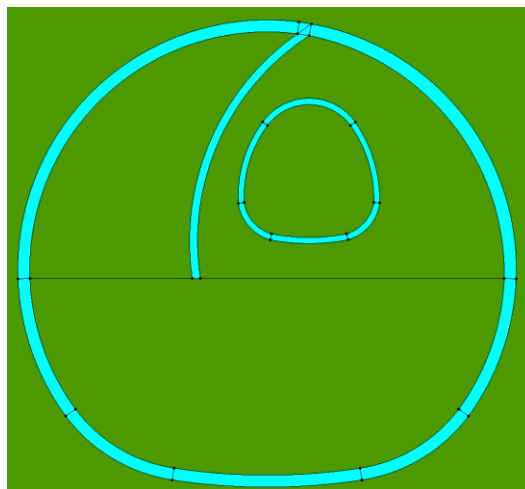
### 8.1 Úvod

V následující části se bakalářská práce zabývá porovnáním deformačních, napjatostních a silových výsledků dvou 2D modelů příčného řezu tunelu. První model (model A) vytvořen včetně průzkumné štoly a druhý (model B) bez ní. Pro modely byl použit program CESAR-LCPC od francouzské firmy LCPC využívající metodu konečných prvků.

Zvolený řez je z průzkumné štoly jižní tunelové trouby Tunelového komplexu Blanka (Městský okruh v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka) ve staniční 6,018 km. V přílohách jsou výkresy situace a podélného řezu trasy tunelu, vzorový příčný řez primárního ostění štoly a tunelu. Tyto výkresy sloužily jako podklad pro geometrii modelu (ostění štoly a tunelu) a jednotlivá geologická rozhraní. Parametry hornin pak byly získány ze závěrečné zprávy k podrobnému geotechnickému průzkumu.

### 8.2 Vytvoření modelu

Model je tvořen plošnými prvky. Pro vytvoření geometrie modelu bylo vycházeno ze vzorového příčného řezu primárního ostění tunelu s průzkumnou štolou. Program umožňuje na-importovat libovolnou geometrii v souboru formátu DXF. Výška tunelu je 11,75 m a šířka 12,54 m. Štola je vysoká 3,64 m a široká 3,565 m.



Obr. 35 Geometrie ostění v modelu

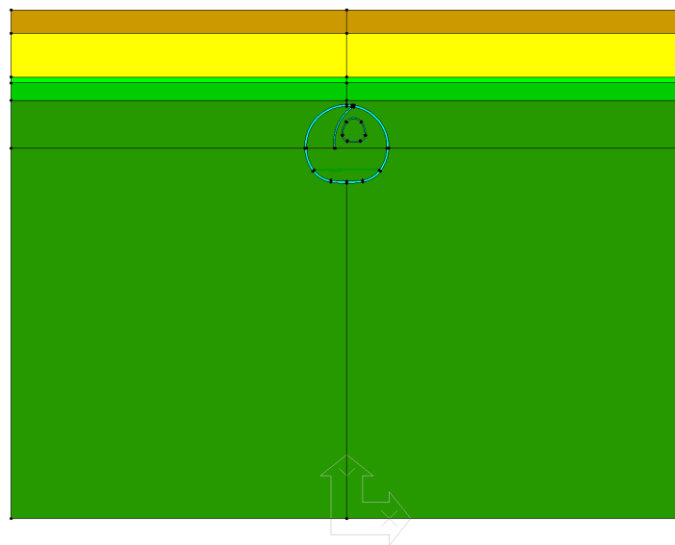
Počáteční bod souřadného systému modelu je vložen do poloviny spodní hrany okraje prostoru. Ve svislém směru (osa Y) je nad nejvyšším bodem ostění tunelu nadloží výšky 14,1 m. Od boků ostění tunelu (osa X) a pod nejnižší bod ostění tunelu (osa Y) je vzdálenost prostoru modelu zvolena přibližně  $4d$ , přičemž  $d=12,54$  (průměr ostění). Velikost modelu je tedy cca 113 x 77 m.

Okrajové podmínky modelu jsou nastaveny tak že, body dna jsou vetknuté a boční okraje jsou deformovatelné pouze ve svislém směru. Prostor modelu by měl být dostatečně veliký, aby nedošlo k ovlivnění výsledků okrajovými podmínky. Kromě



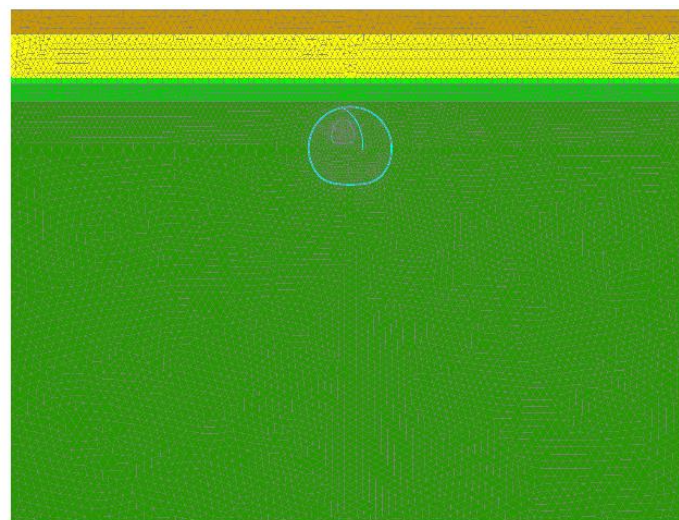
samotné geometrie tunelu a štoly jsou v prostoru modelu také připraveny linie jednotlivých geologických rozhraní a svislá linie, která v budoucnu slouží k zobrazení výsledků na grafu.

Dalším krokem v pořadí bylo vytvoření sítě konečných prvků. Nejprve je ale nezbytné určit počet uzlů na jednotlivých liniích. Podrobná (zahuštěná) síť je důležitá pro samotný řez tunelu a nejbližší okolí. S větší vzdáleností od ostění tunelu pak lze vytvářet řidší síť. Na vnitřní straně ostění jsou uzly zvoleny po 0,5 m pro tunel (včetně dělení kaloty) a po 0,3 m pro štolu, vnější strana je pak nastavena tak, aby měla stejný počet jako vnitřní. Na prvních třech liniích geologického rozhraní nad ostěním jsou uzly po 1,0 m a na zbylých po 1,5 m. Okraje modelu mají body taktěž po 1,5 m, to samé platí pro vodorovné a svislé linie směřující do ostění. Svislé linie mezi jednotlivými rozhraními byly ještě upraveny tak, aby počet uzlů na nich nebyl příliš zahuštěn. Samotná síť je v místech ostění zvolena čtvercová a v místech horninového prostředí trojúhelníková.



Obr. 36

Rozhraní modelu



Obr. 37 Síť MKP



### 8.3 Parametry hornin a zemin

Horniny jsou uvažovány jako izotropně lineárně pružné a pro plastickou část je použit Mohr-Coulombův materiálový model bez zpevnění.

Na základě geologické průzkumu jsou pro jednotlivé horniny uvažovány tyto parametry:

stratigrafický útvar		symbol horizontu	geologická charakteristika	obj.tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvár. parametry			Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001
					modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	Poissonovo číslo	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření/pevnosti $f_{ef}$ [°]	
KVARTÉR HOLOCÉN	holocénní náplavy	FL-H	hlíny a hlíny písčité, převážně tuhé (místy i měkké)	19.0	6	12	0.40	15	23	F5, F3
KVARTÉR PLEISTOCÉN	fluviální sedimenty	FL	hrubé štěrky, s písčitou příměsí, stř.ulehlé	21.0	45	85	0.34	0	36	G3
PALEOZOIKUM ordovik, souvrství dobrotivské	břidlice prachovito- jilovité	ZVT	zvětralé	23.0	25	50	0.35	20	25	R5
		NVT	navětralé	25.0	75	150	0,31	33	29	R4
		ZDR	zdravé	26.0	200	400	0,28	70	32	R3

Tab. 4 Parametry hornin

### 8.4 Primární ostění

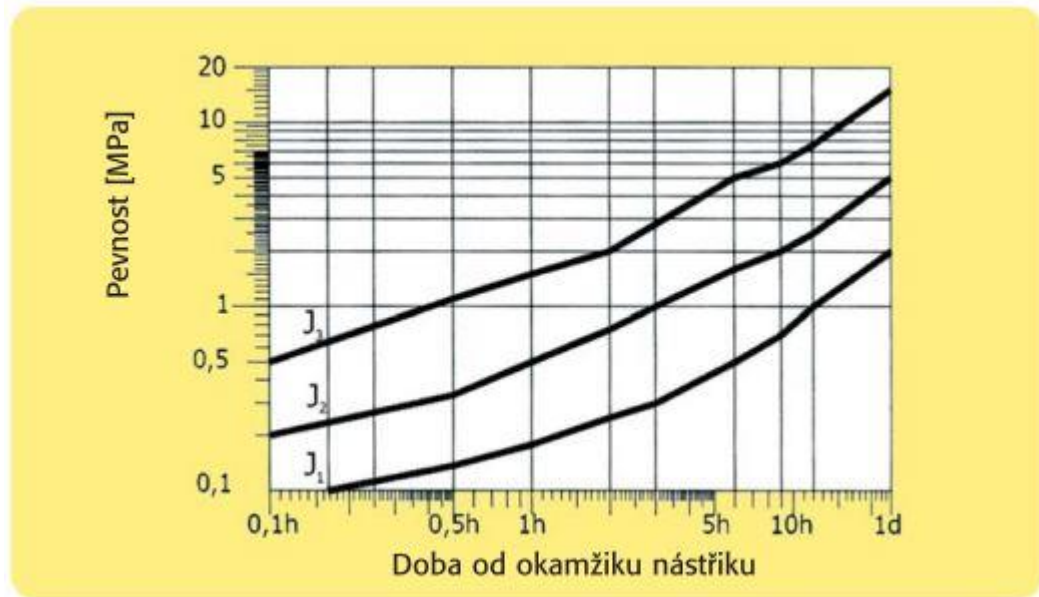
Tloušťka primárního ostění je u štoly 150 mm a u tunelu 300 mm. Primární ostění tunelu i štoly je provedeno ze stříkaného betonu SB 20 (C20/25) J2. Pro zavedení vlivu tvrdnutí betonu byly v modelu uvažovány dvě stádia pevnosti stříkaného betonu, mladý a starý (vyzrálý) SB.

Vlastnosti vyzrálého betonu odpovídají betonu C 20/25, které získáme z tabulky. Mladý beton je uvažován 24 hodin po nástřiku. Jeho vlastnosti vycházejí z Tab. 5.

Obory	Doba po nástřiku									
	6 min.	10 min.	30 min.	1 hod.	2 hod.	3 hod.	6 hod.	9 hod.	12 hod.	24 hod.
J1	0,10	0,14	0,18	0,25	0,30	0,50	0,70	1,00	2,00	
J2	0,20	0,25	0,33	0,50	0,75	1,00	1,60	2,00	2,50	5,00
J3	0,50	0,75	1,10	1,50	2,00	2,80	5,00	6,00	7,50	15,00

Tab. 5 Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory (MPa) [27]





Obr. 38 Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku [27]

$$E_{cm} = 9500 f_{cm}^{\frac{1}{3}}$$

Kde:  $E_{cm}$  střední hodnota modulu pružnosti [GPa]

$f_{cm}$  střední hodnota pevnosti v tlaku [MPa]

$$f_{cm} = f_{ck} [\text{MPa}] + 8$$

$$f_{cm} = 5 + 8 = 13 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 9500 * 13^{\frac{1}{3}} = \mathbf{22,3 \text{ GPa}}$$

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{\left(\frac{2}{3}\right)}$$

Kde:  $f_{ctk;0,05}$  5% kvantil charakteristické pevnosti v tahu [MPa]

$f_{ctm}$  střední hodnota pevnosti v tahu [MPa]

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{\left(\frac{2}{3}\right)} = 0,3 * 5^{\left(\frac{2}{3}\right)} = 0,88 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 f_{ctm} = 0,7 * 0,88 = \mathbf{0,61 \text{ MPa}}$$

Typ SB	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{cm}$ [GPa]	$\nu$ [-]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctk;0,05}$ [Mpa]
Mladý	25,0	30	0,3	20	1,5
Starý	25,0	22,3	0,2	5	0,61

Tab. 6 Parametry stříkaného betonu



## 8.5 Výpočet

Dalším krokem bylo vytvoření a definování jednotlivých fází výpočtu. Pro modely byla snaha nastavit fáze tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečnému provedení a výsledky byly co nej přesnější.

Výpočet je rozdělen do následujících fází:

### Model A (se štolou)

- Fáze 1 – primární napjatost
- Fáze 2 – výrub štolky
- Fáze 3 – primární ostění štolky
- Fáze 4 – výrub 1. kaloty
- Fáze 5 – primární ostění 1. kaloty
- Fáze 6 – výrub 2. kaloty
- Fáze 7 – primární ostění 2. kaloty
- Fáze 8 – výrub dna
- Fáze 9 – primární ostění dna

### Model B (bez štolky)

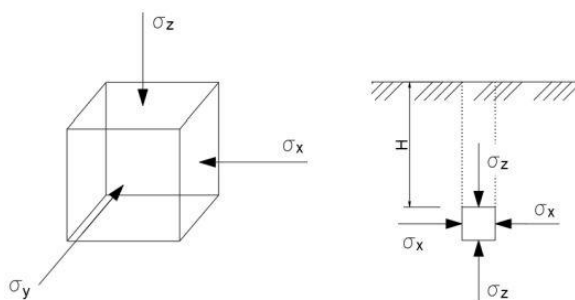
- Fáze 1 – primární napjatost
- Fáze 2 – výrub 1. kaloty
- Fáze 3 – primární ostění 1. kaloty
- Fáze 4 – výrub 2. kaloty
- Fáze 5 – primární ostění 2. kaloty
- Fáze 6 – výrub dna
- Fáze 7 – primární ostění dna

V každé fázi bylo potřeba nejprve deaktivovat/aktivovat příslušné plochy v modelu a přiřadit jim správný materiál.

### 8.5.1 Model A (se štolou)

#### 8.5.1.1 Fáze 1 – primární napjatost

V první fázi byla vypočtena primární napjatost, což je původní napjatost v horninovém masivu dosud neporušeném výrubem. Primární napjatost lze rozdělit na gravitační a tektonickou. Gravitační napjatost se určuje statickou úvahou za předpokladu, že je znám tvar daného horninového tělesa a za předpokladu, že horninový masiv se chová dokonale pružně (Hookova látka). Tato úvaha vychází z podmínky, že horninový masiv má tvar nekonečného pružného poloprostoru, který je zatížen pouze vlastní tíhou.



Obr. 39 Směry hlavních napětí – primární napjatost

Vztah pro výpočet primární napjatosti ve svislém směru:

$$\sigma_z = \gamma * h$$

- Kde:  $\sigma_z$       napětí ve svislém směru [kPa]  
 $\gamma$             objemová tíha zeminy/horniny [kN/m<sup>3</sup>]  
 $h$              hloubka od úrovně terénu [m]



Pro výpočet vodorovné složky primární napjatosti platí:

$$\sigma_x = K_0 * \sigma_z$$

Kde:  $\sigma_x$       napětí ve svislém směru [kPa]

$K_0$       součinitel bočního tlaku v klidu [-]

$\sigma_z$       napětí ve svislém směru [kPa]

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad \text{pro horniny/soudržné zeminy}$$

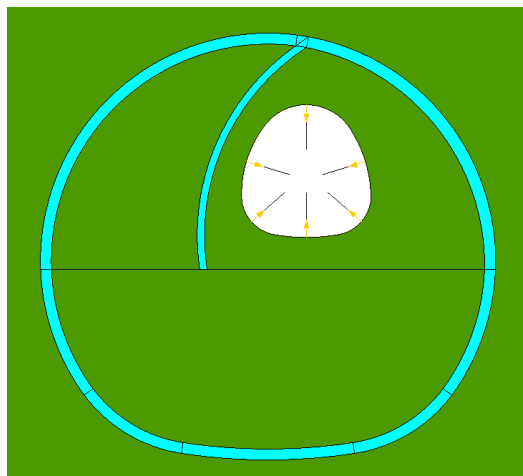
$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad \text{pro nesoudržné zeminy}$$

$\nu$       Poissonovo číslo [-]

$\varphi$       úhel vnitřního tření [°]

### 8.5.1.2 Fáze 2 – výrub štoly

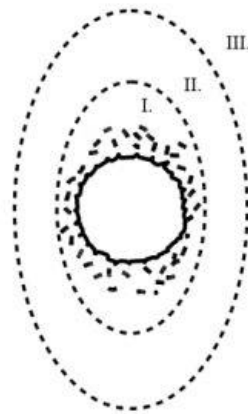
V této fázi bylo modelováno odtěžení horniny v plném výrubu štoly. Vytvořením výrubu v horninovém masivu dochází k porušení původní primární napjatosti a dochází tak k přeskupení napětí a přechodu na sekundární napjatost. Předpokládá se, že boční stěny výrubu jsou symetricky namáhány. Tento předpoklad vytváří podmínky pro vznik horninové klenby. Původní pole napětí se nemůže vytratit, pouze se transformuje - napětí „obteče“ výrub.



Obr. 40 Výrub štoly

Horninu v okolí výrubu lze rozdělit do tří pásem:

- **Pásmo snížených napětí (I. pásmo)** – hornina v okolí výrubu je rozrušená (zplastizovaná), v důsledku toho se v okolí výrubu vytváří odlehčená zóna, která má tendenci se sesouvat do výrubu tak dlouho, dokud se nevytvoří nový rovnovážný stav – tzv. přirozená horninová klenba. Rozsah odlehčené zóny závisí na mechanických vlastnostech horniny, tvaru a rozměrech výrubu a na tunelovací metodě.
- **Pásmo zvýšených napětí (II. pásmo)** – nad otvorem má tvar klenby, která se opírá o horniny ve stěnách a vyvolá koncentraci tlakových napětí (proto zde dojde k vytvoření napětí, které je vyšší než ve fázi primární napjatosti). Horninová klenba nese tíhu nadloží a tu přenáší do masivu za boční stěny a uzavírá se pod otvorem.
- **Neporušená oblast (III. pásmo)** – oblast, ve které nedochází k ovlivnění výrubem, napětí je tedy rovno primárnímu napětí



- I.- pásmo snížených napětí**  
**II. - pásmo zvýšených napětí**  
**III. - pásmo napětí neovlivněných výrubem**

*Obr. 41 Pásma napětí okolo výrubu*

Ražba průzkumné štoly a tunelu je modelována jako rovinný 2D model, což nedostatečně vystihuje prostorové chování a změny napjatosti horninového masivu probíhající během realizace podzemního díla. Horninová klenba se vytváří nejen v příčném směru (obr. X) ale také v podélném, kdy je dočasně nevystrojený výrub podporován horninovým masivem před čelbou a již vystrojenou částí výrubu. Výrub 2D modelu tedy není namáhán plným zatížením od horniny. Je tedy potřeba alespoň částečně zavést toto prostorové chování masivu do rovinného modelu.

Nejčastěji se v inženýrské praxi používá metoda (obecně nazývaná  $\lambda$  metoda či  $\beta$  metoda), která předpokládá, že primární napjatost masivu, tj. původní napětí  $\sigma$  působící před ražbou v okolí budoucího výrubu se mění postupně s časem podle vztahu  $(1-\lambda) \cdot \sigma$  (pro primární napjatost  $\lambda=1$ ). Pokud modelujeme změnu primárního napětí ve 2 fázích výpočtu (budování), tak v první fázi se zatíží nevystrojený výrub hodnotou  $(1-\lambda) \cdot \sigma$  a zbylé zatížení o velikosti  $\lambda \cdot \sigma$  se uvažuje ve druhé fázi.

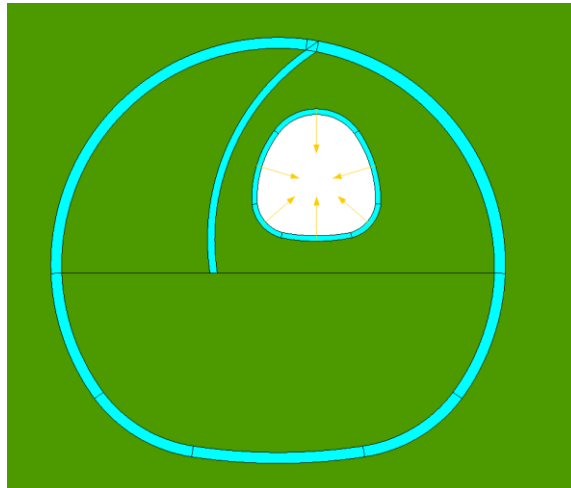
Prostorové chování horniny je v tomto případě zavedeno použitím exkavačních sil, které působí na celý výrub štoly. Poměr sil působících do výrubu se v programu stanovuje koeficientem  $\lambda$ . Pro výrub je jeho hodnota nastavena na 0,4, což odpovídá poměru rozdělení sil 40:60 (40 % zatížení je deaktivováno, 60 % jde do nevystrojeného výrubu).



### 8.5.1.3 Fáze 3 – primární ostění štoly

Po výrubu přichází na řadu instalace ostění (mladý stříkaný beton). Ten má simulovat počáteční stadia tuhnutí, kdy ještě beton nenabyl vysoké tuhosti. To dovoluje masivu se deformovat ještě předtím, než ostění dosáhne vyšší tuhosti a rovnovážného stavu s horninou (princip NRTM).

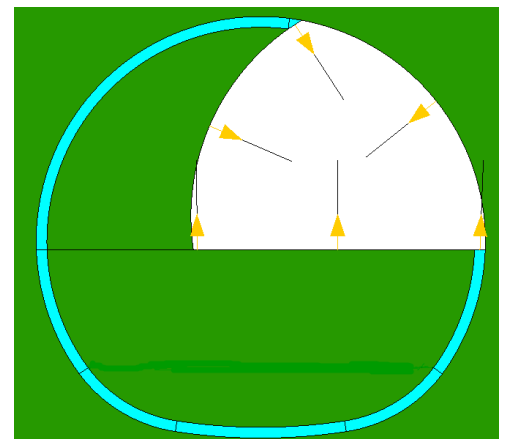
V této fázi jsou dvě zatížení. Prvním je gravitační zatížení primárního ostění tvořeného mladým SB a druhým jsou exkavační síly působící do ostění. Na ostění nyní působí zbytek zatížení z masivu, tedy 40 % zatížení. Exkavační síly se dopočítávají z předešlé fáze a proto je tedy pro zbytek zatížení použit koeficient  $\lambda = 1,0$ .



Obr. 42 Primární ostění štoly

### 8.5.1.4 Fáze 4 – výrub 1. kaloty

V této fázi byl proveden výrub první část členěné kaloty (kalota 1), včetně odstranění ostění průzkumné štoly. Na výrub opět působí exkavační síly s poměrem 40:60.

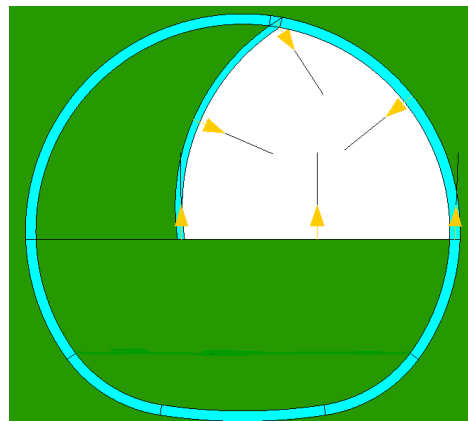


Obr. 43 Výrub 1. kaloty



#### 8.5.1.5 Fáze 5 – primární ostění 1. kaloty

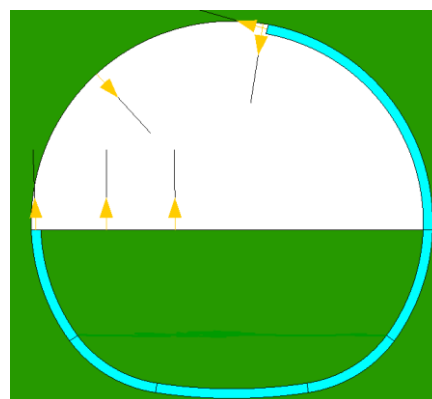
Obdobně jako u štoly, po fázi s výrubem profilu následovalo provedení primárního ostění. Princip zatížení je taktéž stejný jako ve fázi primárního ostění štoly. Primárnímu ostění je v této fázi přiřazen mladý SB.



Obr. 44 Primární ostění 1. kaloty

#### 8.5.1.6 Fáze 6 – výrub 2. kaloty

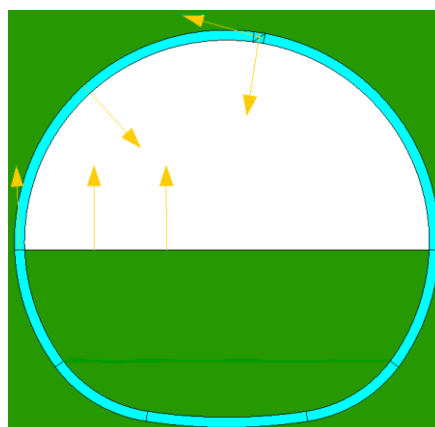
V této fázi bylo provedeno dokončení výrubu členěné kaloty a odstranění levé části primárního ostění 1. kaloty. Na výrub opět působí exkavační síly s poměrem 40:60. Zbylé části ostění 1. kaloty v této fázi je přiřazen starý SB.



Obr. 45 Výrub 2. kaloty

#### 8.5.1.7 Fáze 7 – primární ostění 2. kaloty

V této fázi došlo k aplikaci zbylé části ostění kaloty, které byl přiřazen mladý SB. Zatížení v této fázi jsou opět dvě, gravitační nové části ostění a exkavační síly do ostění.

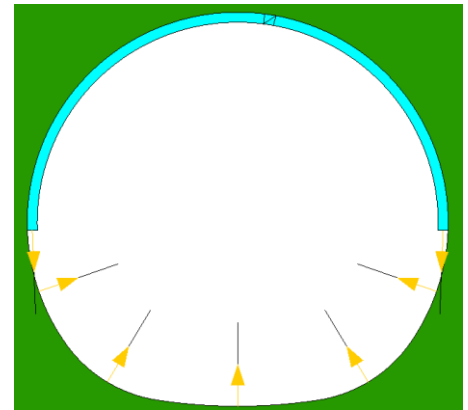


Obr. 46 Primární ostění 2. kaloty



#### 8.5.1.8 Fáze 8 – výrub dna

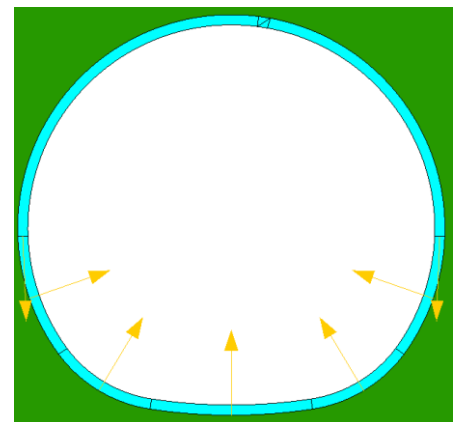
Další fází je dokončení výrub celého profilu tunelu. Na výrub opět působí exkavační síly s poměrem 40:60. Zbylé části ostění 1. kaloty je v této fázi přiřazen starý SB.



Obr. 47 Výrub dna

#### 8.5.1.9 Fáze 9 – primární ostění dna

V poslední fázi dojde k provedení poslední části (dna) celého primárního ostění tunelu. Zatížení v této fázi jsou opět dvě, gravitační nové části ostění a exkavační síly do ostění.



Obr. 48 Primární ostění dna

#### 8.5.2 Model B (bez štoly)

Druhý výpočtový model je obdobou prvního, s výjimkou vynechání fází výrubu a primárního ostění štoly. První zásah do neporušeného masivu byl proveden výrubem 1. kaloty. Jinak se princip výpočtu oproti Modelu A v zásadě nemění.

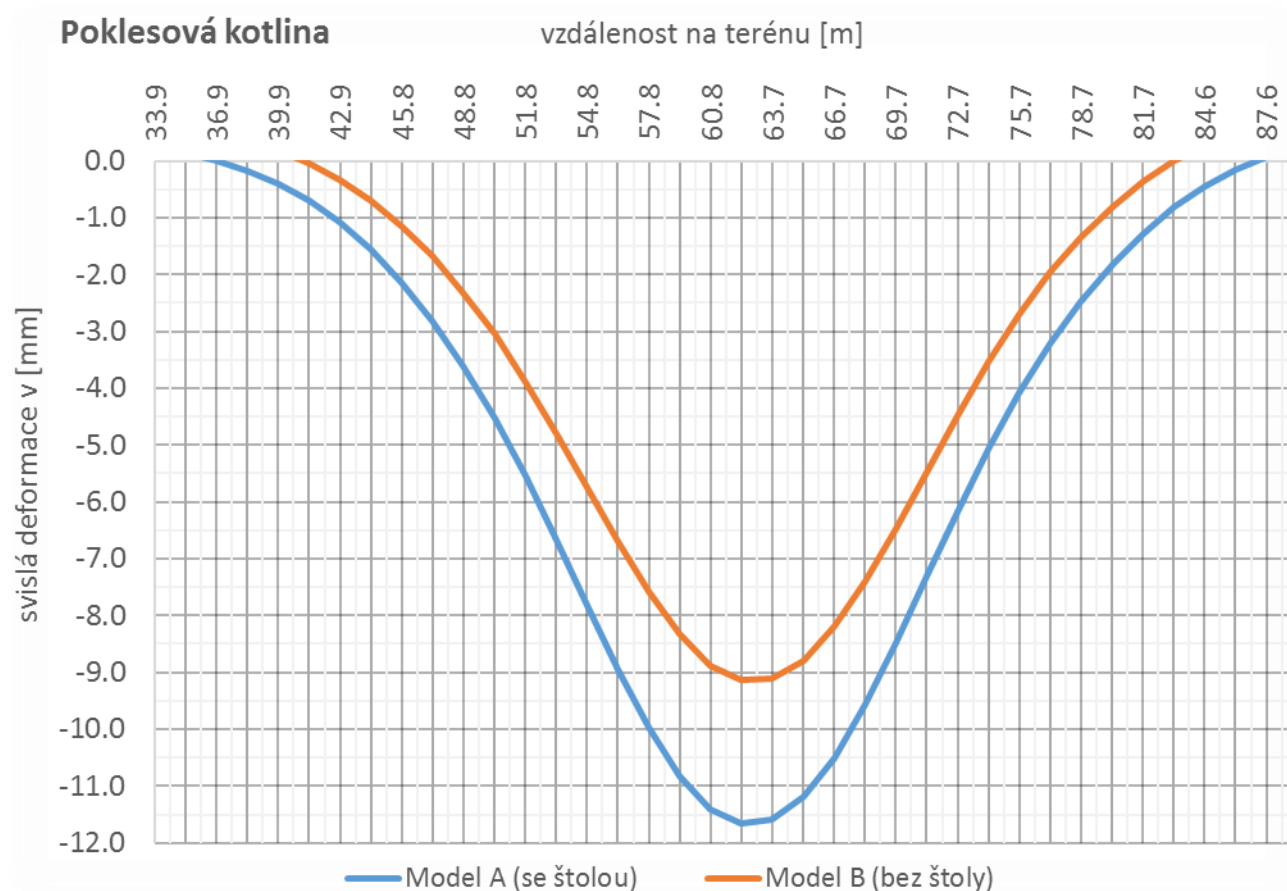


## 8.6 Porovnání modelů

V této části BP jsou porovnány výsledky obou modelů mezi sebou a je na nich ukázán vliv průzkumné štoly. Výsledky jsou rozděleny do třech částí, kterými jsou, úroveň povrchu terénu, nadloží tunelu a primárního ostění tunelu.

### 8.6.1 Úroveň povrchu terénu

Jako následek ražení vzniká na povrchu **poklesová kotlina**. Kóta na vodorovné ose s hodnotou 56,5 m odpovídá ose tunelu. Pro **model se štolou** (Model A) je max. hodnota svislé deformace 11,7 mm a pro **model bez štoly** (Model B) 9,1 mm. Rozdíl mezi oběma modely je tak 2,6 mm v neprospěch realizace průzkumné štoly.

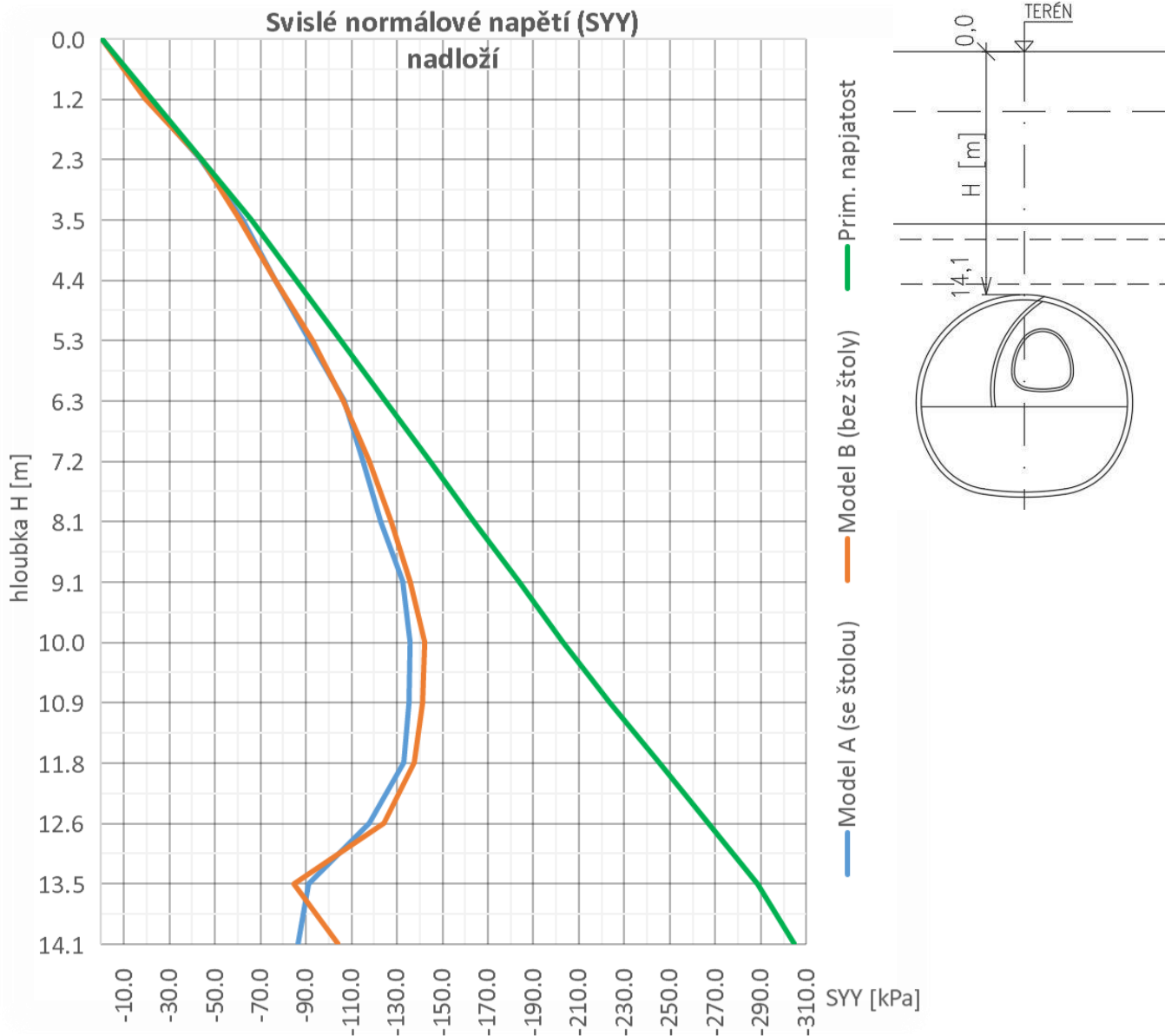


Graf 1 Poklesová kotlina



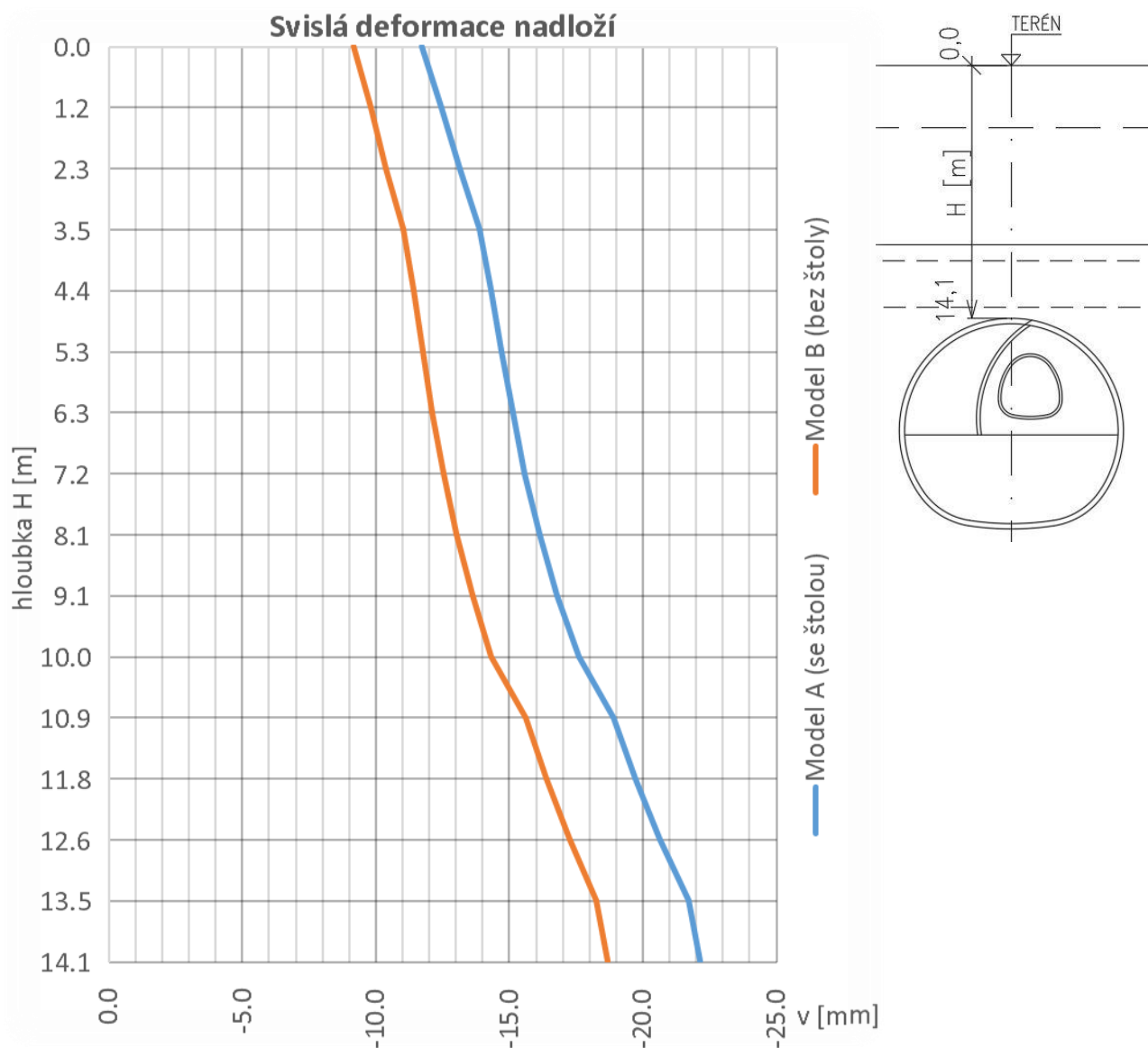
### 8.6.2 Nadloží tunelu

V nadloží tunelu jsou do grafů vykresleny dvě veličiny, svislé normálové napětí (SYY) a svislá deformace. Na svislé ose je znázorněna hloubka od úrovně terénu a na vodorovné příslušná veličina. Součástí každého grafu je legenda.



Graf 2 Svislé normálové napětí nadloží

Pro **model se štolou** je max. hodnota 136,0 kPa a **model bez štoly** 142,0 kPa, ve vzdálenosti 4,1 m nad ostěním tunelu. Průběh svislého napětí se tedy nijak zásadně pro oba modely neliší, pouze v jednotkách kPa. Na hranici ostění je pak rozdíl přibližně 20,0 kPa.



Graf 3 Svislá deformace nadloží

Na začátku grafu ( $X=0$ ) jsou zobrazeny hodnoty odpovídající maximu poklesové kotliny. Maximální deformace jsou pro **model se štolou** 22,1 mm a **model bez štoly** 18,7 mm. Průběh svislé deformace nadloží je pro oba modely prakticky totožný, pouze s odskokem hodnot **modelu se štolou** o přibližně 3,0 mm.

Větší hodnota svislé deformace nadloží ( $u$  **modelu se štolou**) přímo souvisí s menším svislým napětím. Provedením výrubu štoly umožníme proběhnutí části deformace, a s tím i spojených napjatostních změn v hornině, ještě před aplikací primárního ostění vlastního tunelu. Díky tomu také dostáváme jiné hodnoty deformace ostění a průběhy vnitřních sil, které budou na závěr zhodnoceny.



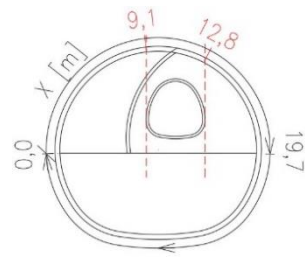
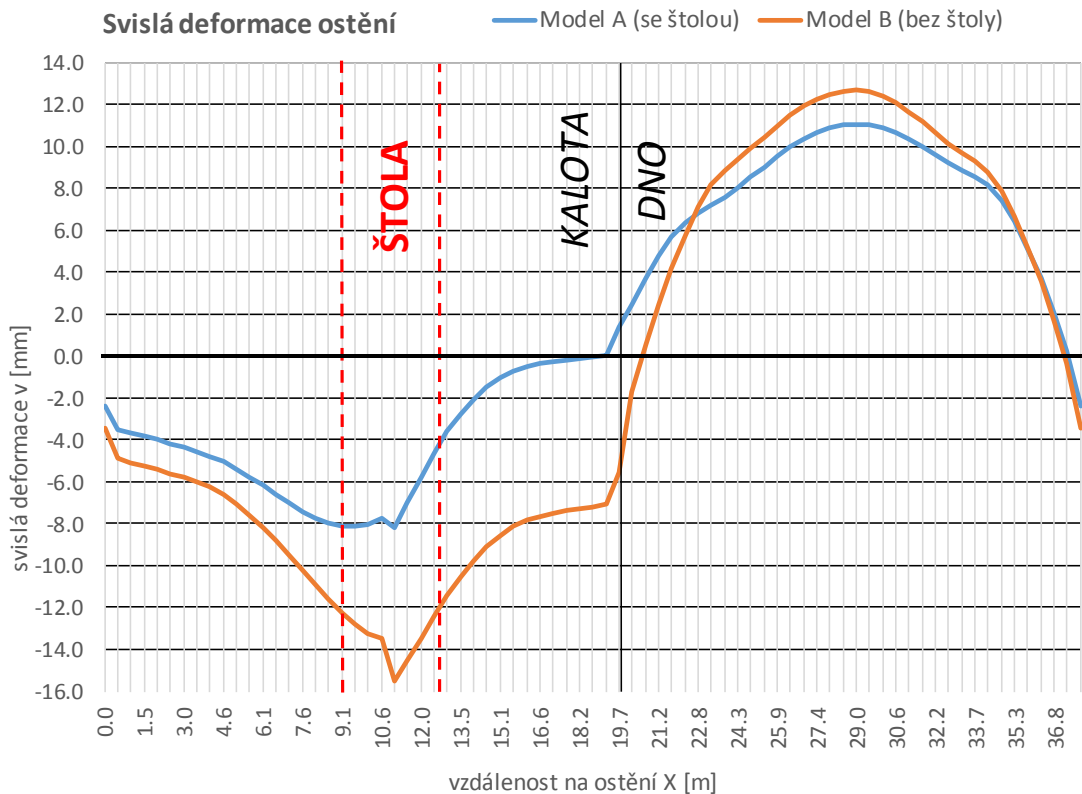
### 8.6.3 Primární ostění

Pro porovnání vlivu na primární ostění byly vybrány tyto veličiny:

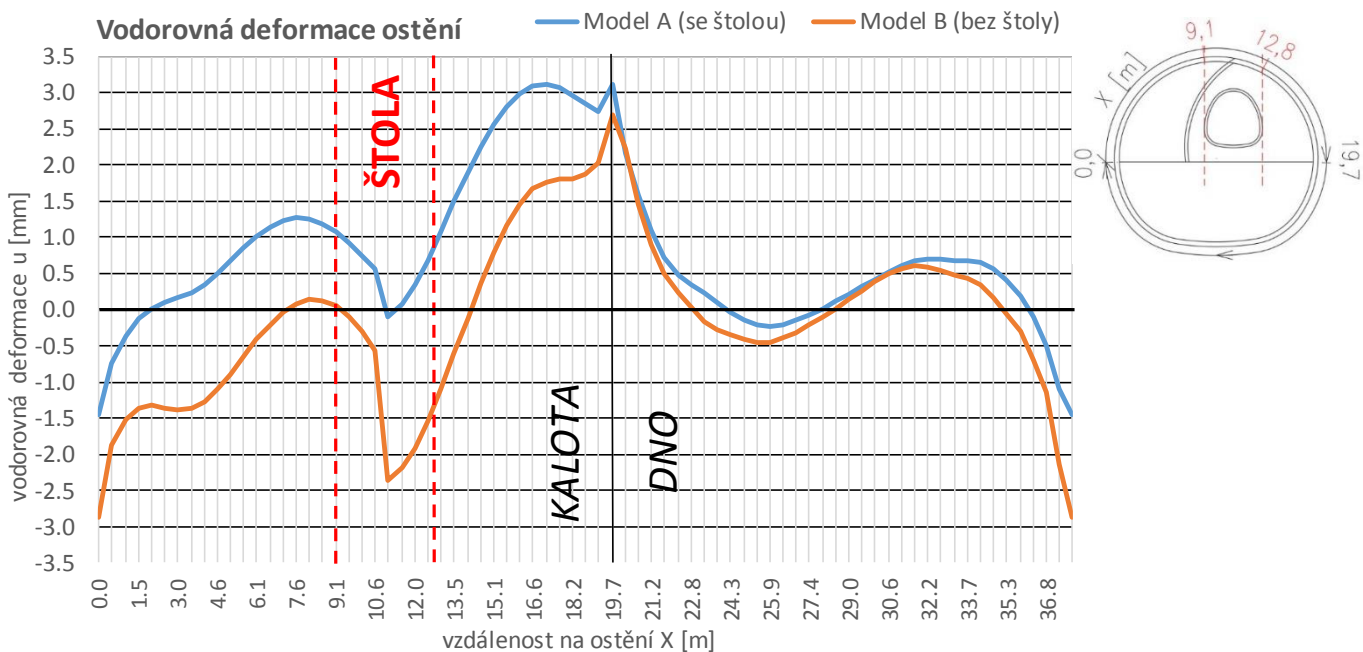
- svislá deformace
- vodorovná deformace
- ohybové momenty „M“
- normálové síly „N“

Na vodorovné ose každého grafu je hodnota délky ostění, měřená v ose (veličina X). Ta začíná na levé straně ostění, v místě horizontálního členění výrubu na kalotu a dno, a pokračuje po celém obvodu zpátky do počátečního bodu. (způsob vykreslování vnitřních sil software CESAR-LCPC).

V grafech je vyznačena červenou čárkovanou čarou oblast, v které se nachází průzkumná štola. Svislý průmět šířky ostění štoly, na délku osy ostění tunelu (veličina X), tvoří hranici této oblasti. V grafech je také vidět rozdělení na *kalotu* a *dno* černou plnou čarou. Vše je pak znázorněno v legendě, která je součástí každého grafu.



Graf 4 Svislá deformace ostění



Graf 5 Vodorovná deformace ostění

### Svislá deformace ostění:

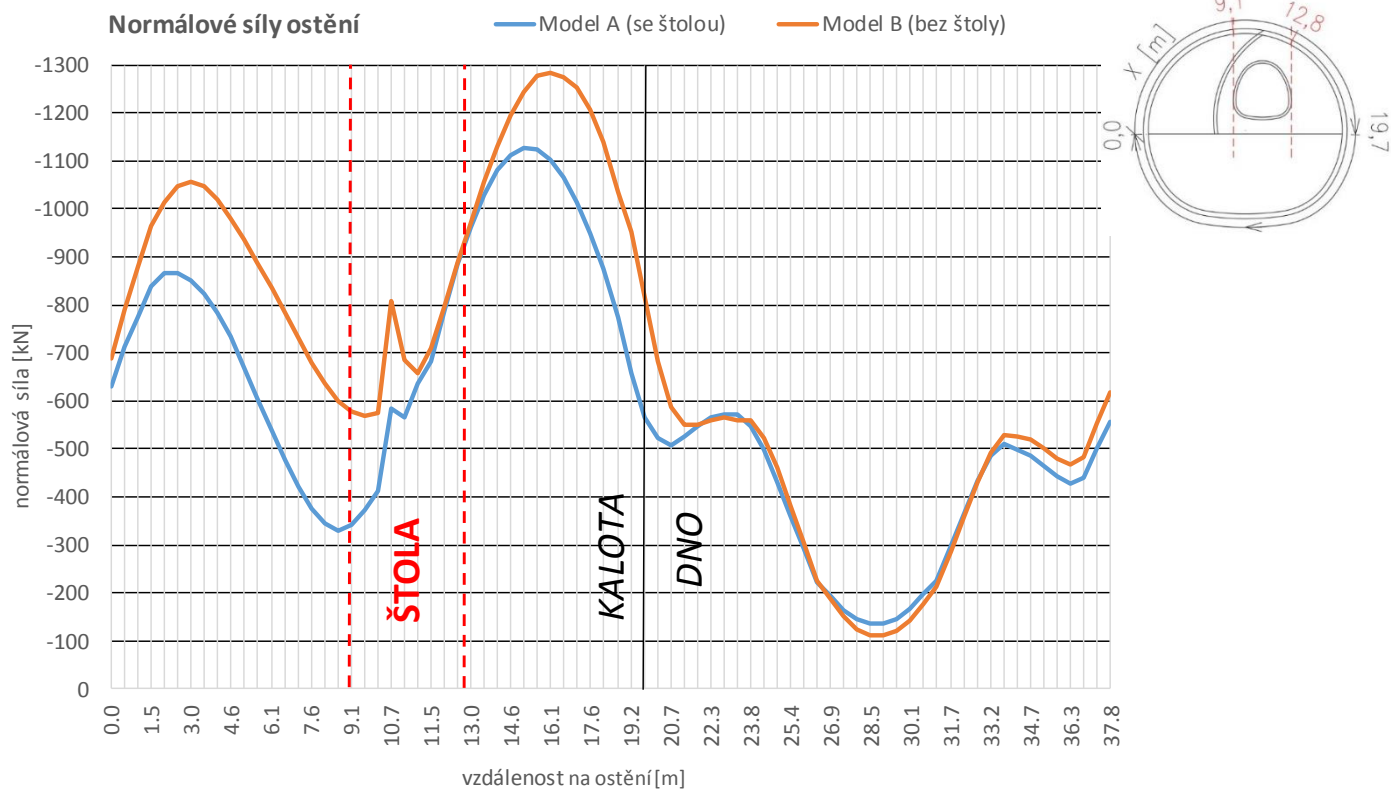
Při porovnání deformace primárního ostění jednotlivých modelů, největší vliv průzkumné štoly vykazuje svislá deformace. Přibližně do 6 metru délky ostění (což odpovídá cca 2/3 poloviny kaloty) je tvar křivek svislých deformací obou modelů téměř totožný. Poté nastává významná změna průběhů, která je nejvíce patrná v místě umístění průzkumné štoly. Zatímco deformace v **modelu se štolou** zde dosáhne hodnoty **-8,2 mm** (směrem do výrubu), v **modelu bez štoly** je téměř **dvojnásobná** a to s hodnotou **-15,5 mm**.

Skutečnost, že deformace nadloží a povrchu terénu jsou v případě modelu se štolou vyšší a u ostění naopak nižší není překvapivá. Realizací průzkumné štoly dochází k dílčímu rozvolnění horninového prostředí, které tak vede k následným vyšším konečným deformacím po dokončení tunelu. Pro primární ostění tunelu však platí, že část změny napjatosti již přenesla průzkumná štola, čímž došlo k poklesu zatížení na primární ostění tunelu – menší deformace a vnitřní síly.

Při pokračování za oblastí ovlivněné průzkumnou štolou se tvar křivek opět sjednocuje, ale zůstává zde patrný rozdíl mezi hodnotami (necelých 8 mm) který vznikl právě díky štole. V části grafu, který náleží dnu ostění je vidět, že štola na tuto část nemá výrazný vliv, téměř žádný a deformace se zde nijak zvlášť od sebe neliší.

### Vodorovná deformace ostění:

Vodorovné deformace jsou obecně velmi nízké. Nejvyšších (absolutních) hodnot zde dosahují cca kolem **3 mm**. Tvar obou křivek a i hodnoty v části dna jsou opět téměř totožné.



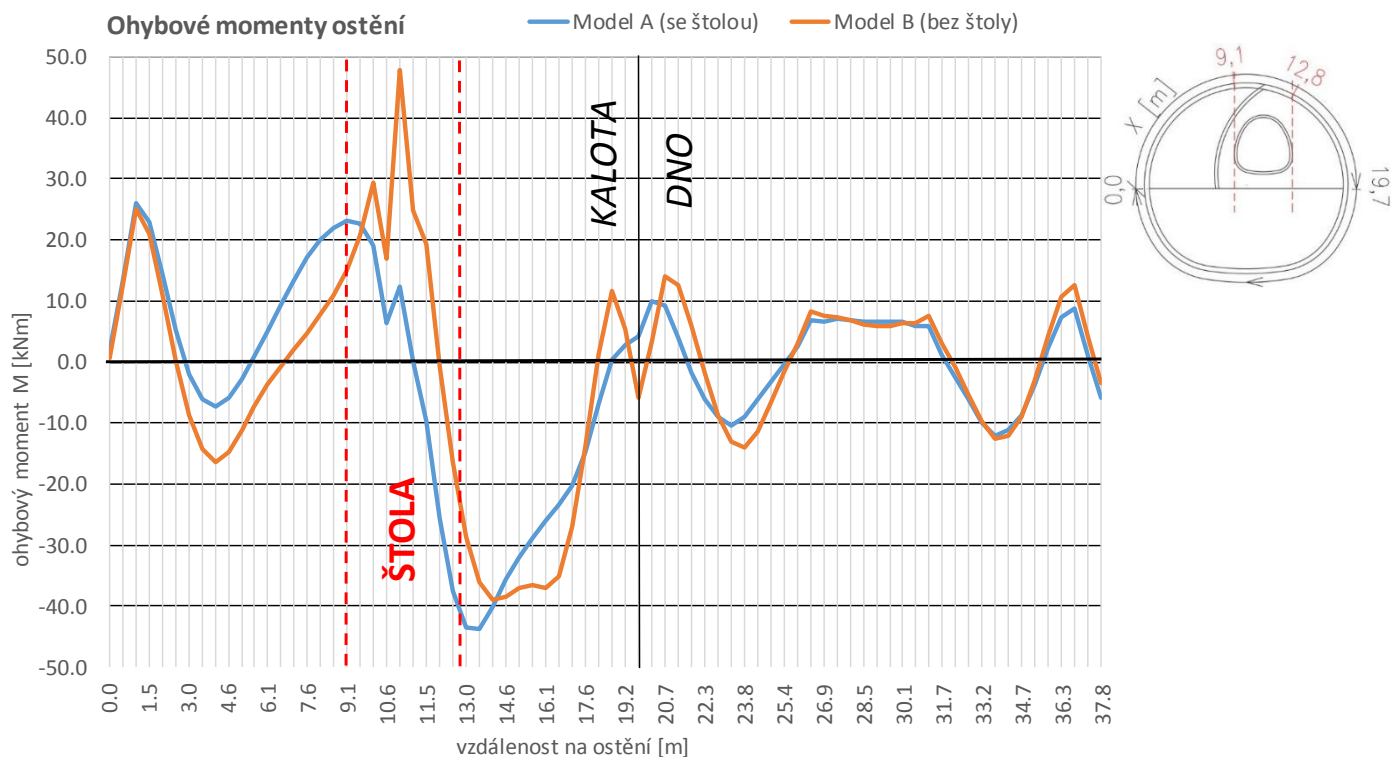
Graf 6 Normálové síly na ostění

### Normálové síly:

U **modelu se štolou** jsou zaznamenány v délce celé kaloty menší hodnoty (maximálně stejné) jako u **modelu bez štoly**. V některých místech s rozdílem hodnot až o 310 kN.

Maximální hodnoty (absolutní) u **modelu bez štoly** jsou v místě  $X=16,1$  m rovny 1285,0 kN a u **modelu se štolou** v  $X=15,1$  m rovny 1126,0 kN.

V místě kaloty má štola příznivý vliv na průběh vnitřní síly. Ve dně ostění tunelu je vliv štoly nulový.



Graf 7 Ohybové momenty na ostění

### **Ohybové momenty:**

V části ovlivněné realizací štoly je patrný velký rozdíl mezi hodnotami obou modelů. Kladné ohybové momenty *modelu se štolou* v tomto místě dosahují maximální hodnoty 23,0 kNm, zatímco u *modelu bez štoly* se hodnoty vyšplhají až na 48,0 kNm, což je více jak dvojnásobek u prvního modelu (rozdíl hodnot o 25,0 kNm). Tento velký nárůst hodnoty u *modelu bez štoly* je způsoben svislým členěním kaloty. Ve výpočtové fázi primárního ostění 1. kaloty, má ostění relativně ostrý roh, díky čemuž zde vznikne akumulace hodnot, která se projeví i ve výsledné fázi.

Za koncem oblasti štoly (cca  $X=13,0 - 13,5$  m) jsou hodnoty ohybových momentů -44,0 kNm u *modelu se štolou*, a -40,0 kNm u *modelu bez štoly*. Rozdíl mezi oběma modely se tedy pomalu snižuje až do konce kaloty. Odtud je průběh téměř souběžný.

Nespojitost v průběhu ohybových momentů v oblasti délky cca 10 m je způsobena geometrickou nespojitostí vrcholu klenby gotického profilu první kaloty, která následně ovlivňuje i další fázi výpočtu (numerická záležitost).

## 8.7 Porovnání modelu s měřením in situ

Bohužel se nepodařilo získat relevantní podklady, proto nebylo možné porovnat výsledek modelu se skutečným provedením.



## 8.8 Zhodnocení výsledků

**Model se štolou** vykazuje větší hodnoty deformací (cca o 3 mm) povrchu a nadloží oproti **modelu bez štoly** a nižší hodnoty deformací a vnitřních sil v primárním ostění tunelu. To je způsobeno provedením výrubu štoly, což umožní proběhnutí části deformací ještě před provedením primárního ostění vlastního tunelu. Z hlediska výsledků deformací primárního ostění tunelu, má realizace průzkumné štoly tedy příznivý vliv na vývoj těchto deformací. Nejpatrnější a zároveň největší příznivý vliv je v místech štoly a nejbližšího okolí. Stejně je to i u výsledků vnitřních sil. Štola opět působí příznivě a nejdůležitějším vlivem je snížení ohybových momentů v ostění v místech štoly (snížení hodnoty až o 25 kNm).

Jedinými veličinami, u kterých **model se štolou** vykazuje horší výsledky než **model bez štoly**, jsou zmíněné deformace povrchu a nadloží. Tento rozdíl není nijak extrémně vysoký a klidně ho můžeme při porovnání vlivu obou modelů zanedbat.

Důležité je podotknout, že vliv průzkumné štoly na napjatostní, deformační a silové průběhy nelze na základě této práce zobecnit. Záleží na konkrétních parametrech horninového prostředí, ve kterém realizujeme podzemní dílo. Pro horší geologické podmínky by štola mohla naopak působit nepříznivě. V tomto případě se jednalo o relativně dobré geologické podmínky a vliv realizace štoly tak působila pozitivně, ať už na výsledky deformací ostění nebo vnitřních sil.



## 9 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zaměřit se na problematiku realizace průzkumných štol, jako nejpodrobnějšího způsobu získání informací o geologických a hydrogeologických podmínkách v trase budoucích tunelů.

### 9.1 Závěr teoretické části

Z teoretické části, zaměřené na vybrané realizované průzkumné štoly v *České republice*, je patrné, že ve všech případech se zcela jednoznačně potvrdil jejich přínos.

U tunelu Mrázovka lze konstatovat, že rozhodnutí pro průzkumnou štolu pro takto náročný a komplikovaný tunel bylo správné. V porovnání s geotechnickým průzkumem z povrchu štola měla mnoho výhod. Poznatky získané ze štoly umožňovaly zpřesnění prováděcího projektu z hlediska stabilitního, ekonomického, časového a bezpečnostního. Snížily tak výskyt nepředvídaných geotechnicky komplikovaných úseků a tím uspořili čas a náklady na výstavbu. Informace ze štoly sloužily k řešení problematiky zajištění povrchové zástavby v kritických místech trasy budoucího tunelu. Z průzkumné štoly byly také na několika místech provedeny sanační injektáže horninového prostředí.

U průzkumné štoly tunelu Slivenec (SOKP 514) byl pozitivní vliv snížení hladiny podzemní vody pod dno štoly, což samo o sobě velmi příznivě ovlivnilo ražbu obou tunelů. Zkušenosti z její výstavby také potvrzují její důležitost pro získání zpřesňujících hydrogeologických parametrů a podkladů pro projekt tunelu i pro technologii výstavby. Ve štole bylo také realizováno sedm zvětšených geotechnických profilů, které sloužily jako výhybny během ražby tunelu.

Výsledky průzkumných štol tunelů Dobrovského ukázaly, že tunely budou prováděny v prostředí překonsolidovaných neogenních jíílů se specifickými vlastnostmi, které musejí být respektovány jak během návrhu, tak i provádění stavby. Příznivé bylo zjištění, že jílové prostředí má velice malou propustnost. Nejdůležitější však byly výsledky skutečných deformací, které byly větší než původně očekávané. Tyto výsledky byly následně použity pro návrh ražby vlastních tunelů.

Hlavním významem realizace průzkumné štoly Tunelového komplexu Blanka bylo, kromě ověření pevnostních a deformačních vlastností horninového prostředí, především ověření přítoků podzemní vody do podzemního díla. Důležité bylo také určení způsobu a vhodného materiálu pro sanační injektáže.

*U zahraničních průzkumných štol je zřejmý pozitivní přínos, většinou dost podobný jako u případů na našem území.*

U tunelu Višňové bylo díky předběžnému IGHP patrné, že geologické poměry v trase budoucího tunelu budou složité. Investor se tak správně rozhodl pro realizaci průzkumné štoly v celé délce tunelu. Průzkumnou štolou se zjistily o dost nepříznivější geologické poměry, oproti původně uvažovaným. Výskyt poruchových zón dosahoval až pod úroveň nivelety tunelu (do hloubky až 700 m od povrchu) a do šířky v okruhu 7 km. V rozvolněných horninách se ověřil značný výskyt trvale proudící podzemní vody do štoly. Průzkumná štola i za cenu větších nákladů a délky výstavby přinesla cenné





inženýrskogeologické a hydrogeologické poznatky. Zároveň se ražbou průzkumné štoly odstranily nejhorší tlakové projevy podzemní vody.

U Gotthardského tunelu se projektanti nejvíce obávali úseku v Piora-Mulde (geologická poruchová zóna s vysokým tlakem podzemní vody a jemnozrnnými dolomity). Proto zde byla realizována průzkumná štola. V průběhu ražby štoly vznikly nemalé potíže s tlakem podzemní vody, který dosáhl až na 15 MPa. Ze štoly vyražené razícím strojem bylo provedeno celkem 19 sondovacích vrtů, laboratorní výsledky jader těchto vrtů odhalily horniny s relativně dobrými mechanickými vlastnostmi v trase hlavního tunelu vedené cca 350 m pod průzkumnou štolou. To byl významný objev a jedno z hlavních geologických potvrzení pro pokračování projektu. Při vlastní ražbě hlavních tunelů byl tento předpoklad potvrzen. Na hlavní trase tunelu byly tak dolomity v Piora-Mulde zdravé, nepropustné a vhodné pro mechanizované tunelování.

Zvláštností Brennerského tunelu je průzkumná štola umístěná 12 m pod úrovní dvou hlavních tunelových trub a to uprostřed mezi troubami v celé délce báze tunelu. Hlavní funkcí průzkumné štoly zůstává prozkoumání podmínek, vlastností a chování horninového masivu po celé délce báze tunelu a poskytnutí tak důležitých údajů pro návrh a výstavbu. Kromě toho bude štola sloužit během výstavby vlastních tunelových trub pro dopravu rubaniny a po jejich uvedení do provozu bude odvádět průsaky z hlavních tunelů, současně bude umožňovat jejich inspekci a údržbu bez přerušování železniční dopravy. Štola by také měla sloužit k převodu elektrických a datových kabelů mezi Rakouskem a Itálií. U průzkumné štoly Brennerského tunelu tak můžeme vidět spoustu technologických přínosů.

Z těchto příkladů realizací průzkumných štol lze konstatovat, že pro 100 % využití průzkumných štol je potřeba jejich zařazení již do procesu příprav a to především časově, aby získané informace mohly být včas použity pro návrh a realizaci projektu. Rozhodnutí o realizaci průzkumné štoly by mělo být individuální na základě konkrétního projektu.

## 9.2 Závěr praktické části

Praktická část se zaměřila na porovnání deformačních, napjatostních a silových výsledků dvou 2D modelů příčného řezu tunelu. První model (model A) byl vytvořen včetně průzkumné štoly a druhý (model B) bez ní. Pro výpočet byl použit program CESAR-LCPC od francouzské firmy LCPC využívající metodu konečných prvků.

U modelu se štolou byly výsledky deformací nadloží a povrchu větší oproti modelu bez ní. Realizací průzkumné štoly došlo k dílčímu rozvolnění horninového prostředí, což vedlo k vyšším konečným hodnotám deformací po dokončení tunelu. Pro primární ostění tunelu však platí, že část změny napjatosti již přenesla průzkumná štola, čímž došlo k poklesu zatížení na primární ostění tunelu. Proto model se štolou vykazuje menší deformace a vnitřní síly primárního ostění tunelu.

Na závěr je nutné zmínit, že vliv průzkumné štoly na napjatostní, deformační a silové průběhy nelze na základě této práce zobecnit. Záleží na konkrétních parametrech horninového prostředí, ve kterém realizujeme podzemní dílo. Pro horší geologické podmínky by štola mohla naopak působit nepříznivě (významné následné plastizování horniny a s tím spojený nárůst namáhání). V tomto případě se jednalo o relativně dobré geologické podmínky, kde realizace štoly působila pozitivně, ať už na výsledky deformací nebo vnitřních sil v ostění.



## 10 Použité zdroje

### 10.1 Literatura

- [1] TP 76, část C - *Geotechnický průzkum pro navrhování a provádění tunelů pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2008. Dostupné také z: <http://www.pjpk.cz/technicke-podminky-tp/>
- [2] *Vyhláška č. 265/2012 Sb.* [online]. Zákony pro lidi.cz, b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-265>
- [3] SRB, Martin a Matouš HILAR. Průzkumné štoly využité pro výstavbu dopravních tunelů v ČR. *Tunel*. 2011, **20**(3), 79-87.
- [4] Průzkumná štola pro tunel Radlice. In: *SATRA, spol. s r. o.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.satrapro.cz/pruzkumna-stola-pro-tunel-radlice/>
- [5] BARTÁK, Jiří. *Tunel Mrázovka*. Praha: Satra, 2004. ISBN 80-239-3472-4.
- [6] SÁLUS, Vladimír a Petr VOZARIK. Průzkumná štola tunelu Slivenec - Lahovice silničního okruhu kolem Prahy, stavba 514. *Tunel*. 2005, **14**(2), 19-21.
- [7] BERNARD, Radek a Jakub BOHÁTKA. Geotechnický monitoring při stavbě SOKP 514 - tunely Slivenec. *Tunel*. 2008, **17**(4), 77-86.
- [8] PAVLÍK, Jiří, Lubomír KLÍMEK a David RUPP. Geotechnický průzkum pro nejvýznamnější stavbu na Velkém městském okruhu v Brně - tunel Dobrovského. *Tunel*. 2004, **13**(2), 2-12.
- [9] ZEMÁNEK, Igor, Jaroslav LOSSMANN a Karel SOCHA. Vliv ražeb průzkumných štol tunelu Dobrovského na objekty povrchové zástavby v Brně a aplikace observační metody. *Tunel*. 2003, **12**(3), 33-37.
- [10] BUTOVIČ, Alexandr. Průzkumná štola pro tunely Blanka. *Tunel*. 2004, **13**(1), 13-18.
- [11] BUTOVIČ, Alexandr, Boleslav BŘEZINA, Radovan CHMELÁŘ a Jaroslav NĚMEČEK. *MĚSTSKÝ OKRUH MYSLBEKOVA - PELC TYROLKA Soubor staveb MO, stavba č. 0079 Špejchar - Pelc Tyrolka: PODROBNÝ GEOTECHNICKÝ PRŮZKUM ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA*. 2006.
- [12] RŮŽIČKA, Jiří, Miroslav KOCHÁNEK a Tomáš URBÁNEK. Doplnkový geotechnický průzkum v oblasti stanice Pankrác D. *Tunel*. 2019, **28**(2), 28-39.
- [13] MATEJČEK, Antonín a Július BOHYNÍK. Význam realizácie prieskumnej štôlne pre tunel Višňové. *Tunel*. 2006, **15**(4), 12-19.
- [14] KELEŠI, Juraj. Stavebno-technologické zhodnotenie razenia prieskumnej štôlne Višňové. *Tunel*. 2003, **12**(2), 2-11.
- [15] HENKE, Andreas. *Excavation, Using TBM, of the longest rail tunnel of the world, Concepts and experiences* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.lombardi.ch/en-gb/publications/underground-structures>



- [16] EHRBAR, Heinz. *Gotthard Base Tunnel, Switzerland, Experiences with different Tunnelling methods*, [online]. 2<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Seminário “South American Tunnelling” – Sao Paolo, b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.heinzehrbartpartners.com/Publikationen/Tunnelbau-allgemein>
- [17] FABBRI, Davide. *The Gotthard Base Tunnel - Project overview* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.lombardi.ch/en-gb/publications/underground-structures>
- [18] Final finish for Gotthard Baseline excavation. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Gotthard-Baseline-Mar11-Excavation-finished.php>
- [19] Gotthard TBM safely across the Piora Mulda. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Gotthard-TBM-safely-across-the-Piora-Mulda.php>
- [20] NOVOTNÝ, Miloslav. Brennerský bázový tunel. *Tunel*. 2015, **24**(1), 78-80.
- [21] Brenner Base Tunnel – let the works begin!. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Brenner-Base-Tunnel-Apr11-Let-construction-begin.php>
- [22] Brenner Base Tunnel under Construction. *Tunel* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: [https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel\\_2012-01\\_Brenner\\_Base\\_Tunnel\\_under\\_Construction\\_1370791.html](https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_2012-01_Brenner_Base_Tunnel_under_Construction_1370791.html)
- [23] Brenner project takes a major leap forward. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Brenner-Base-Tunnel-Feb11-A-leap-forward.php>
- [24] Exploratory bore for Brenner Baseline through. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Brenner-Baseline-Nov10-Exploratory-drive-completed.php>
- [25] Brenner contract award, progress advances. *TunnelTalk.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Austria-Italy-12April2018-Brenner-Base-Tunnel.php>
- [26] KLEPSATEL, František, Pavol KUSÝ a Miloslav FRANKOVSKÝ. *Prieskumné štolne pre výstavbu dopravných tunelov, áno–či nie?*. Konferencie Geotechnické problémy liniových staveb. STU Bratislava, 1996.
- [27] AUTORSKÝ KOLEKTIV, . *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. 1. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008.



## 10.2 Seznam obrázků

- Obr. 1 Situace průzkumné štoly [5]
- Obr. 2 Vzorové příčné řezy průzkumnou štolou [5]
- Obr. 3 Schematický podélný geologický řez západním tunelem (5x převýšeno) [5]
- Obr. 4 Průzkumná štola v profilu třípruhového tunelu [7]
- Obr. 5 Umístění štol a projektovaných tunelů v zástavbě města Brna [8]
- Obr. 6 Rozmístění průzkumných děl v místech soustředěného průzkumu [8]
- Obr. 7 Podélný geologický řez v ose tunelu [8]
- Obr. 8 Geologický příčný řez Palackého ulicí [9]
- Obr. 9 Charakteristický sled vrstev v čelbě štoly v počátečním úseku ražby [8]
- Obr. 10 Průběh deformací konvergenčního profilu ve štole IIB [8]
- Obr. 11 Situace průzkumné štoly [11]
- Obr. 12 Vzorový příčný řez jednokolejným profilem průzkumné štoly [11]
- Obr. 13 Příčný řez dvoukolejným profilem [10]
- Obr. 14 Graf rozložení pevnosti a objemové hmotnosti podél trasy průzkumné štoly [10]
- Obr. 15 Celková situace stanice Pankrác D [12]
- Obr. 16 Půdorys průzkumných děl PAD4 a VO-OL [12]
- Obr. 17 Podélný řez průzkumným dílem OL1 [12]
- Obr. 18 Půdorys průzkumného díla OL1 [12]
- Obr. 19 Svislý řez průzkumnou šachtou - PAD1b [12]
- Obr. 20 Varianty návrhu trasy v etapě hodnocení EIA [13]
- Obr. 21 Geologický profil a postup realizované průzkumné štoly tunelu Višňové [14]
- Obr. 22 Závaz způsobený sufozními účinky tlakové vody v tektonické poruše ZP [14]
- Obr. 23 Schéma systému Gotthardského tunelu [17]
- Obr. 24 Situace použití několika tunelovacích metod Gotthardského tunelu [15]
- Obr. 25 Obecný podélný řez Gotthardského tunelu [18]
- Obr. 26 Situace stavebních částí Gotthardského bazového tunelu [19]
- Obr. 27 Situace Brennerského bazového tunelu [21]
- Obr. 28 Příčný řez brennerským bazovým tunelem [22]
- Obr. 29 Podélný geologický řez Brennerským masivem [23]
- Obr. 30 Segmentové ostění průzkumné štoly Aica [23]
- Obr. 31 Prorážka průzkumné štoly [24]
- Obr. 32 Postup výstavby Brennerského bazového tunelu k březnu 2018 [25]
- Obr. 33 Umístění průzkumné štoly vzhledem k ražení dvou tunelových trub [26]
- Obr. 34 Umístění průzkumné štoly vzhledem k technologii výstavby [26]
- Obr. 35 Geometrie ostění v modelu
- Obr. 36 Rozhraní modelu
- Obr. 37 Síť MKP
- Obr. 38 Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku [27]
- Obr. 39 Směry hlavních napětí – primární napjatost
- Obr. 40 Výrub štoly
- Obr. 41 Pásma napětí okolo výrubu
- Obr. 42 Primární ostění štoly
- Obr. 43 Výrub 1. kaloty
- Obr. 44 Primární ostění 1. kaloty
- Obr. 45 Výrub 2. kaloty



- Obr. 46 Primární ostění 2. kaloty
- Obr. 47 Výrub dna
- Obr. 48 Primární ostění dna

### 10.3 Seznam tabulek

- Tab. 1 Výsledky měření deformací povrchu terénu [11]
- Tab. 2 Vyhodnocení def. ostění v jednotlivých horninových typech (JTT) [11]
- Tab. 3 Vyhodnocení def. ostění v jednotlivých horninových typech (STT) [11]
- Tab. 4 Parametry hornin
- Tab. 5 Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory (MPa) [27]
- Tab. 6 Parametry stříkaného betonu

### 10.4 Seznam grafů

- Graf 1 Poklesová kotlina
- Graf 2 Svislé normálové napětí nadloží
- Graf 3 Svislá deformace nadloží
- Graf 4 Svislá deformace ostění
- Graf 5 Vodorovná deformace ostění
- Graf 6 Normálové síly na ostění
- Graf 7 Ohybové momenty na ostění

## 11 Přílohy

- <sup>1</sup>Situace
- <sup>1</sup>Podélný řez JTT
- Vzorový příčný řez primárního ostění tunelu
- Vzorový příčný řez štoly

---

<sup>1</sup> Přílohy Situace a Podélný řez JTT jsou umístěny pouze na přiloženém CD-ROMU.