



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební  
Katedra geotechniky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

***Stanovení vlivu realizace průzkumné štoly na okolní horninové prostředí a podzemní dílo***  
*Determination of the exploratory gallery impact on the surrounding rock condition  
and the underground construction*

**2020**

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

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Podzemský Jméno: Marek Osobní číslo: 458616Zadávatel: Katedra geotechnikyStudijní program: Stavební inženýrstvíStudijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Stanovení vlivu realizace průzkumné štoly na okolní horninové prostředí a podzemní díloNázev diplomové práce anglicky: Determination of the exploratory gallery impact on the surrounding rock condition and the underground construction

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce se bude zabývat problematikou dopadů realizace průzkumných štol do následujících oblastí:

1. podrobná rešerše přístupu k předmětné problematice v ČR a zahraničí
2. ekonomické zhodnocení provádění průzkumných štol ve vazbě na následnou realizaci podzemních děl
3. numerické výpočty vlivu realizace průzkumné štoly na změnu napjatosti a deformace okolního horninového prostředí v různých geologických podmínkách
4. numerické výpočty vlivu realizace průzkumné štoly na změny velikostí vnitřních sil a deformací primárního ostění navazujících podzemních děl v různých geologických podmínkách
5. verifikace vypočtených hodnot s výsledky prováděných geotechnických monitoringů již existujících staveb
6. stanovení doporučení pro návrh průzkumné štoly (velikost, tvar a umístění v budoucím profilu) ve vazbě na její dopady na okolní horninové prostředí a navazující podzemní dílo

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 průzkumných realizovaných formou průzkumné štoly
4. Výsledky geotechnických monitoringů při realizaci průzkumných štol
5. Realizační dokumentace podzemních děl, jimž předcházela ražba průzkumné štoly
6. Výsledky geotechnických monitoringů u podzemních děl, jimž předcházela ražba průzkumné štoly
7. Z. Bittnar, J. Šejnoha: Numerické metody mechaniky I. Vydavatelství ČVUT, 1992
8. Z. Bittnar, J. Šejnoha: Numerické metody mechaniky II, Vydavatelství ČVUT, 1992
9. Manuály použitých programů MKP

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Alexandr Butovič, Ph.D.Datum zadání diplomové práce: 29. 9. 2020Termín odevzdání diplomové práce: 3. 1. 2021*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 diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.*

1.10.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra geotechniky

*Stanovení vlivu realizace průzkumné štoly na okolní horninové prostředí a podzemní dílo*

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma stanovení vlivu realizace průzkumné štoly na okolní horninové prostředí a podzemní dílo 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 3. 1. 2021

Marek Podzemský



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Alexandru Butovičovi, Ph.D., za odborné rady, za pomoc, za čas strávený konzultacemi a za vedení mé diplomové práce. Mé poděkování náleží také mé rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole a po celou dobu mě v něm podporovala.



## Abstrakt

Diplomová práce se bude zabývat problematikou realizace průzkumných štol z hlediska několika úhlů pohledu. Bude provedena podrobná rešerše přístupu k problematice v ČR a zahraničí, ekonomické zhodnocení provádění průzkumné štoly ve vazbě na následnou realizaci podzemního díla. Stěžejní částí budou numerické výpočty vlivu realizace průzkumné štoly na změnu napjatosti a deformace okolního horninového prostředí a povrch terénu v různých geologických podmínkách, včetně porovnání vypočtených hodnot s reálnými měřeními.

## Klíčová slova

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

## Abstract

The diploma thesis will deal with the problematics of realization of exploratory galleries in terms of several perspectives. There will be a detailed research of the approach to the problematics in the Czech Republic and abroad, economic evaluation of the implementation of the exploratory gallery in connection with the subsequent realization of the underground structure. The main part will be numerical calculations of the influence of the exploratory gallery on the change of strain and deformation of the surrounding rock environment and the terrain surface in various geological conditions, including a comparison of the calculated values with the real measurements.

## Key words

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



## OBSAH

1	ÚVOD	10
2	PŘÍSTUP K PROBLEMATICE PRŮZKUMNÝCH ŠTOL V ČR	11
2.1	Silniční tunely	12
2.2	Železniční tunely	14
2.3	Shrnutí	16
3	PŘÍSTUP K PROBLEMATICE PRŮZKUMNÝCH ŠTOL V ZAHRANIČÍ	17
3.1	Popis jednotlivých podzemních staveb	17
3.2	Shrnutí	29
4	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRŮZKUMNÉ ŠTOLY VE VAZBĚ NA RAŽBU TUNELU	30
4.1	Realizace štoly	33
4.2	Realizace tunelu, s předem realizovanou štolou	34
4.3	Realizace tunelu, bez realizované štoly	35
4.4	Porovnání nákladů	36
5	NUMERICKÉ VÝPOČTY	37
5.1	Úvod	37
5.2	Použitý software	37
5.3	Příčný řez tunelu a štoly	37
5.4	Materiálový model zemin a hornin	39
5.5	Parametry zemin a hornin a mocnosti jejich vrstev	40
5.6	Primární ostění	43
5.7	Varianty výpočtů	45
5.8	Síť konečných prvků	47
5.9	Výpočetní fáze	48



5.10	Výsledky výpočetních modelů	51
5.10.1	Výsledky pro první typ geologie	52
5.10.1.1	Kalota	52
5.10.1.2	Celý tunel	54
5.10.2	Vývoj výsledků pro ostatní výpočetní modely	57
5.10.2.1	Tunel mělce pod terénem	57
5.10.2.2	Tunely hluboko pod terénem	58
5.10.3	Výsledky ostatních výpočetních modelů ve vazbě na modely s prvním typem geologie	60
5.11	Posouzení primárního ostění	62
5.11.1	Primární ostění – kalota	63
5.11.2	Primární ostění – tunel	65
5.11.2.1	Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	65
5.11.2.2	Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm	67
5.11.2.3	Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm	68
5.11.2.4	Ostění tloušťky 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	69
5.11.3	Zhodnocení posouzení primárního ostění	70
5.12	Závěry numerických výpočtů	71
5.12.1	Varianty výpočtů pro tunely mělce pod terénem a první geologii	71
5.12.2	Zbylé tunely mělce pod terénem	74
5.12.3	Tunely hluboko pod terénem	75
6	VERIFIKACE VYPOČTENÝCH HODNOT SKUTEČNÝCH NA VÝSLEDČÍCH GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU	76
6.1	Úvod	76
6.2	Použitý software	76
6.3	Příčný řez tunelů a štoly	76
6.4	Geologické poměry	78
6.5	Materiálový model zemin a hornin	78
6.6	Parametry zemin a hornin	79
6.7	Primární ostění	80
6.8	Monitoring – extenzometry, svislá deformace primárního ostění	80
6.9	Varianty výpočtů	82
6.10	Rozhraní prostoru výpočetního modelu	82
6.11	Síť konečných prvků	83



6.12	Výpočetní fáze	83
6.13	Výsledky výpočetních modelů	84
6.13.1.1	Extenzometrická měření	85
6.13.1.2	Svislá deformace primárního ostění	86
6.13.1.3	Kalota JTT	87
6.13.1.4	Dokončená JTT	89
6.14	Závěry numerických výpočtů	92
7	DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY	94
7.1	Inženýrskogeologický průzkum	94
7.2	Ekonomické hledisko	94
7.3	Statické hledisko	95
8	ZÁVĚR	96
8.1	Závěr teoretické části	96
8.2	Závěr praktické části	96
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ	103
	SEZNAM TABULEK	104
	SEZNAM GRAFŮ	105
	SEZNAM PŘÍLOH	105





**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

DP	diplomová práce
GTP	geotechnický průzkum
HPV	hladina podzemní vody
JTT	jižní tunelová trouba
MC	Mohr-Coulomb
MKP	metoda konečných prvků
MMC	modifikovaný Mohr-Coulomb
NRTM	nová rakouská tunelovací metoda
SB	stříkaný beton
SOKP	silniční okruh kolem Prahy
STT	severní tunelová trouba
TBM	tunnel boring machine (plnoprofilový tunelovací stroj)
TT	technologická třída



## 1 ÚVOD

Diplomová práce navazuje na moji předešlou bakalářskou práci, s tématem zaměřeným na přístup k problematice průzkumné štoly jakožto formy inženýrskogeologického průzkumu pro podzemní dílo. Ta je pravděpodobně nejdiskutovanější, co se volby inženýrskogeologického průzkumu týče. Někteří odborníci ji zavrhnou pro vysoké pořizovací náklady a časovou náročnost, jiní ji zase doporučují pro získání „přesných“ a „spolehlivých“ údajů.

Tato diplomová práce se zabývá, v teoretické části, sestavením tabulek obsahující česká i zahraniční podzemní díla, u kterých byla realizována průzkumná štola, respektive průzkumný tunel.

V praktické části je vytvořeno několik desítek výpočetních modelů tunelů metodou konečných prvků (MKP), většiny z nich je součástí i průzkumná štola. Na těchto výpočtech je ukázán vliv tvaru a umístění průzkumné štoly z hlediska vlivů deformačních, napjatostních a vnitřních sil.



## 2 PŘÍSTUP K PROBLEMATICE PRŮZKUMNÝCH ŠTOL V ČR

V této kapitole se nachází stručný soupis (ve formě tabulky) českých silničních a železničních ražených tunelů za posledních 25 let. Stručný popis každé stavby se skládá z roku zahájení a dokončení ražeb, názvu stavby, geologických podmínek, způsobu ražby, celkové délky tunelu. Dále je pak označeno, jestli byla součástí stavby tunelu průzkumná štola a pokud ano, tak v jaké délce a jaké byly důvody pro její realizaci. V tabulkách se tak nachází 13 silničních a 14 železničních tunelů.

Podkladem pro zpracování této kapitoly sloužily především odborné články z *časopisu Tunel* a seznam českých silničních a železničních tunelů dostupný na stránkách *Wikipedie*. [1] [2]

Níže jsou vypsané jednotlivé tunely a k nim přidané odkazy na zdroje, z kterých byly získány potřebné informace.

### 1) Silniční tunely:

**Hřebeč** [3], **Pisárecký** [4], **Mrázovka** [5], **Valík** [3] [6], **Panenská** [3] [7], **Libouchec** [8], **Klímkovice** [9], **Slivenec (SOKP 514)** [3] [10] [11] [12], **Komořany (SOKP 513)** [3] [12], **Prackovice** [3] [13] [14], **Královpolský (Dobrovského)** [3] [15] [16], **Radějčín** [14]  
**Tunelový komplex Blanka** [3] [17]

### 2) Železniční tunely:

**Březno** [3] [18], **Vepřek** [19], **Krasíkov** [20], **Tatenice** [20], **Malá huba** [21], **Hněvkovský I.** [21], **Hněvkovský II.** [22], **Nové spojení (Vítkovský jižní, Vítkovský severní)** [3] [23], **Zahradnický** [24], **Olbramovický** [24] [25], **Tomický I.** [24] [25], **Tomický II.** [24], **Jablůnkov II.** [3] [26], **Ejpovický** [27]



## 2.1 Silniční tunely

SILNIČNÍ TUNELY (část 1)								
ZAHÁJENÍ RAŽBY	DOKONČENÍ RAŽBY	NÁZEV TUNELU	GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	ZPŮSOB RAŽBY	CELK. DÉLKA TUNELU [m]	PRŮZ. ŠTOLA	CELK. DÉLKA PRŮZ. ŠTOL [m]	DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZKUMNÉ ŠTOLY
1995	1996	<b>Hřebeč</b>	křídové sedimenty opuk, jílovců a pískovců	NRTM	350	ANO	50	nízké nadloží, velmi komplikované geologické podmínky
1995	1997	<b>Pisárecký</b>	brněnské zvětralé granodiority	NRTM	510 (L) 500 (P)	NE	-	-
1999	2002	<b>Mrázovka</b>	prachovitopísčité břidlice, písčité břidlice, jílovité břidlice, křemence až křemité pískovce	NRTM	1300 (L) 1300 (P)	ANO	1200	podcházení tunelu pod hustou zástavbou třípatrových obytných domů při nízkém nadloží, provedení sanačních injektáží
2004	2005	<b>Valík</b>	zvětralé až silně zvětralé tektonicky rozpukané břidlice	NRTM	380 (L) 390 (P)	ANO	380	spolehlivé poznání horninového prostředí, posun rozhodovacích procesů výstavby celého dálničního obchvatu
2003	2005	<b>Panenská</b>	tektonicky porušené rulové krystalinikum prostoupené žilnými tělesy žulových porfyrů	NRTM	2060 (L) 2030 (P)	ANO	300	zpřesnění doplňkového geotechnického průzkumu připortálových úseků, celospolečenský dopad průzkumných prací na realizaci náročného úseku dálnice
2005	2006	<b>Libouchec</b>	tektonicky porušené rulové krystalinikum prostoupené žilnými tělesy žulových porfyrů	NRTM	480 (L) 388 (P)	NE	-	-
2004	2006	<b>Klimkovice</b>	proměnlivé geologické prostředí: jílovce a prachovce; pískovce a droby	NRTM	1088 (L) 1077 (P)	NE	-	-

Tab. 1 České silniční tunely (část 1)



SILNIČNÍ TUNELY (část 2)								
ZAHÁ- JENÍ RAŽBY	DOKON- ČENÍ RAŽBY	NÁZEV TUNELU	GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	ZPŮSOB RAŽBY	CELK. DÉLKA TUNELU [m]	PRŮZ. ŠTOLA	CELK. DÉLKA PRŮZ. ŠTOL [m]	DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZKUMNÉ ŠTOLY
2006	2008	<b>Slivenec (SOKP 514)</b>	ordovické a silurské horniny, tektonicky porušené a prostoupené zlomovými a vrásovými poruchami: vápnité břidlice, bazaltové tufy, břidlice, pískovce	NRTM	1630 (L) 1651 (P)	<b>ANO</b>	1313	působení štoly jako ztužující podélný nosník, snížení HPV pod dno štoly, získání zpřesňujících hydrogeologických parametrů
2006	2008	<b>Komořany (SOKP 513)</b>	ordovické horniny: nepravidelné střídání tenko-deskovitých až deskovitých křemenců a břidlic	NRTM	1937 (L) 1924 (P)	<b>ANO</b>	1937	očekávání nejobtížnějších geotechnických poměrů ve střední části (v místě umístění větrací šachty), ověření příznivých geotechnických podmínek ve zbylé části
2008	2009	<b>Prackovice</b>	České středohoří s intenzivní tektonickou činností: bazalty, trachyty, fonolity, tufy, bobtnavé jíly	NRTM	270 (L) 260 (P)	<b>ANO</b>	170	zjištění přítomnosti montmorillonitu v hornině (minerálu způsobující bobtnavost) a kvůli tomu vznikla potřeba stanovit skutečnou velikost reakce horniny na technologickou vodu a vzdušnou vlhkost
2006	2010	<b>Královopolský (Dobrovské- ho)</b>	pokryvné vrstvy sprašových hlín a navážek (s místy zvodněnými štěrkovými až písčitymi terasami), podloží teras je tvořeno neogenními jíly (brněnské tégly) o velké mocnosti (několik desítek metrů)	NRTM	1237 (S) 1258 (J)	<b>ANO</b>	2027 (3 štoly)	hustá povrchová zástavba, inženýrské sítě a dopravní komunikace, vyšetření chování terciérních jíly ve kterých byl ražen rozhodující objem tunelových trub, realizování speciálních polních geotechnických zkoušek
2009	2010	<b>Radejčín</b>	České středohoří s intenzivní tektonickou činností: bazalty, trachyty, fonolity, tufy, bobtnavé jíly	NRTM	620 (L) 600 (P)	<b>NE</b>	-	-
2007	2011	<b>Tunelový komplex Blanka</b>	ordovická Barrandienská synklinála: písčité břidlice, křemenné pískovce, jílovité břidlice	NRTM	5500 (L) 5500 (P)	<b>ANO</b>	2150	nízké nadloží, velmi komplikované geologické a hydrogeologické podmínky

Tab. 2 České silniční tunely (část 2)



## 2.2 Železniční tunely

ŽELEZNIČNÍ TUNELY (část 1)								
ZAHÁJENÍ RAŽBY	DOKONČENÍ RAŽBY	NÁZEV TUNELU	GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	ZPŮSOB RAŽBY	CELK. DÉLKA TUNELU [m]	PRŮZ. ŠTOLA	CELK. DÉLKA PRŮZ. ŠTOL [m]	DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZKUMNÉ ŠTOLY
2002	2006	Březno	neogenní teplicko-mostecko-chomutovská pánev: značně plastické jíly a jílovce, ovlivněné v oblasti portálů předchozí důlní činností	MOVP, po závalu tunelu použití NRTM	1758	ANO (mimo profil tunelu)	?	velmi obtížné geologické podmínky (nízká stabilita oblasti nevyztuženého výrubu) vyrazení štoly v průběhu přípravy projektu (rok 1996): ověření vlastností horninového masivu a jeho krátkodobých a dlouhodobých deformačních vlastností (štola jako hmotný model v měřítku 1:3)
2003	2003	Vepřek	křídovcové slíny s různým stupněm zvětrávání, v oblasti portálů výskyt	NRTM	390	NE	-	-
2003	2003	Krasíkov	masív křídových hornin (velmi nehomogenní těleso): jemnozrnné pískovce, prachovce a jílovce (s proměnlivou vápenitou příměsí), slínovce	NRTM	1098	NE	-	-
2003	2003	Tatenice (pracovní název Krasíkovský tunel II)	masív křídových hornin (velmi nehomogenní těleso): jemnozrnné pískovce, prachovce a jílovce (s proměnlivou vápenitou příměsí), slínovce	NRTM	142	NE	-	-
2003	2004	Malá Huba	zábřežské krystalinikum tvořené fylity v různých odstínech šedé až šedo zelené barvy s výraznou foliací	Systém ŽELVA, NRTM	324	NE	-	-
2004	2005	Hněvkovský I	zábřežské krystalinikum tvořené kvarcickými rulami, pararulami a	Systém ŽELVA, NRTM	180	NE	-	-
2004	2005	Hněvkovský II	zábřežské krystalinikum tvořené kvarcickými rulami, pararulami a	NRTM	462	NE	-	-
2005	2006	Nové spojení (Vítkovský jižní, Vítkovský severní)	horniny středního ordoviku: ropukané tmavošedé prachovité břidlice, místy lavicovitě vrstevnaté křemence a křemité pískovce	NRTM	2680	ANO	100	průz. štola provedená z 20 m hluboké šachty u západního portálu: zachycení předpokládaného styku odlišných geolog. formací (tzv. Pražský zlom), ten štolou zachycen nebyl

Tab. 3 České železniční tunely (část 1)



ŽELEZNIČNÍ TUNELY (část 2)								
ZAHÁJENÍ RAŽBY	DOKONČENÍ RAŽBY	NÁZEV TUNELU	GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	ZPŮSOB RAŽBY	CELK. DÉLKA TUNELU [m]	PRŮZ. ŠTOLA	CELK. DÉLKA PRŮZ. ŠTOL [m]	DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZKUMNÉ ŠTOLY
2009	2010	Zahradnický	Jihočeská vysočina: robnozrnné žilnaté granity a aplity, středně zrnité biotitické žuly	NRTM	1044	NE	-	-
2009	2010	Olbramovický	Jihočeská vysočina: intenzivně zvětralé a tektonicky postižené ruly s polohami aplitických žul a grafitických břidlic	NRTM	480	NE	-	-
2009	2010	Tomický I.	Jihočeská vysočina: zvětralé a tektonicky porušené ruly, střídání poloh granitu, biotitických rul a grafitických břidlic o různém stupni zvětrání, vysoká četnost	NRTM	324	NE	-	-
2010	2011	Tomický II.	Jihočeská vysočina: zvětralé a tektonicky porušené ruly, střídání poloh granitu, biotitických rul a grafitických břidlic o různém stupni zvětrání, vysoká četnost	NRTM	252	NE	-	-
2009	2013	Jablůnkov II. (rozšíření stávajícího tunelu na dvojkolejný)	sedimenty flyšového charakteru: střídání jílovců, prachovců, pískovců a slepenců, které jsou zastoupeny slezskou a račanskou	NRTM	612	stávající tunel	608	využití současného tunelu jako průz. štoly
2013	2017	Ejpvický	svrchní proterozoikum Barrandienu, slabě metamorfované horniny: jílovité břidlice, prachovité břidlice, prachovce a droby, prostoupené spility (vulkanity - metabazity), v krátkém úseku trasy se vyskytují sedimenty spodního karbonu plzeňské pánve charakteru pískovců až arkózových pískovců	TBM	4174 (S) 4150 (J)	NE	-	-

Tab. 4 České železniční tunely (část 2)



## 2.3 Shrnutí

Z popisu jednotlivých tunelů lze vyvodit, že časté důvody pro realizaci průzkumné štoly jsou:

- *upřesnění geotechnických podmínek*
- *nízké nadloží*
- *komplikované geologické a hydrogeologické podmínky, poznání geologických podmínek spojitě po celé délce trasy tunelu*
- *zajištění povrchové zástavby v kritických místech trasy budoucího tunelu pomocí sanačních injektáží*
- *snížení HPV, odvodnění, větrání či jako úniková cesta*
- *poznání reálného chování horniny při ražbě*
- *provedení speciálních polních zkoušek*
- *identifikování úseků zvýšených horninových tlaků, přítoků podzemní vody a místa tvoření velkých nadvýlomů*
- *využití štoly jako ztužujícího podélného svorníku (zvýšení stability čelby ražby tunelu)*
- *využití praktických zkušeností z ražby štoly při ražbě tunelu*

Kromě geotechnických důvodů existují také důvody společenské; politické jako např.:

- *posun rozhodovacích procesů výstavby celé stavby (ne jen pouze samotného tunelu)*
- *zjištění celospolečenského dopadu*
- *předstihové zahájení projektu realizací průzkumné štoly na základě jiných než stavebních předpisů*
- *předstihové vytvoření podmínek pro budoucí stavbu (zařízení staveniště, komunikace, doprava, energie, média)*





## 3 PŘÍSTUP K PROBLEMATICE PRŮZKUMNÝCH ŠTOL V ZAHRANIČÍ

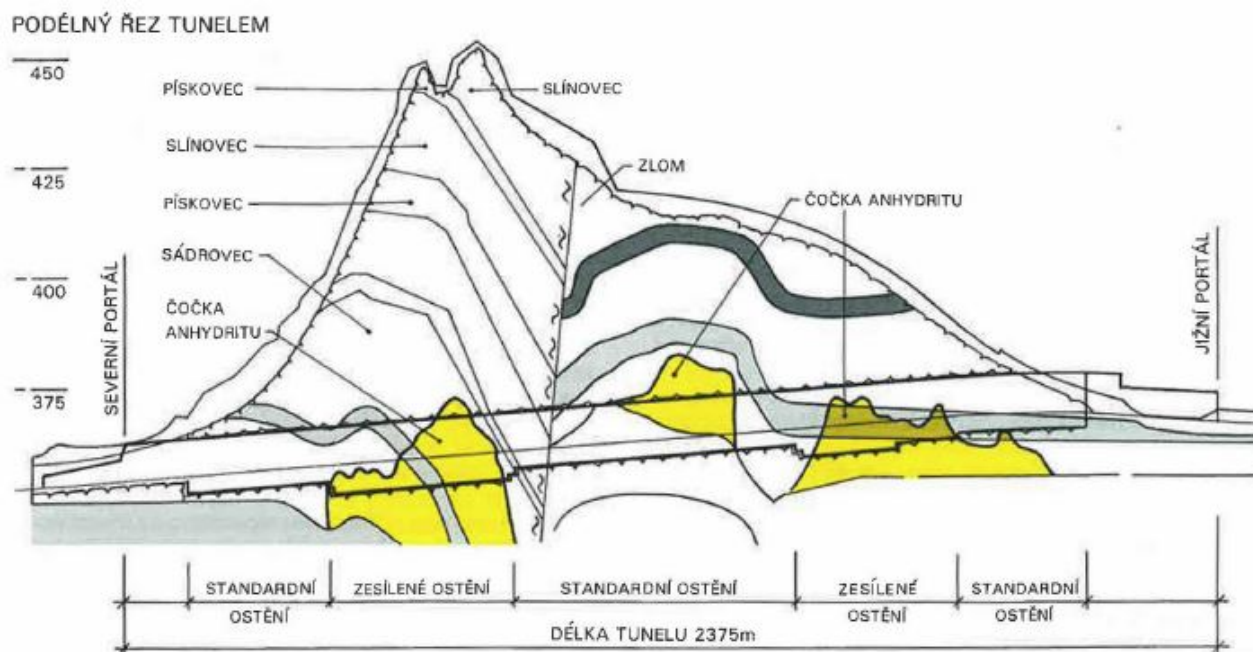
Tato kapitola se zabývá zahraničními podzemními díly, u kterých byl proveden geotechnický průzkum ve formě průzkumné štoly, respektive průzkumného tunelu. V rámci získávání jsem oslovil přes 50 národních tunelářských asociací, sdružených v rámci ITA-AITES, a přes 10 jejich sponzorů. Ale bohužel se mi nazpět dostalo jen 5 odpovědí. Z toho mi pouze zástupci Švédské tunelářské asociace poskytli potřebný dokument, který splňoval potřeby mé práce a za poslání tohoto dokumentu jim děkuji. Informace ke zbylým stavbám, nacházející se v mé práci, jsem dohledával v odborných publikacích na internetu.

Podobně jako v předchozí kapitole, zabývající se českými tunely, je zde sepsán stručný popis jednotlivých stavebních děl. Stručný popis se skládá z roku zahájení a dokončení stavby, názvu stavby a příslušné země, geologických podmínek, způsobu ražby, základních informací o tunelu a průzkumné štolě, respektive průzkumného tunelu a důvodů pro realizaci průzkumného díla. Pro každou jednotlivou stavbu je vytvořena samostatná tabulka. Dohromady se tak zde nachází 14 stavebních děl z 9 různých zemí. Ta jsou seřazena podle počátku zahájení výstavby samotného tunelu od nejstaršího po nejmladší.

### 3.1 Popis jednotlivých podzemních staveb

NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Bázový tunel Engelberg - Německo
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení stavby tunelu v roce 1995, dokončení v roce 1999
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	svrchnotriasové sedimentární komplexy hornin, zastoupeny pískovci různé zrnitosti, slínovci, vápenci a zejména sádrovci s anhydritovými čočkami, ve vstupních usecích se nachází velmi obtížné vrstvy pozemních útvarů které jsou vyluhované, vysoce vodonosné a částečně nasypané, ve vnitřní části prochází tunely skrz horninu s anhydritovými čočkami které způsobují vysokou bobtnavost při kontaktu s vlhkostí
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	nový bázový tunel je součástí rekonstrukčních opatření dálnice Heilbronn - Stuttgart, má spád 0,9 % a je tvořen dvěma třípruhovými tunelovými trubami, každá o délce 2,53 km a profilu 13,5 x 4,7 m, nový bázový tunel nahrazuje starý tunel o spádu 6 %
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	průz. štola o délce asi 1 km a průměru 4 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLY/TUNELU	zjištění více informací o různých vrstvách horninového prostředí a jejich mechanických vlastnostech

Tab. 5 Bázový tunel Engelberg [28] [29] [30] [31]



Obr. 1 Geologický profil bázového tunelu Kaponig [31]

NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Tunel Kaponig - Rakousko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení stavby tunelu v roce 1996, dokončení v roce 1999
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	krasová oblast, horninový masiv je tvořen břidlicemi a rulami, během ražby tunelu byly zastiženy horniny s horšími parametry než předpokládal geotechnický průzkum,
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	5 km dlouhý dvoukolejný železniční tunel
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	realizace mezi říjnem 1992 a prosincem 1994, délka průz. štoly 2,75 km a průměr výrubu 11,61 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	podrobné zjištění štola jako zkušební tunel jako součástí geotechnického průzkumu (stabilita čelby, doba stability nevystrojeného výrubu, deformační chování horniny atd.), zatřídění do TT, zvolení vhodné konstrukční metody

Tab. 6 Tunel Kaponig [32]

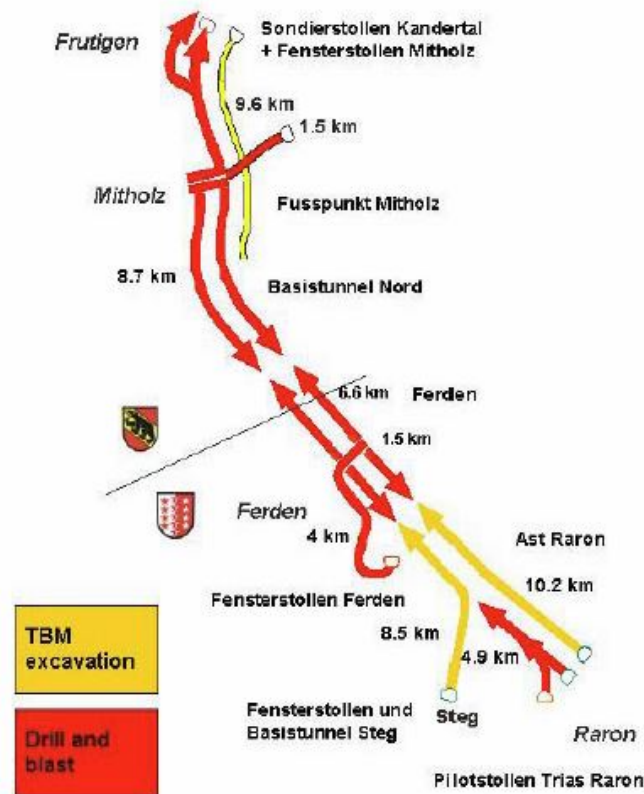


NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Tunel Branisko - Slovensko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení ražby jižní tunelové trouby v roce 1997, dokončení její ražby bylo v roce 1999 a otevření pro provoz v roce 2003, severní tunelová trouba není zatím dokončena
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	podélný geologický profil tunelu je tvořen (od západního portálu) paleogenním souvrstvím s jílovcí a pískovci, dále arkózo-pískovcovými sedimenty permského věku, největší část trasy je tvořena krystalickými horninami paleozoika, z kterých jsou zastoupeny amfibolity, pararuly, migmatity a granitoidy, poslední úsek u východního portálu je opět tvořen paleogenním souvrstvím s jílovcí a pískovci
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	2 silniční tunelové trouby, JTT o délce 4,822 km
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	realizace štoly mezi lety 1996 a 1997 v ose STT, o délce 4,84 km a profilu 10,5 až 11,5 m <sup>2</sup> , na východní straně se v délce 119 m štola razila v kruhovém profilu o průměru 3,3 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	spolehlivé poznání horninového prostředí, zjištění rozsahu jednotlivých horninových formací, ověření přítomnosti obávané mezozoické formace s přítomností krasových útvarů (vyvráceno díky realizaci průzkumné štoly), upřesnění hydrogeologických poměrů, dokud nebude realizovaná STT štola tvořit únikovou cestu v případě dopravní nehody

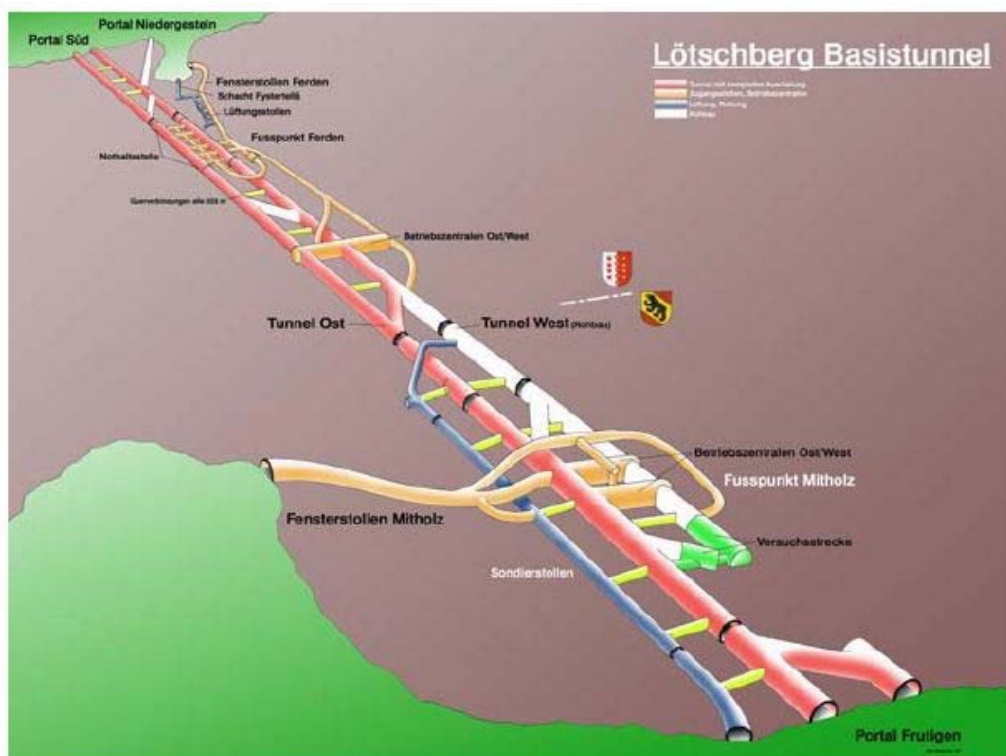
Tab. 7 Tunel Branisko [33] [34]

NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Lötschbergský bázový tunel - Švýcarsko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení ražeb v roce 1999, dokončení ražeb v roce 2005, otevření východní tunelové trouby v roce 2007, celkové dokončení je naplánováno na rok 2028
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	po délce trasy je geologie rozdělena přibližně do 3 částí: severní část tvořená slínovými vápenci, břidlicemi a pískovci, ve střední části žulami, v jižní části břidlicemi, rulami, amfibolity a sedimenty
ZPŮSOB RAŽBY	pomocí TBM z jižního portálu, pomocí NRTM (80 %) ze třech mezilehlých přístupových štol
INFORMACE O TUNELU	34,6 km dlouhý železniční bázový tunel tvořen dvěma jednokolejnými troubami, průměr průřezu TBM byl 9,43 m, ražby NRTM dosahovaly plochy výrubu od 62 do 78 m <sup>2</sup> , prozatím jsou obě tunelové trouby v provozu pouze v jižní části v délce 14 km, ve zbylém úseku je v provozu pouze západní tunelová trouba
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	9,4 km dlouhý průzkumný tunel v severní části od Frutigenu po okres Kandersteg, realizován v letech 1994 až 1996
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	spolehlivé poznání horninového prostředí

Tab. 8 Lötschbergský bázový tunel [35] [36]



Obr. 2 Hlavní konstrukční úseky Lötschberského bázového tunelu [36]

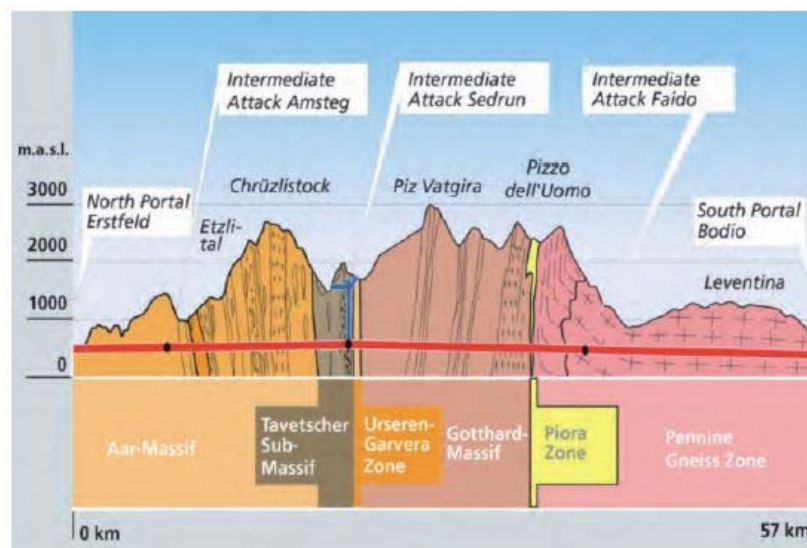


Obr. 3 Jednokolejní tunelové trouby Lötschberského bázového tunelu [36]

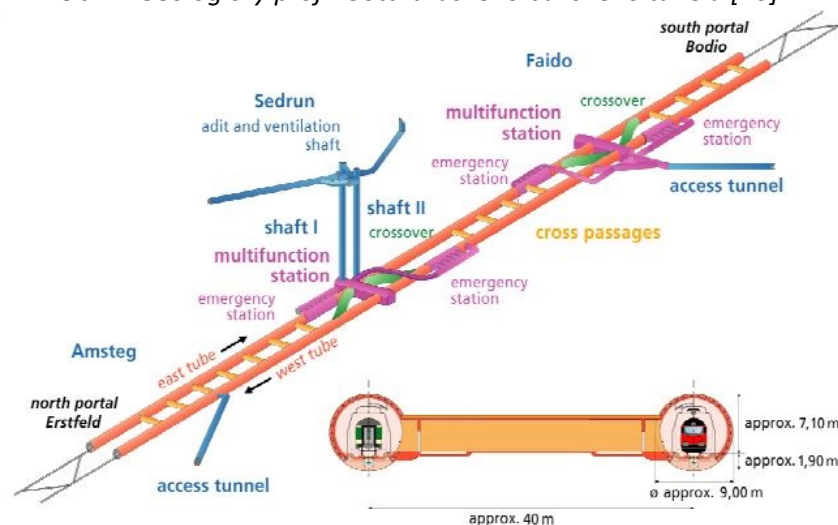


NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Gotthardský bážový tunel - Švýcarsko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení přípravných prací v roce 1996, hlavní stavební práce byly zahájeny v roce 2002, tunel byl zprovozněn v roce 2016
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	velmi vysoké nadloží (od 1000 m až po 2400 m) po délce trati, horninový masiv podél trati je většinou tvořen krystalickými skalními útvary (tvořené rulami) které na několika místech protínají sedimentační zóny, nejméně přívětivá je zóna Piora, která je tvořena relativně stabilními sulfatickými sedimentárními horninami, které jsou ale proložené kapsami nestabilních dolomitů, jejichž konzistence připomíná cukr
ZPŮSOB RAŽBY	TBM, NRTM
INFORMACE O TUNELU	57 km dlouhý železniční bážový tunel tvořen dvěma jednokolejnými troubami s proměnným průměrem profilu 8,8 až 9,5 m
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	mezi lety 1993 a 1996 byla provedena průzkumná štola v oblasti Piora, o délce 5,5 km a profilu o průměru 5 m, pomocí TBM
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLY/TUNELU	průzkum vlastností hornin v geologické poruchové zóně Piora která rozděluje Gotthardský masiv a penninickou zónu, na čelbě průzkumné štoly byly provedeny 2 průzkumné vrty a také seismická měření

Tab. 9 Gotthardský bážový tunel [37] [38] [39] [40] [41]



Obr. 4 Geologický profil Gotthardského bážového tunelu [40]

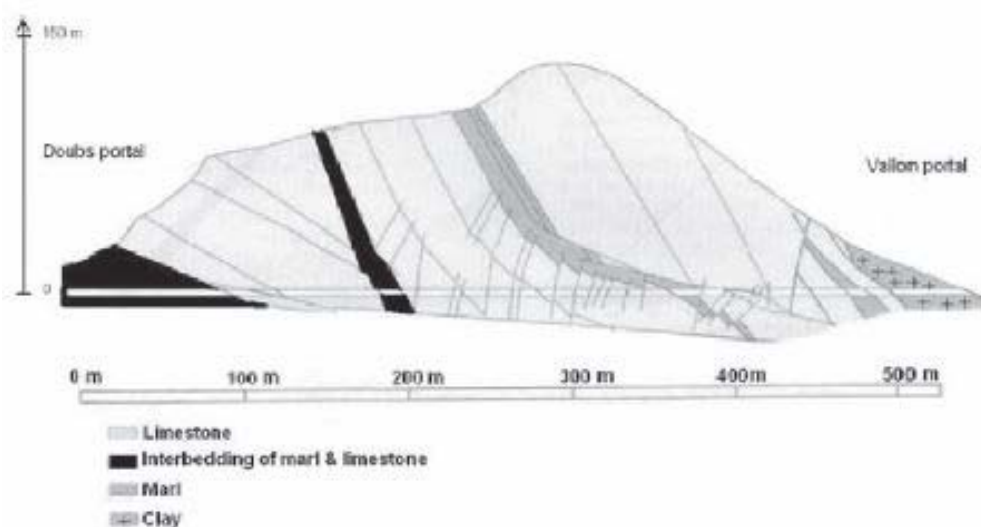


Obr. 5 Schéma systému Gotthardského tunelu [41]



NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Tunel Bois de Peu - Francie
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení stavby tunelu v roce 2005, ražby dokončeny v roce 2006, otevření provozu v roce 2011
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	výška nadloží je v rozmezí 8 až 140 m, průzkumnou štolou bylo zastiženo 18 geologických jednotek, které lze rozdělit do 4 druhů: jíly, slíny, vápence, vrstvy slínů a vápenců
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	tunel je součástí jihovýchodního bypassu města Besançon, je tvořen 2 silničními trubkami o delkách 0,52 km
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	realizace štoly v roce 1995, o profilu 3 x 3,5 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	spolehlivé poznání horninového prostředí, provedení in situ zkoušek mechaniky hornin, výsledky průzkumy vedly k zjištění, že se tunel nachází v narušené oblasti

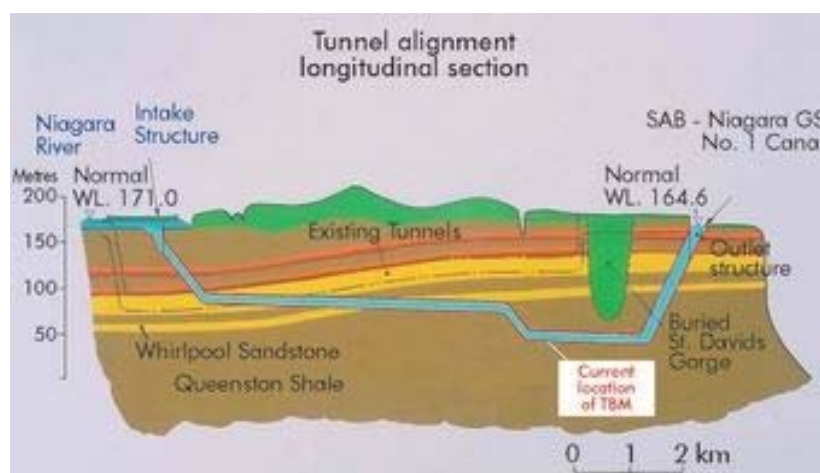
Tab. 10 Tunel Bois de Peu [42]



Obr. 6 Geologický profil tunelu Bois de Peu [42]

NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Rozvoj vodní elektrárny na řece Niagara - Kanada
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	ražba tunelu pomocí TBM započala v roce 2006, do provozu byl uveden roku 2013
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	přibližně 90 % tunelu je umístěno v souvrství Queenston, které je tvořeno kalovci (mudstone) a bahnitými kalovci
ZPŮSOB RAŽBY	TBM
INFORMACE O TUNELU	rozvoj vodní elektrárny obsahuje tunel o délce 10,2 km a profilu o průměru 14,4 m, který bude dopravovat vodu ze sacích konstrukcí před vodopády Horseshoe do systémů kanálů v elektrárně Sira Adama Becka
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	průzkumné práce probíhaly v letech 1990 až 1993, průzkum se skládal mimo jiné z 570 m dlouhé přístupové štoly (ve tvaru písmena D) a 30 m dlouhého zkušebního tunelu s profilem o průměru 12 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	spolehlivé poznání horninového prostředí, realizace tunelu pod osídleným městem Niagara Falls, zjištění chování horninového masivu na metodu ražby TBM, vybrané úseky přístupové štoly a zkušebního úseku tunelu zůstaly po určitou dobu bez podpory, aby bylo možné prozkoumat chování horniny v nevstrojeném výrubu

Tab. 11 Tunel vodní elektrárny na řece Niagara [43] [44]



Obr. 7 Geologický profil tunelu vodní elektrárny na řece Niagara [43]

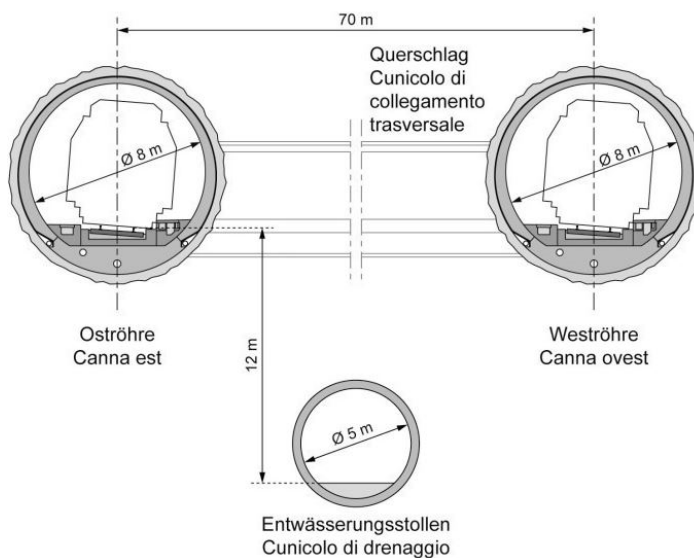
NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Hydrotechnický projekt Porce III - Kolumbie
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	realizace stavby mezi lety 2006 až 2012
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	z 80 % je povrch terénu, kde byl ražen tunel, tvořen zbytkovými půdami a koluvium (svahovými nekonsolidovanými sedimenty), horninový masiv je tvořen paleozoickými horninami, konkrétně břidlicemi různého složení a křemeno-živcovými a hlinitými rulami, mocnost nadloží se pohybuje od 30 do 550 m
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	2 tunely vodní elektrárny, horní tunel o délce 12452 m a spodní tunel o délce 274 m, dlouhý tunel byl ražen podél levého břehu řeky Porce, tunely byly realizovány hluboko v kaňonu řeky Porce, která vede skrz tropický deštný prales, majitel projektu měl velmi přísné požadavky na zachování existujícího přírodního prostředí, včetně široké škály ptáků, plazů a savců a také na obnovu prostředí ovlivněné realizací stavby
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	v roce 2004 byla vyražena 635 m dlouhá štola o profilu 2,5 x 2,5 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	zjištění podrobných geologických a geotechnických podmínek

Tab. 12 Tunel hydrotechnického projektu Porce III [45]

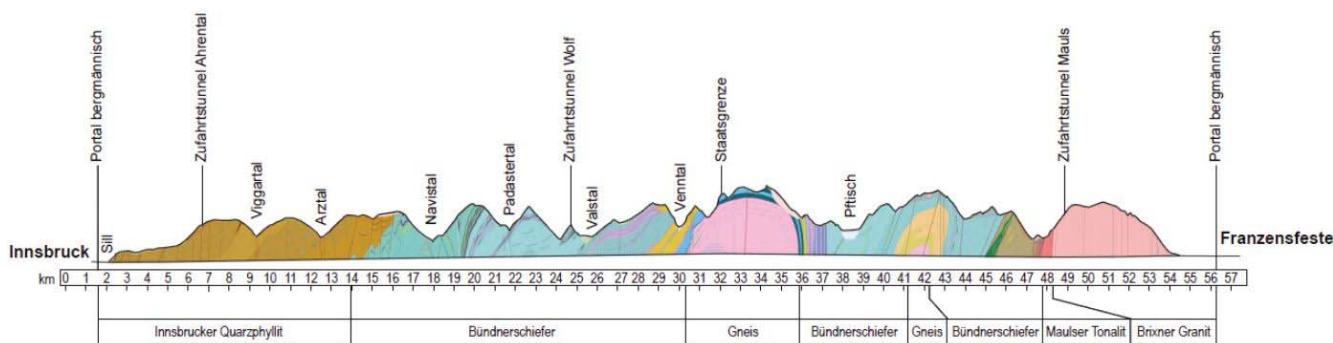


NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Brennerský bázový tunel - Rakousko, Itálie
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení stavby proběhlo v roce 2008 zahájením ražby průzkumné štoly, dokončení bázového tunelu je odhadováno na rok 2026
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	bázový tunel prochází několika horninovými zónami: křemennými fylity, bundnerskými břidlicemi, rulami, brixnerskými žulami
ZPŮSOB RAŽBY	TBM
INFORMACE O TUNELU	55 km dlouhý železniční bázový tunel tvořen dvěma jednokolejnými troubami o průměru profilu 8 m
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	průzkumná štola umístěná 12 m pod niveletou hlavních tunelových trub, s profilem o průměru 5 m, rozdělená
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	prozkoumání podmínek, vlastností a chování horninového masivu po celé délce bázového tunelu, v průběhu výstavby 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

Tab. 13 Brennerský bázový tunel [46] [47] [48]



Obr. 8 Příčný řez Brennerským bázovým tunelem [48]



Obr. 9 Podélný geologický řez Brennerským masivem [49]



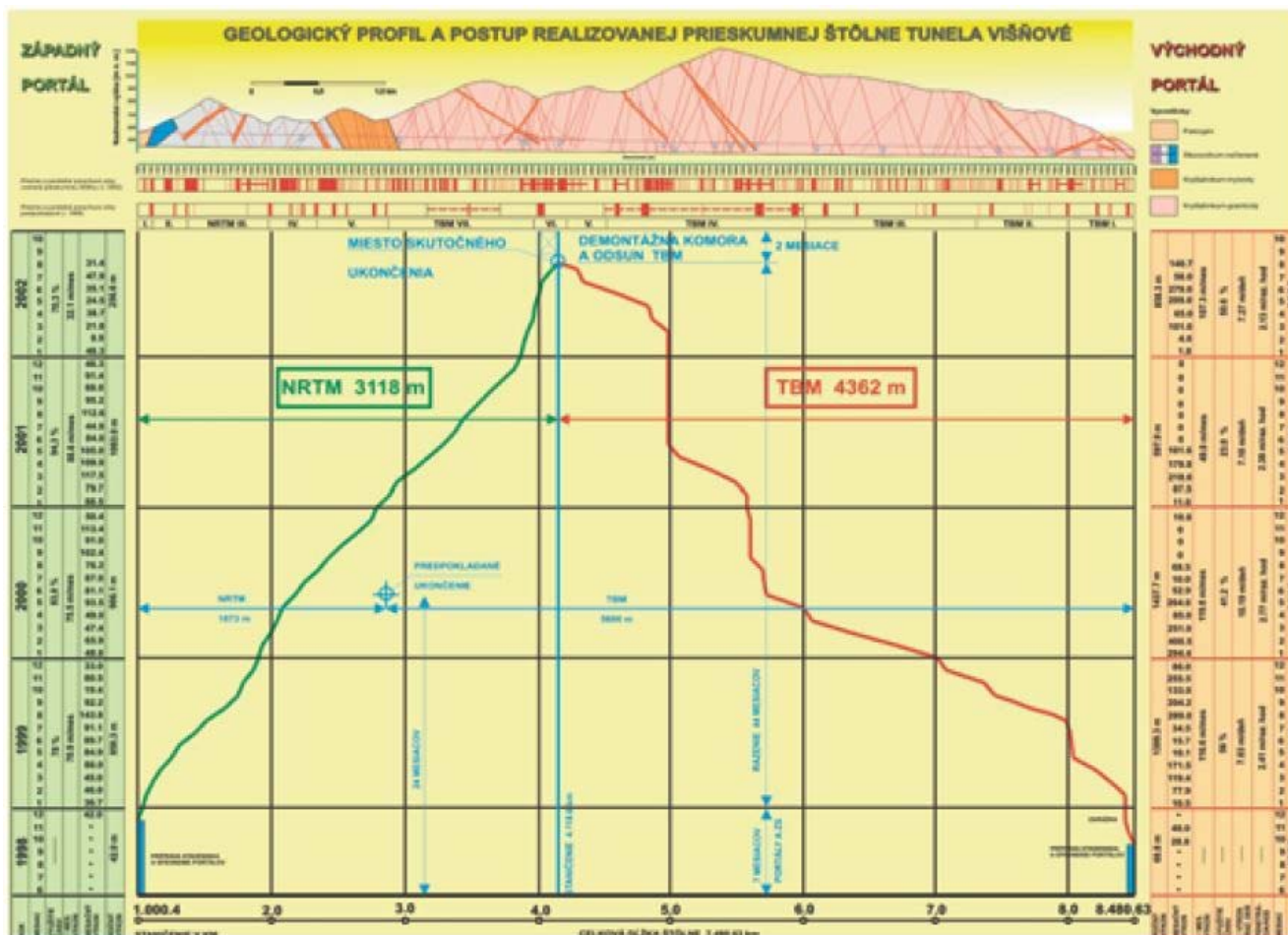


NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Tunel Ovčiarsko - Slovensko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení ražby tunelu v roce 2014, dokončení ražeb v roce 2016, předpokládané dokončení koncem roku 2020 (až po dokončení přívaděče a výjezdu Lietavská Lúčka)
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	Západní Karpaty v oblasti Strážovských vrchů, největší vliv na formování krajinného reliéfu mají hlavně tektonický vývoj území, fyzikálně-chemická degradace horninového materiálu a erozní procesy, celý komplex souvrství je budován tektonickou jednotkou mezozoika a vnitřkem karpatského paleogénu s typickým flyšovými vývojem, mezozoikum je tvořeno tektonicky porušeným souvrstvím slínů, slinitých břidlic, vápnatých jílovců, pískovců a písčitých vápenců, paleogén je reprezentován souvrstvím jílovců, pískovců a slepenců, největší mocnost nadloží dosáhla cca 156 m
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	2 silniční tunelové trouby o délkách 2,3 a 2,32 km
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	realizace štoly mezi lety 1996 a 1998, o délce 2,38 km
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	komplikované geologické podmínky, provedení in situ zkoušek mechaniky hornin, geotechnický a hydrogeologický monitoring v trase štoly, odvodňovací vrty

Tab. 14 Tunel Ovčiarsko [50] [51]

NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Tunel Višňové - Slovensko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení stavby tunelu v roce 2014, předpokládané dokončení v roce 2023
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	pohoří Malej Fatry, široká škála litologických typů hornin, z kterých jsou nejvíce zastoupeny horniny krystalinika (především žulami), směrem od západního portálu se štola nacházela okrajově v horninách centrálního karpatského paleogénu Žilinskej kotliny, po 115 metrech od západního portálu přešly horniny z paleogénu do mezozoika v kterém se horninový masiv váže na složitý tektonický vývoj, který výrazně změnil geotechnické vlastnosti hornin mezozoika ale i krystalinika, kvůli rozvolnění v období třetihor došlo k velmi nepříznivému ovlivnění hydrogeologických poměrů (přítoky podzemní vody 10 až 20, dokonce i 100 l/s)
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM a TBM
INFORMACE O TUNELU	2 silniční tunelové trouby o délkách 7,5 km
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	štola v JTT o délce 7,48 km, realizovaná mezi květnem 1998 a srpnem 2002, z východního portálu byla provedena pomocí TBM o průměru 3,5 m a ze západního portálu pomocí NRTM s příčným profilem podkovitého tvaru s plochou výrubu 11,6 m <sup>2</sup> , konečné rozdělení dvou metod bylo 3118 m pro NRTM a 4362 m pro TBM
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	nedostupnost inženýrskogeologického a hydrogeologického průzkumu na terénu povrchu kvůli hloubce trasy tunelu až 700 m, průzkumná štola po úpravě a propojovacích chodbách sloužila jako úniková štola pro severní tunel (v pořadí druhý budovaný)

Tab. 15 Tunel Višňové [52] [53]



Obr. 10 Geologický profil a postup realizované průzkumné štoly tunelu Višňové [53]

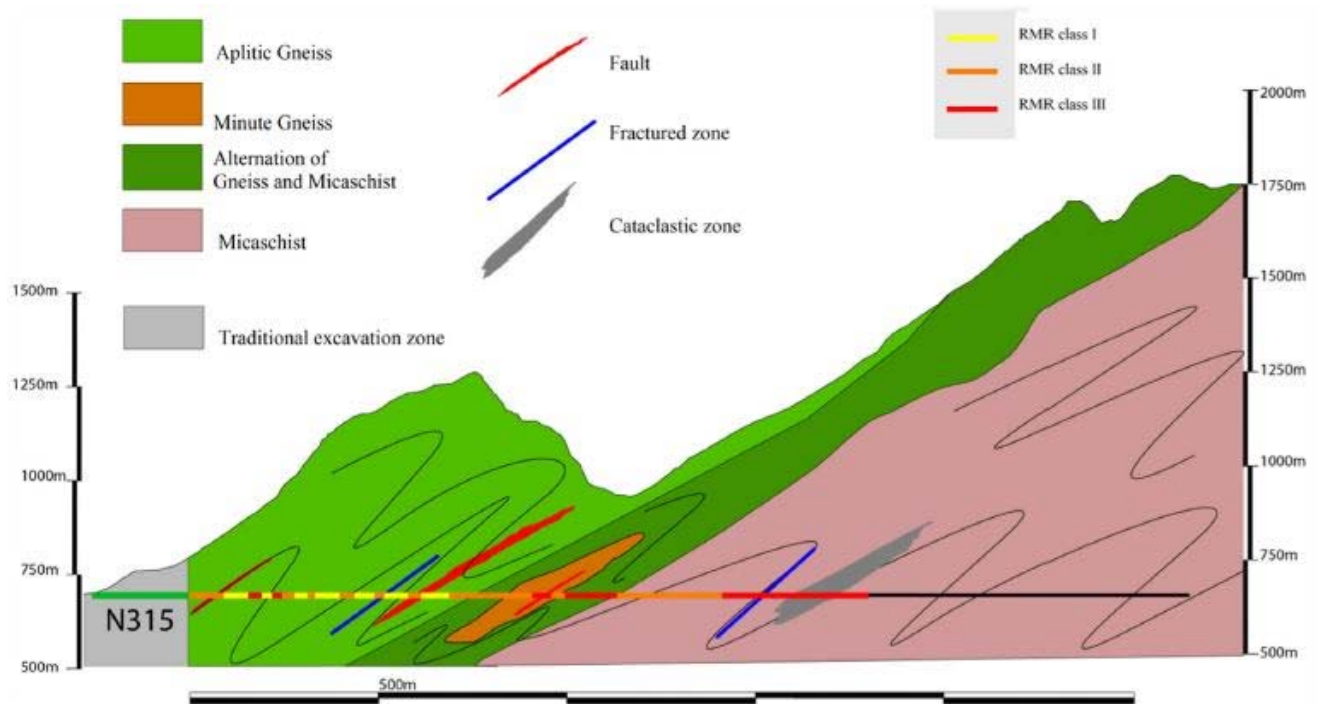
NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	Přivaděč vodní elektrárny Kühtai - Rakousko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	realizace stavby naplánovaná v rozmezí roků 2014 až 2017
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	oblast severozápadních Stubaiských Alp, nadmořská výška stavby je přes 2000 m n. m. a nejvyšší bod dosahuje i nad 3000 m n. m., z geologického hlediska stavba leží v krystalinickém komplexu tvořené především ortorulami, pararulami ale také migmatity, amfibolity a slídovými břidlicemi, morfologicky je tato oblast charakterizována ledovcovou erozí, mocnost nadloží tunelu se pohybuje od 30 do 1063 m
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM průzkumná štola, TBM vlastní tunel
INFORMACE O TUNELU	25,5 km dlouhý vodní přivaděč, s profilem o průměru 4,2 m
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	štola o délce 735 m, ražená pomocí NRTM
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLY/TUNELU	spolehlivé poznání horninového prostředí

Tab. 16 Tunel vodní elektrárny Kühtai [54]



NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	průzkumný tunel „La Maddalena“ - Itálie
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	zahájení ražby tunelu v roce 2015, předpokládané dokončení v roce 2030
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	horninový masiv v části průzkumné štoly je tvořen rulami, břidlicemi a je rozdělen do 3 litologických typů: v prvním typu je hornin. masiv tvořen převážně rulami šedé barvy, v některých zónách nazelenalých kůli přítomnosti chloritanu, ve druhém typu se střídají ruly a břidlice, ve třetím typu je hornin. masiv tvořen břidlicemi
ZPŮSOB RAŽBY	TBM
INFORMACE O TUNELU	57,5 km dlouhý železniční bázový tunel, s dvěma tunelovými troubami, mezi Svatým Jean de Maurienne ve Francii a údolím Susa v Itálii
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	průzkumný tunel o délce 7,5 km a průměru výrubu 6 m, umístěný v severní Itálii v údolí Susa
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	schromáždění dat během realizace průzkumného tunelu pro vytvoření vzahu mezi geologickými a geotechnickými parametry horninového masivu a výkony TBM

Tab. 17 Průzkumný tunel „La Maddalena“ [55]

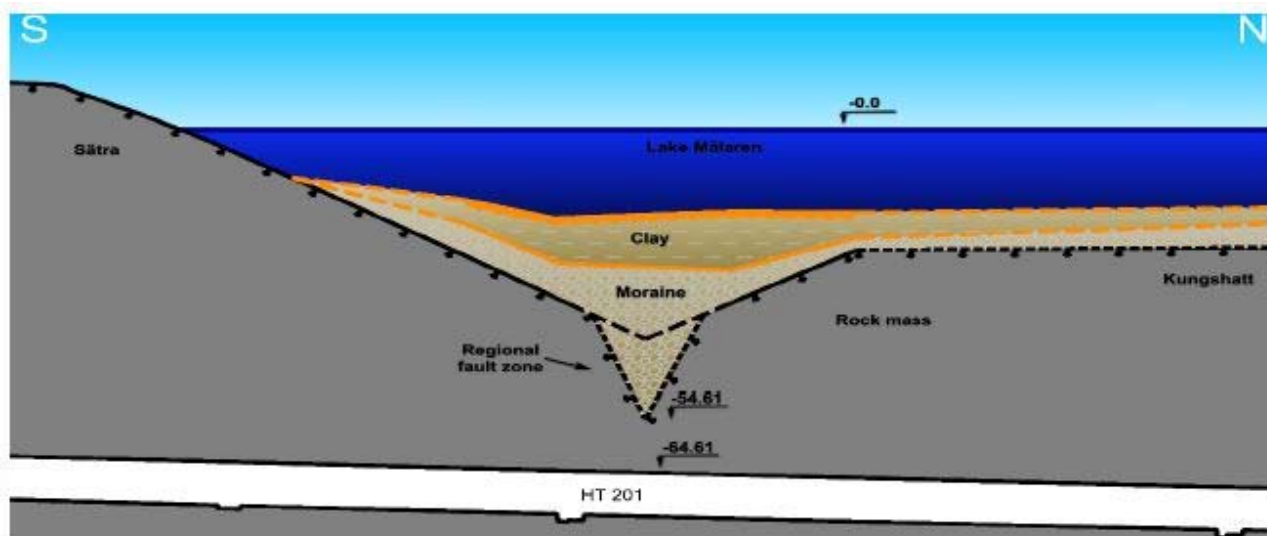


Obr. 11 Geologický profil průzkumného tunelu „La Maddalena“ [55]



NÁZEV STAVBY - ZEMĚ	E4 bypass Stockholm - Švédsko
ZAHÁJENÍ A DOKONČENÍ STAVBY	začátek v roce 2014, krátce po začátku přerušení prací a obnovení až v roce 2015, předpokládané dokončení v roce 2030
GEOLOGICKÉ PODMÍNKY	horninový masiv je tvořen rulami sedimentárního původu s pronikáním žul, ruly vyskytující se v průchodu pod jezerem jsou částečně silně zvětralé a pozměněné chloritem, jílem a grafitem, mocnost nadloží horninového masivu se pohybuje od 10 do 20 m, v nejhlubší části průchodu je horninový masiv pokryt přibližně 23 m morény, 8 m hlíny a 16 m vody
ZPŮSOB RAŽBY	NRTM
INFORMACE O TUNELU	2 silniční tunelové trouby, každá dlouhá 17 km, výrub obou tunel. trub o přibližné šířce 17 m a přibližné výšce 8,5 m
INFOR. O PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	2 štoly paralelně s budoucími tunely v oblasti průchodu pod jezerem Mälaren, o přibližné šířce výrubu 6 m
DŮVODY PRO REALIZACI PRŮZ. ŠTOLE/TUNELU	složitě geologické podmínky, průchod tunelu mezi Sättra a Kungshatt pod dnem jezera Mälaren s regionální zlomovou oblastí, poskytnutí dodatečných informací o horninovém masivu v poruchové zóně, zkrácení doby ražby samotných tunelů

Tab. 18 Tunely bypassu E4 ve Stockholmu [56]



Obr. 12 Geologický profil průchodu tunelu pod jezerem Mälaren [56]



### 3.2 Shrnutí

Důvody pro realizaci průzkumných štol, respektive průzkumných tunelů jsou obdobné jako u tunelů realizovaných v České republice a jsou to tyto:

- *upřesnění geotechnických podmínek*
- *komplikované geologické a hydrogeologické podmínky*
- *využití praktických zkušeností z ražby štoly při ražbě tunelu*
- *využití štoly k odvozu rubaniny během realizace samotných tunelů*
- *snížení HPV, odvodnění, větrání či jako únikový východ*
- *využití štoly k převodu elektrických a datových kabelů*
- *poznání reálného chování horniny při ražbě*
- *provedení speciálních polních zkoušek*
- *realizace podzemního díla pod zastavěnou oblastí*



## 4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRŮZKUMNÉ ŠTOLY VE VAZBĚ NA RAŽBU TUNELU

Tato kapitola se zabývá specifikací investičních nákladů ražby tunelu, ražby štoly a následného tunelu a z toho plynoucích dopadů. Porovnávány jsou ceny pro **3 úseky**, každý o délce 1 m. Prvním je úsek štoly, druhým je pak úsek tunelu, u kterého byla předem vyražena štola a třetím je úsek tunelu, kde k realizaci štoly nedošlo. Podkladem pro výpočet je profil štoly a tunelové trouby **Tunelového komplexu Blanka** (v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka). Tunel i štoly jsou uvažovány pro **technologickou třídu 1 (TT 1)**. Profil tunelu má teoretickou plochu výrubu **108,49 m<sup>2</sup>** a štola **10,50 m<sup>2</sup>**. Primární ostění je provedeno ze stříkaného betonu SB 25 J2, v tloušťce **150 mm u štoly** a **250 mm u tunelu**. Primární ostění štoly i tunelu je vyztuženo dvěma ocelovými Kari sítěmi **150x150x6,3 mm**. Vyztužné rámy nejsou v kalkulaci započteny. U tunelů je použito 6 **radiálních svorníků** o délce 4,0 m a pro štolu 2 **radiální svorníky** o délce 2,0 m. Samotné kalkulace jsou patrné v tabulkách *Tab. 19*, *Tab. 20*. a *Tab. 21*.

Jednotlivé práce jsou rozděleny do pěti kategorií:

- 1) *zemní práce*
- 2) *zakládání*
- 3) *konstrukce primárního ostění*
- 4) *bourací práce (pouze pro štolu)*
- 5) *ostatní*

### 1) kategorie zemních prací obsahuje:

- ražení štoly s trhavinami dovrčně v TT 1; ražení tunelu s trhavinami dovrčně v TT 1  
Měří se v jednotkách m<sup>3</sup> v rostlém (*nerozpojeném*) objemu.
- vodorovné přemístění rubaniny v podzemí přes 500 m do 1000 m  
Zahrnuje uložení do dopravní nádoby v šachtě nebo naložení na dopravní prostředek u portálu, potřebnou mechanizaci, vodorovné přemístění, dopravu, přeložení a manipulaci s rubaninou z výrubu v podzemí (*včetně rubaniny z nezáviněného nadvýrubu*) na vzdálenost od 500 m do 1000 m. Měří se v jednotkách m<sup>3</sup> v rostlém (*nerozpojeném*) objemu.
- vodorovné přemístění rubaniny na povrchu do 20 km  
Zahrnuje vodorovné přemístění, dopravu, potřebnou mechanizaci, přeložení a manipulaci s rubaninou na povrchu (*včetně rubaniny z nezáviněného nadvýrubu*) na skládku, nebo mezideponii vzdálenou do 20 km. Měří se v jednotkách m<sup>3</sup> v rostlém (*nerozpojeném*) objemu.



## 2) kategorie zakládání obsahuje:

- vrty pro svorníky a kotvy do délky 12 m  
Zahrnuje vrty v podzemí délky do 12 m. Určené pro injektáže (s výjimkou tryskové), pro odvodnění horninového masivu, pro zajištění výrubu svorníky, kotvami (mimo kotev samozávrtných) a mikropilotami. Kromě vlastního vrtu jsou zahrnuty všechny potřebné pomocné práce a konstrukce (spotřeba vody při vrtání s vodním výplachem, vyčištění vrtu stlačeným vzduchem, lešení a pracovní plošiny a podobně). Délky vrtů se měří v jednotkách metrů.
- svorníky hydraulicky upínané, do únosnosti 150 kN, délek do 2,5 m nebo do 4,0 m  
Zahrnuje kompletní dodávku svorníku včetně příslušenství. Součástí je kompletní osazení svorníku v podzemí, které zahrnuje všechny operace podle technologického předpisu výrobce nutné pro řádné osazení a aktivaci včetně všech pomocných mechanismů, přípravků a hmot (např. tlakovací čerpadla a podobně). Zahrnuje taktéž průkazné a kontrolní zkoušky svorníků. Svorníky se počítají na kusy.

## 3) kategorie konstrukce primárního ostění:

- výztuž primárního ostění štoly z ocelových Kari sítí  
Zahrnuje veškerý materiál, výrobky a polotovary, včetně mimostaveništní a vnitrostaveništní dopravy (rovněž přesuny), včetně naložení a složení, případně s uložením. Taktéž zahrnuje stříhání, řezání, ohýbání a spojování do všech požadovaných tvarů, uložení s požadovaným zajištěním polohy a krytí výztuže betonem, veškeré svary nebo jiné spoje výztuže, pomocné konstrukce a práce pro osazení a upevnění výztuže, zednické výpomoci pro montáž betonářské výztuže, úpravy výztuže pro osazení doplňkových konstrukcí, ochranu výztuže do doby jejího zabetonování, veškerá opatření pro zajištění soudržnosti výztuže a betonu, separaci výztuže a vodivé propojení výztuže, které je součástí ochrany konstrukce proti vlivům bludných proudů, které je vyvedené do měřících skříní nebo míst pro měření bludných proudů. Měří se v jednotkách tun použité výztuže.
- primární ostění štoly ze stříkaného betonu  
Zahrnuje zhotovení betonu požadované trvanlivosti a vlastností. Obsahem je dodání čerstvé betonové směsi požadované kvality, vodorovná a svislá doprava, přemístění, přeložení a manipulace s betonem, uložení betonu do požadovaného tvaru, ztížení práce, montážní plošiny nebo lešení nutné pro provedení prací, větší spotřeba směsi naložení spadu na dopravní prostředek, jeho přemístění v podzemí i na povrchu a uložení na skládku, větší spotřeba stříkaného betonu při zastříkávání ocelových příhradových oblouků sítí, hlav kotev (svorníků) a s ohledem na nutný podíl odraženého materiálu (spad), atd. Měří se v jednotkách m<sup>3</sup>.



#### 4) kategorie bouracích prací obsahuje:

- bourání konstrukcí ze železobetonu s odvozem do 20 km  
Zahrnuje rozbourání konstrukce bez ohledu na použitou technologii, veškeré pomocné konstrukce, veškerou manipulaci s vybouranou sutí a hmotami včetně uložení na skládku. Nezahrnuje poplatek za skládku, který se vykazuje v samostatné položce v kategorii *Ostatní*. Měří se v jednotkách m<sup>3</sup>.
- demontáž kovových konstrukcí s odvozem do 20 km – svorníky  
Zahrnuje rozbourání konstrukce bez ohledu na použitou technologii, veškeré pomocné konstrukce, veškerou manipulaci s vybouranou sutí a hmotami včetně uložení na skládku. Nezahrnuje poplatek za skládku, který se vykazuje v samostatné položce v kategorii *Ostatní*. Měří se v jednotkách tun použitých konstrukcí.

#### 5) kategorie ostatní obsahuje:

- poplatky za skládku – rubanina a nadvýlomy  
Zahrnuje veškeré poplatky provozovateli skládky související s uložením rubaniny (včetně *nadvýlomů*) na skládce. Měří se v jednotkách m<sup>3</sup> v rostlém (*nerozpojeném*) objemu.
- poplatky za skládku – vybourané hmoty  
Zahrnuje veškeré poplatky provozovateli skládky související s uložením vybouraných hmot (*železobetonu a kovových konstrukcí*) na skládce. Měří se v jednotkách tun vybouraných hmot.





## 4.1 Realizace štoly

Č.	Popis	MJ	Množství	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]
<b>1</b>	<b>Zemní práce</b>				<b>28 297.50</b>
1a	RAŽENÍ ŠTOLY S TRHAVINAMI DOVRCHNĚ V TECHNOLOGICKÉ TŘÍDĚ 1	m <sup>3</sup>	10.500	1 820.00	19 110.00
1b	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY V PODZEMÍ PŘES 500 m DO 1000 m	m <sup>3</sup>	10.500	370.00	3 885.00
1c	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY NA POVRCHU DO 20 km	m <sup>3</sup>	10.500	505.00	5 302.50
<b>2</b>	<b>Zakládání</b>				<b>4 292.00</b>
2a	VRTY PRO SVORNÍKY A KOTVY V PODZEMÍ DO 12 m	m	4.000	678.00	2 712.00
2b	SVORNÍKY HYDRAULICKY UPÍNANÉ V PODZEMÍ ÚNOSNOSTI DO 150 kN, DÉLKY DO 2,5 m	kus	2.000	790.00	1 580.00
<b>3</b>	<b>Konstrukce primárního ostění</b>				<b>14 057.40</b>
3a	VÝZTUŽ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ Z KARI SÍTÍ	t	0.059	28 500.00	1 675.80
3b	PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU	m <sup>3</sup>	1.680	7 370.00	12 381.60
<b>5</b>	<b>Ostatní</b>				<b>1 890.00</b>
5a	POPLATKY ZA SKLÁDKU - RUBANINA A NADVÝLOMY	m <sup>3</sup>	10.500	180.00	1 890.00
<b>Náklady soupisu celkem bez DPH</b>					<b>48 536.90</b>
<b>Náklady soupisu celkem včetně DPH (základní sazba daně 21 %)</b>					<b>58 729.65</b>

Tab. 19 Náklady na realizaci 1 m štoly



#### 4.2 Realizace tunelu, s předem realizovanou štolou

Č.	Popis	MJ	Množství	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]
<b>1</b>	<b>Zemní práce</b>				<b>246 444.85</b>
1a	RAŽENÍ TUNELU S TRHAVINAMI DOVRCHNĚ V TECHNOLOGICKÉ TŘÍDĚ 1	m <sup>3</sup>	97.990	1 640.00	160 703.60
1b	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY V PODZEMÍ PŘES 500 m DO 1000 m	m <sup>3</sup>	97.990	370.00	36 256.30
1c	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY NA POVRCHU DO 20 km	m <sup>3</sup>	97.990	505.00	49 484.95
<b>2</b>	<b>Zakládání</b>				<b>23 172.00</b>
2a	VRTY PRO SVORNÍKY A KOTVY V PODZEMÍ DO 12 m	m	24.000	678.00	16 272.00
2b	SVORNÍKY HYDRAULICKY UPÍNANÉ V PODZEMÍ ÚNOSNOSTI DO 150 kN, DÉLKY DO 4 m	kus	6.000	1 150.00	6 900.00
<b>3</b>	<b>Konstrukce primárního ostění</b>				<b>76 442.10</b>
3a	VÝZTUŽ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ Z KARI SÍTÍ	t	0.246	28 500.00	7 016.70
3b	PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ ZE STRÍKANÉHO BETONU	m <sup>3</sup>	9.420	7 370.00	69 425.40
<b>4</b>	<b>Bourací práce</b>				<b>9 959.12</b>
4a	BOURÁNÍ KONSTRUKCÍ ZE ŽELEZOBETONU S ODVOZEM DO 20 km	m <sup>3</sup>	1.680	5 910.00	9 928.80
4b	DEMONTÁŽ KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ S ODVOZEM DO 20KM - SVORNÍKY	t	0.008	3 790.00	30.32
<b>5</b>	<b>Ostatní</b>				<b>19 153.08</b>
5a	POPLATKY ZA SKLÁDKU - RUBANINA A NADVÝLOMY	m <sup>3</sup>	97.990	180.00	17 638.20
5b	POPLATKY ZA SKLÁDKU - VYBOURANÉ HMOTY	t	4.208	360.00	1 514.88
<b>Náklady soupisu celkem bez DPH</b>					<b>375 171.15</b>
<b>Náklady soupisu celkem včetně DPH (základní sazba daně 21 %)</b>					<b>453 957.09</b>

Tab. 20 Náklady na realizaci 1 m tunelu, s předem realizovanou štolou



## 4.3 Realizace tunelu, bez realizované štoly

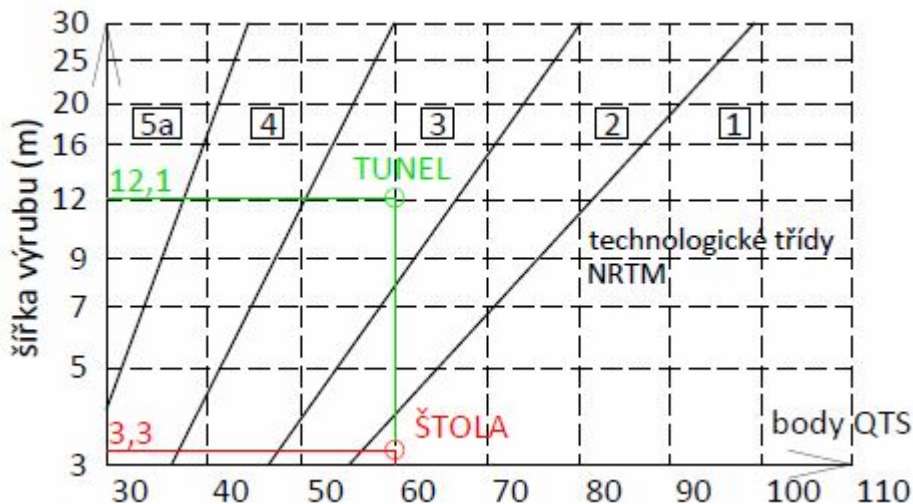
Č.	Popis	MJ	Množství	J.cena [CZK]	Cena celkem [CZK]
<b>1</b>	<b>Zemní práce</b>				<b>272 852.35</b>
1a	RAŽENÍ TUNELU S TRHAVINAMI DOVRCHNĚ V TECHNOLOGICKÉ TŘÍDĚ 1	m <sup>3</sup>	108.490	1 640.00	177 923.60
1b	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY V PODZEMÍ PŘES 500 m DO 1000 m	m <sup>3</sup>	108.490	370.00	40 141.30
1c	VODOROVNÉ PŘEMÍSTĚNÍ RUBANINY NA POVRCHU DO 20 km	m <sup>3</sup>	108.490	505.00	54 787.45
<b>2</b>	<b>Zakládání</b>				<b>23 172.00</b>
2a	VRTY PRO SVORNÍKY A KOTVY V PODZEMÍ DO 12 m	m	24.000	678.00	16 272.00
2b	SVORNÍKY HYDRAULICKY UPÍNANÉ V PODZEMÍ ÚNOSNOSTI DO 150 kN, DÉLKY DO 4 m	kus	6.000	1 150.00	6 900.00
<b>3</b>	<b>Konstrukce primárního ostění</b>				<b>76 442.10</b>
3a	VÝZTUŽ PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ Z KARI SÍTÍ	t	0.246	28 500.00	7 016.70
3b	PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU	m <sup>3</sup>	9.420	7 370.00	69 425.40
<b>5</b>	<b>Ostatní</b>				<b>19 528.20</b>
5a	POPLATKY ZA SKLÁDKU - RUBANINA A NADVÝLOMY	m <sup>3</sup>	108.490	180.00	19 528.20
<b>Náklady soupisu celkem bez DPH</b>					<b>391 994.65</b>
<b>Náklady soupisu celkem včetně DPH (základní sazba daně 21 %)</b>					<b>474 313.53</b>

Tab. 21 Náklady na realizaci 1 m tunelu, bez realizace štoly



#### 4.4 Porovnání nákladů

Nejprve je nutné zmínit, že náklady na štolu a samotný tunel jsou pro sjednocení uvažovány pro stejnou **technologickou třídu 1 (TT 1)**, i přesto, že reálně by pro stejné inženýrskogeologické podmínky byl tunel zařazen do vyšší třídy. Když je například hornině přiřazeno 60 bodů QTS, pak je uvažovaná štola, o přibližné šířce výrubu 3,3 m, zaříděna do **TT 1**. Uvažovaný tunel s šířkou výrubu 12,1 m bude pro stejný počet bodů QTS zařazen do **TT 3**. (viz **Obr. 13**). Vyšší technologická třída pak bude znamenat vyšší náklady za položku 1a ražení tunelu s trhavinami dovrchně a reálně by tedy investiční náklady za ražbu tunelu byly větší.



Obr. 13 Zařídění štoly a tunelu podle indexu QTS

Náklady na realizaci 1 m štoly vycházejí přibližně na **59 tisíc Kč (včetně DPH)**. Náklady na realizaci 1 m tunelu, pokud byla předem realizována štola, vycházejí na **454 tisíc Kč (včetně DPH)**. Pokud štola předem realizována nebyla, náklady na tunel vycházejí přibližně na **474 tisíc Kč (včetně DPH)**.

Díky předem realizované štolě vychází tedy tunel o **20 tisíc Kč (včetně DPH)** levněji oproti tunelu, kde štola nebyla realizována. Tato částka představuje **4,3 %** z nákladů na tunel bez štoly. To ale platí, pouze pokud se díváme na samotnou realizaci tunelu. V celkové sumě, **513 tisíc Kč (včetně DPH)**, je tunel se štolou dražší. Částka 20 tisíc Kč, o kterou je tunel se štolou levnější, představuje náklady za předem vyražený objem horniny. U tunelů s větším profilem bude procentuální rozdíl cen, v tomto případě pro dvoupruhový tunel 4,3 %, díky většímu objemu razících prací klesat.

Je však nutné pamatovat, že je zde uvažováno pouze s investičními náklady a nejsou započteny náklady vedlejší (*energie, zařízení staveniště, projektová dokumentace, zapůjčení strojní techniky atd.*). Ve finále tak náklady na samotnou štolu budou ještě větší.



## 5 NUMERICKÉ VÝPOČTY

### 5.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá výpočetními modely pomocí metody konečných prvků (MKP), ve kterých jsou modelována ražení štol a tunelů. Na výsledcích je poté ukázán vliv průzkumné štoly na změny velikostí vnitřních sil, deformací primárního ostění tunelu a deformací povrchu terénu.

Základem každého výpočetního modelu je horizontálně členěný profil dvoupruhového tunelu na kalotu, opěří a dno. Do kaloty tunelu jsou navrženy 4 varianty tvaru a umístění štoly, pátá varianta je pak samotný tunel bez štoly. Všechny varianty modelů jsou vytvořeny ve dvou verzích, které se liší hloubkou díla pod povrchem (vliv geostatické napjatosti). Ve výpočetních modelech jsou prověřovány 4 typy geologií. Celkově tak vzniká 40 různých modelů, složených z kombinace varianty štoly (případně bez štoly), typu geologie a hloubky tunelu.

### 5.2 Použitý software

Pro výpočetní modely byl použit program *GEO5 – MKP* od české společnosti Fine spol. s r.o. využívající metodu konečných prvků. Pro posouzení primárního ostění je od stejné společnosti použit výpočetní program *FIN EC – Beton*.

### 5.3 Příčný řez tunelu a štol

Profil tunelu do výpočetních modelů vychází z tvaru dvoupruhové tunelové trouby **Tunelového komplexu Blanka** (v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka). Profil tunelu je horizontálně členěn na tři části: na kalotu, opěří a dno. Jeho teoretická plocha výrubu je **108,49 m<sup>2</sup>**. Na Obr. 14 je okótovaný příčný řez tunelu, včetně popisu dílčí i celkové plochy výrubu.

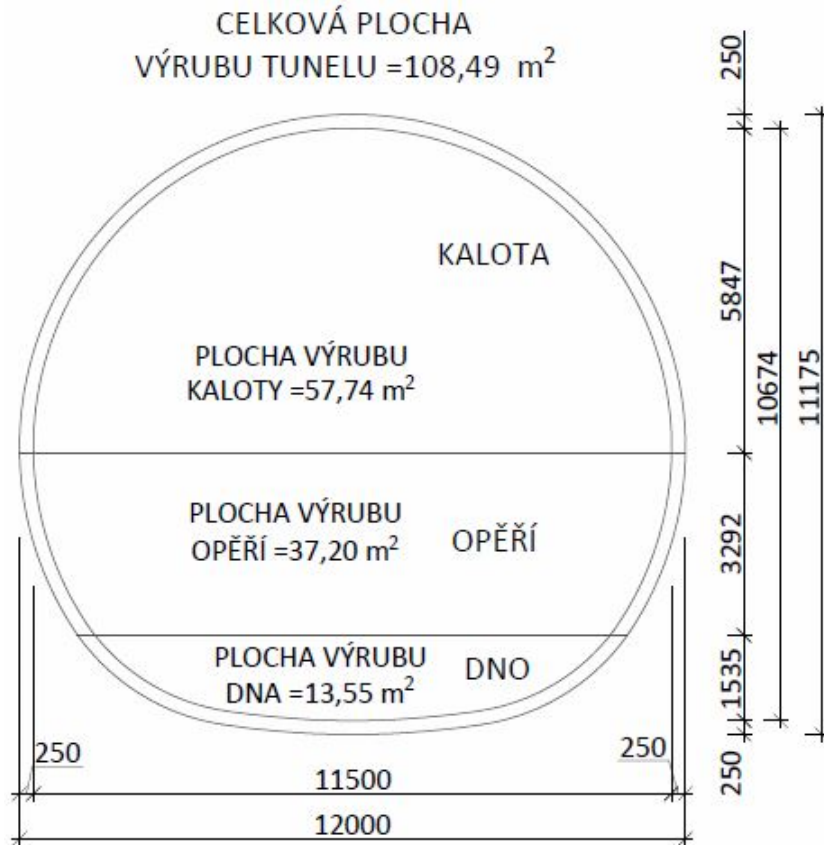
Na Obr. 15 jsou zobrazeny navržené varianty profilů štol. Pro jejich hrubé porovnání je u každé varianty napsána i plocha výrubu.

**1) První varianta** štoly má trojúhelníkový profil a levý bok jejího ostění se stává součástí primárního ostění tunelu. Návrh tvaru štoly vychází z tvaru průzkumné štoly Královopolského tunelu Velkého městského okruhu v Brně.

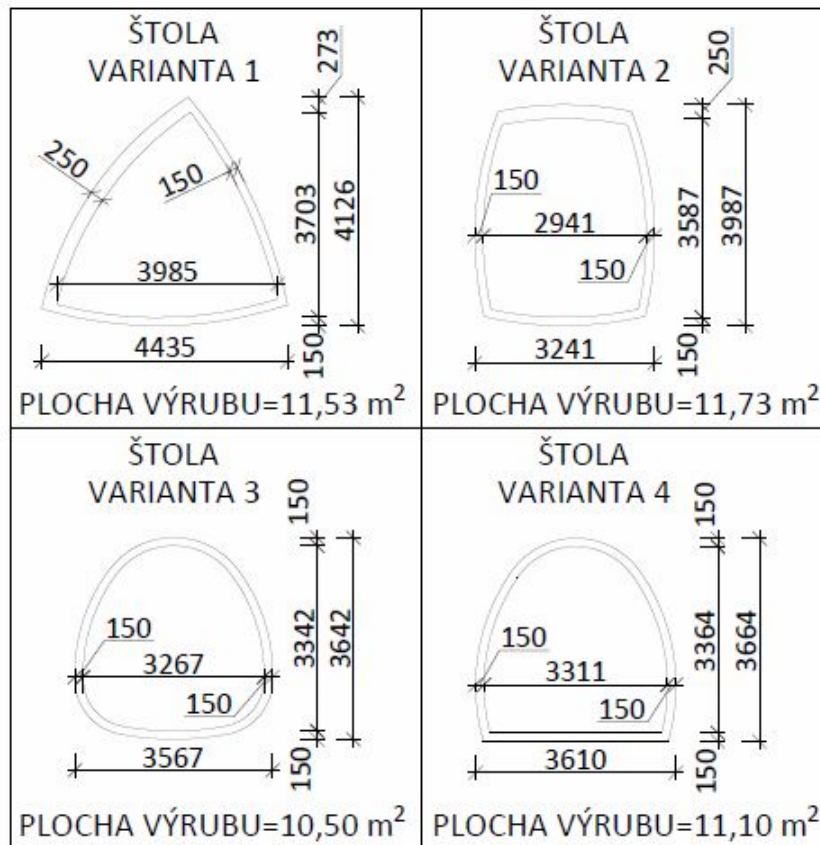
**2) Druhá varianta** štoly má soudkovitý tvar a horní klenba štoly je též součástí primárního ostění tunelu. Návrh tvaru štoly vychází z tvaru průzkumné štoly tunelu Slivenec – Lahovice (*SOKP 514*).

**3) Třetí varianta** má podkovitý tvar a u této varianty je primárního ostění během ražby kaloty tunelu vybouráno. Podkladem pro tvar štoly byla průzkumná štola pro Tunelový komplex Blanka. *Tato varianta, jako jediná, je totožná se svým vzorem.*

**4) Čtvrtá varianta** má také podkovitý tvar, ale u této varianty není spodní klenba obloukovitá. Jako u třetí varianty je primárního ostění během ražby kaloty tunelu vybouráno. Navržený tvar štoly se blíží tvaru průzkumné štoly pro tunel Mrázovka, ta však měla větší poměr šířky ku výšce výrubu.



Obr. 14 Příčný řez tunelu



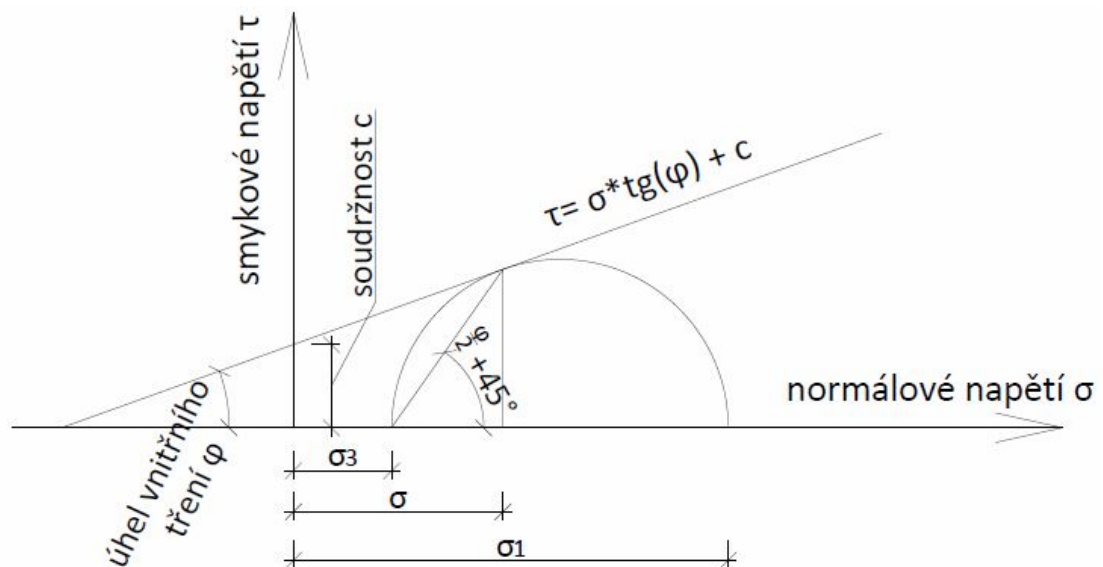
Obr. 15 Příčné řezy štol

## 5.4 Materiálový model zemin a hornin

Materiálový model slouží k popisu chování zemin a hornin během výpočtu. Jeho vhodná volba je jednou z nejdůležitějších částí výpočtu pomocí MKP. V nabídce GEO5 – MKP je několik lineárních i nelineárních modelů. Se zohledněním typu výpočtových úloh v této práci a dostupných vstupních parametrů, je uvažován nelineární materiálový model **Modifikovaný Mohr-Coulomb (MMC)**. Jde o izotropní pružný-ideálně plastický model bez zpevnění. Ten je založen na předpokladu lineárně pružného chování až do meze plasticity. Mez plasticity je vyjádřena jako lineární závislost normálového a smykového napětí pomocí Mohr-Coulombovy obalové křivky. Ta mimo normálového a smykového napětí závisí na úhlu vnitřního tření  $\varphi$  a soudržnosti  $C$ .

Rovnice Mohr-Coulombovy obalové křivky:

$$\tau = \sigma * \tan\varphi + c$$



Obr. 16 Mohr-Coulombova obalová křivka

Modifikovaný Mohr-Coulomb se od klasického Mohr-Coulombova modelu liší především v úpravě singularit původního modelu a tím ke zlepšení konvergence výpočtu. Také u něj lze očekávat tužší odezvu než u klasického MC. [57]

Vstupní parametry pro **MMC** jsou:

- |                                  |                |
|----------------------------------|----------------|
| • objemová tíha                  | $\gamma$       |
| • modul pružnosti                | $E$            |
| • Poissonovo číslo               | $\nu$          |
| • efektivní úhel vnitřního tření | $\varphi_{ef}$ |
| • efektivní soudržnost           | $c_{ef}$       |
| • úhel dilatance                 | $\psi$         |
| • modul odtížení/přetížení       | $E_{ur}$       |



Kromě úhlu dilatance a modulu odtížení/přetížení jsou všechny parametry dostupné z podkladů. **Úhel dilatance ( $\psi$ )** udává velikost plastické objemové expanze (dilatance) a během plastického tečení je konstantní. Pokud je  $\psi=0$ , pak se předpokládá, že materiál při smyku nemění svůj objem. Úhel dilatance má své využití především u písků kde je závislý na ulehlosti a úhlu vnitřního tření, avšak ve většině případů je roven 0. U všech zemín ve výpočtech je uvažováno  $\psi=0$ . [57]

U zemín vidíme, že pružné přetvoření je poměrně malé k celkové hodnotě přetvoření. Tuto skutečnost lze do jisté míry respektovat zavedením **Modulu pro přetížení a odtížení ( $E_{ur}$ )**. Což je modul, podle kterého se zemina přetváří při odtížení a opětovném zatížení až na úroveň napětí dosaženého před odtížením. Jeho orientační hodnota je stanovena na trojnásobek modulu přetvárnosti ( $E_{ur} = 3 \cdot E_{def}$ ). [57]

## 5.5 Parametry zemín a hornin a mocnosti jejich vrstev

Na základě dostupných podkladů, z výsledků různých geologických průzkumů, jsou ve výpočtech uvažovány 4 typy geologie, které jsou popsány v samostatných tabulkách. Každá geologie se skládá z 6 vrstev. První dvě vrstvy jsou pro všechny typy geologie stejné a obsahují kvartérní zeminy. Rozdílné parametry přicházejí od 3. vrstvy, která již představuje horninové prostředí. Prostor výpočetního modelu je rozdělen na 6 vrstev o daných mocnostech, s paušálními hodnotami pro všechny typy geologie. Tím je zajištěna sjednocenost výpočetních modelů. Rozdělení vrstev v ploše modelu je zobrazeno na Obr. 19 nebo Obr. 20.

*Jednotlivé vrstvy mají tyto mocnosti:*

1. vrstva	3 m
2. vrstva	5 m
3. vrstva	2 m
4. vrstva	4 m
5. vrstva	15 m
6. vrstva	do konce rozhraní výp. modelů

V tabulce geologií se také nachází parametr *Modul přetížení/odtížení*, který nepochází z geologického průzkumu, jelikož je ale nutné ho zadat do výpočetního programu, nachází se v této tabulce. Jeho význam a výpočet jeho hodnoty je popsán v předešlé kapitole **5.4 Materiálový model zemín a hornin**.





stratigrafický útvar		číslo vrstvy	geologická charakteristika	obj.tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvárné parametry				Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001
					modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	modul přitížení/odtížení $E_{ur}$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření $\varphi_{ef}$ [°]	
<b>KVARTÉR HOLOCÉN</b>	holocénní náplavy	1	hlíny písčité, převážně tuhé	19.0	6	12	18.0	0.40	15	23	F3
<b>KVARTÉR PLEISTOCÉN</b>	fluviální sedimenty	2	písky s příměsí jemnozrnné zeminy, středně ulehlé	20.5	25	50	75.0	0.35	0	34	S3
<b>PALEOZOIKUM</b>  ordovik, souvrství libeňské	břidlice jílovité	3	silně zvětralé	22.5	20	40	60.0	0.37	20	23	R5
		4	navětralé	25.0	75	150	225.0	0.31	33	29	R4
		5	zdravé - do mocnosti 15 m	26.0	200	400	600.0	0.28	70	32	R3
		6	zdravé - od mocnosti 15 m	26.5	350	650	1050.0	0.27	100	34	R3

Tab. 22 Geologie 1

stratigrafický útvar		číslo vrstvy	geologická charakteristika	obj.tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvárné parametry				Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001
					modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	modul přitížení/odtížení $E_{ur}$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření $\varphi_{ef}$ [°]	
<b>KVARTÉR HOLOCÉN</b>	holocénní náplavy	1	hlíny písčité, převážně tuhé	19.0	6	12	18.0	0.40	15	23	F3
<b>KVARTÉR PLEISTOCÉN</b>	fluviální sedimenty	2	písky s příměsí jemnozrnné zeminy, středně ulehlé	20.5	25	50	75.0	0.35	0	34	S3
<b>PALEOZOIKUM</b>  ordovik, souvrství letenské	břidlice písčité	3	silně zvětralé	22.5	30	60	90.0	0.35	18	25	R5
		4	navětralé	25.0	140	275	420.0	0.28	35	32	R4
		5	zdravé - do mocnosti 15 m	26.0	350	700	1050.0	0.25	100	36	R3
		6	zdravé - od mocnosti 15 m	26.5	600	1100	1800.0	0.24	150	37	R2

Tab. 23 Geologie 2



stratigrafický útvar		číslo vrstvy	geologická charakteristika	obj. tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvárné parametry				Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001
					modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	modul přitížení/odtížení $E_{ur}$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření $\varphi_{ef}$ [°]	
<b>KVARTÉR HOLOCÉN</b>	holocénní náplavy	1	hlíny písčité, převážně tuhé	19.0	6	12	18.0	0.40	15	23	F3
<b>KVARTÉR PLEISTOCÉN</b>	fluviální sedimenty	2	písky s příměsí jemnozrnné zeminy, středně ulehlé	20.5	25	50	75.0	0.35	0	34	S3
<b>PALEOZOIKUM</b>  devon, souvství dvorecko- prokopské	vápence kalové, s vložkami vápnitých břidlic	3	silně zvětralé	22.0	45	85	135.0	0.38	23	24	R5
		4	navětralé	24.5	225	415	675.0	0.32	50	32	R4
		5	zdravé - do mocnosti 15 m	25.5	500	900	1500.0	0.28	90	36	R3
		6	zdravé - od mocnosti 15 m	26.0	750	1400	2250.0	0.26	120	38	R2

Tab. 24 Geologie 3

stratigrafický útvar		číslo vrstvy	geologická charakteristika	obj. tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvárné parametry				Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001
					modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	modul přitížení/odtížení $E_{ur}$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření $\varphi_{ef}$ [°]	
<b>KVARTÉR HOLOCÉN</b>	holocénní náplavy	1	hlíny písčité, převážně tuhé	19.0	6	12	18.0	0.40	15	23	F3
<b>KVARTÉR PLEISTOCÉN</b>	fluviální sedimenty	2	písky s příměsí jemnozrnné zeminy, středně ulehlé	20.5	25	50	75.0	0.35	0	34	S3
<b>PALEOZOIKUM</b> ordovik	břidlice	3	silně zvětralé	24.0	45	85	135.0	0.33	30	29	R5
		4	navětralé	26.0	245	450	735.0	0.27	155	36	R4
<b>PROTERO-ZOIKUM</b>	spilit	5	zdravé - do mocnosti 15 m	29.0	950	1800	2850.0	0.25	300	40	R2
		6	zdravé - od mocnosti 15 m	29.0	1350	2550	4050.0	0.20	500	44	R2

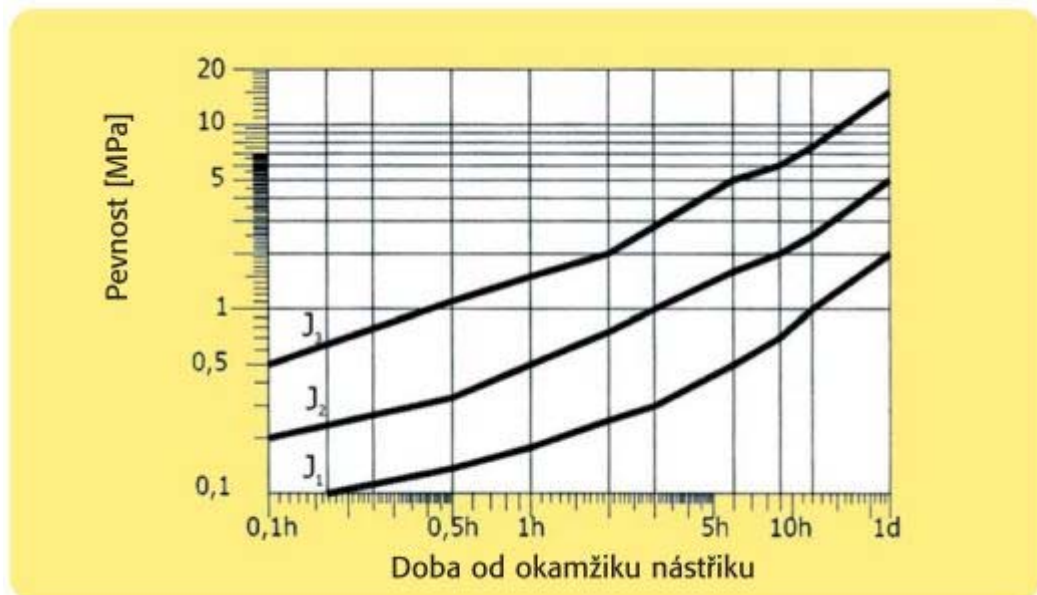
Tab. 25 Geologie 4

## 5.6 Primární ostění

Ve výpočetním programu GEO5 – MKP je ostění modelováno pomocí nosníků zadaných na linii ostění. Tyto linie odpovídají střednici reálných nosníků ostění. Nosníkové prvky v programu jsou postaveny na Mindlinově teorii, která předpokládá, že průřez zůstává po deformaci rovinný, ten ale není kolmý k deformované střednici prutu. Ohybové momenty a normálové síly se počítají v uzlech sítě. [57]

Tloušťka primárního ostění je pro štoly **150 mm** a u tunelů **250 mm**. Primární ostění tunelu i štoly je provedeno ze stříkaného betonu **SB 25 (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. Z získáme hodnotu pevnosti v tlaku pro mladý beton (24 hodin po nástřiku), s jejíž pomocí dopočítáme zbylé mechanické parametry betonu. Jejich soupis se nachází v *Tab. 27*.



Obr. 17 Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku [58]

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. 26 Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory (MPa) [58]



Výpočet mechanických parametrů betonu:

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

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

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

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

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

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

$$G = \frac{E_{cm}}{2(1 + \nu)}$$

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

$\nu$  Poissonovo číslo (pro beton  $\nu = 0,2$ )

$$G_{\text{mladý beton}} = \frac{E_{cm}}{2(1 + \nu)} = \frac{22,3}{2(1 + 0,2)} = \mathbf{9,3 \text{ GPa}}$$

$$G_{\text{starý beton}} = \frac{E_{cm}}{2(1 + \nu)} = \frac{30}{2(1 + 0,2)} = \mathbf{12,5 \text{ GPa}}$$

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

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

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

Typ SB	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{cm}$ [MPa]	G [MPa]	$\nu$ [-]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]
Mladý	25.0	22.3	9.3	0.2	5.0	0.88
Starý	25.0	30.0	12.5	0.2	20.0	2.2

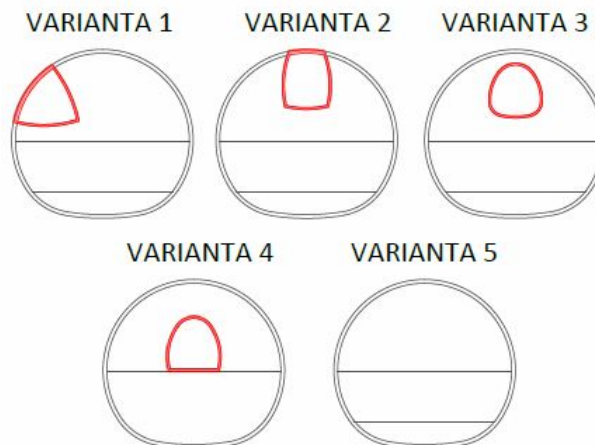
Tab. 27 Parametry střihaného betonu



## 5.7 Varianty výpočtů

Jak již bylo zmíněno výše, celkově je vytvořeno 40 různých modelů za pomoci **kombinace tří parametrů**.

**Prvním** z nich je varianta umístění štoly do profilu kaloty tunelu (varianty jsou zobrazeny na Obr. 18. U první varianty umístění má štola trojúhelníkový profil a levý bok jejího ostění je součástí prim. ostění tunelu. Druhá varianta štoly má soudkovitý tvar, i zde je část ostění součástí prim. ostění tunelu, konkrétně horní klenba. Třetí a čtvrtá varianta má podkovitý tvar, u těchto variant k zachování ostění při ražbě kaloty nedochází.

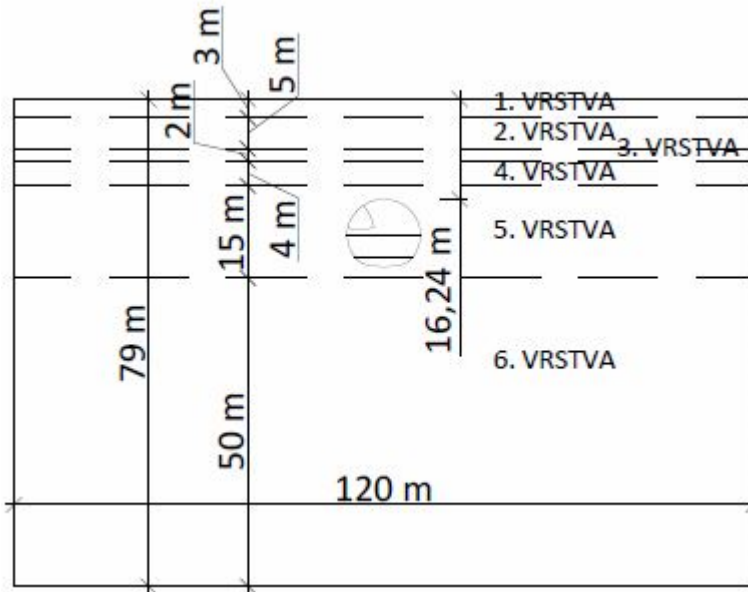


Obr. 18 Varianty umístění štoly v profilu tunelu

**Druhým** parametrem je výběr jednoho ze čtyř typů geologie.

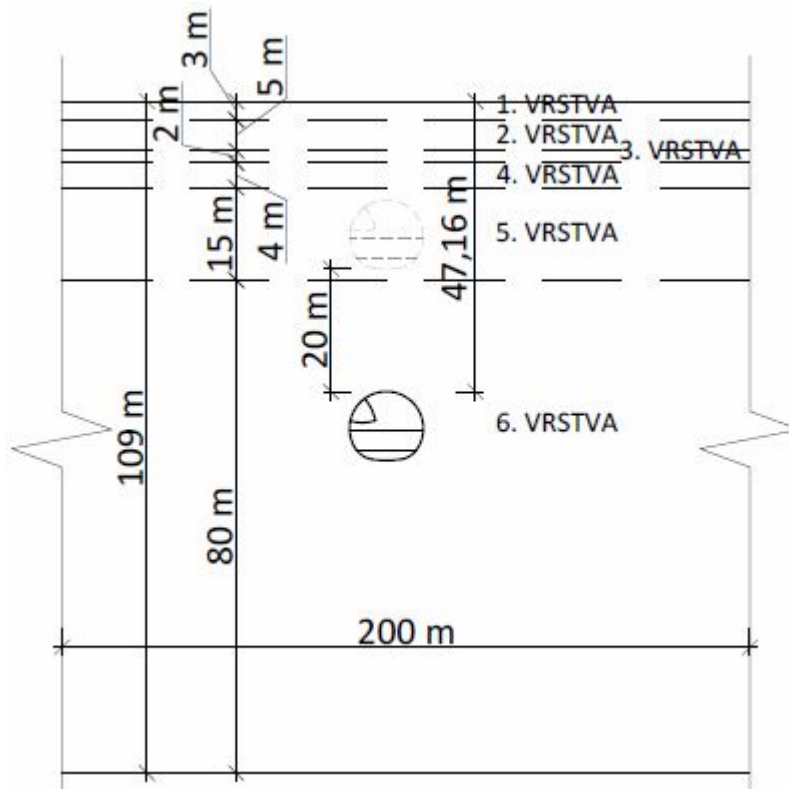
**Třetím** parametrem je pak volba jedné ze dvou hloubek umístění tunelu. V **první (mělčí)** variantě má tunel nadloží o celkové výšce 16,24 m. V **druhé variantě (hlubší)** je hodnota nadloží 47,16 m. Mezi variantami umístění tunelu tedy vzniká mezera o světlosti 20 m (*znázorněno na Obr. 20*). Pro obě varianty jsou ve výpočetním programu navrženy jiné hodnoty rozhraní, jejichž hodnoty jsou stanoveny tak, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků výpočtů okrajovými podmínkami modelu.

U mělčího tunelu (*1. varianta*) je šířkové rozhraní 120 m (60 m na obě strany od bodu [0;0]) a spodní hranice modelu je 50 m pod posledním rozhraním geologických vrstev. Dostáváme tak velikost modelu 120x79 m (*Obr. 19*).



Obr. 19 Rozhraní modelu - varianta 1

Rozhraní hlubšího tunelu (2. varianta) je rozšířeno na 200 m (100 m na obě strany od bodu [0;0]) a spodní hranice modelu je 80 m pod posledním rozhraním geologických vrstev. Dostáváme se tak velikost modelu 200x109 m (Obr. 20).



Obr. 20 Rozhraní modelu - varianta 2



Pro zjednodušení v orientaci o který výpočet se jedná, jsou jednotlivé výpočty označeny kombinací tří čísel dosazených za **XYZ**. Kde:

**X** = varianta umístění štoly (1 až 4), bez štoly (5)

**Y** = typ geologie (1 až 4)

**Z** = poloha tunelu (1 pro mělkou, 2 pro hlubší)

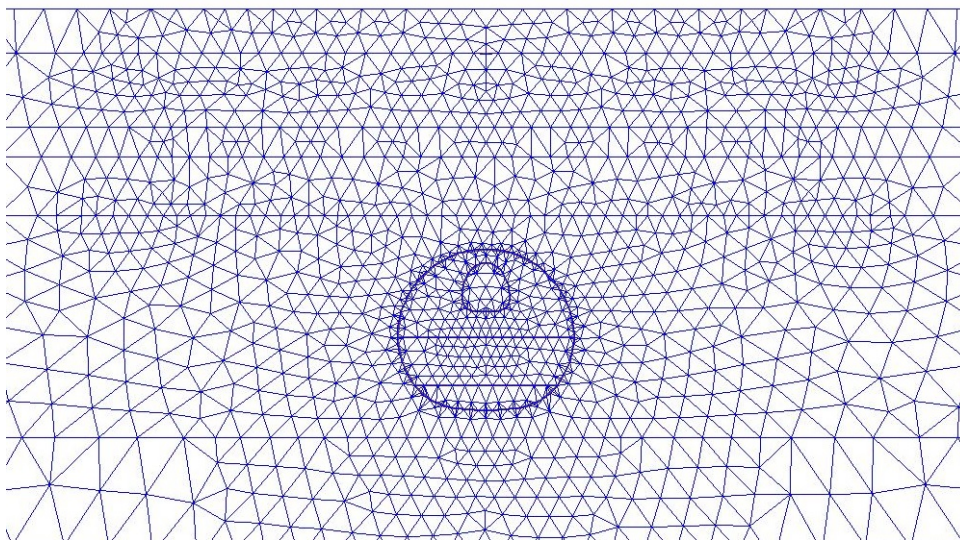
Celkový přehled označení všech výpočtů se nachází v *Tab. 28*.

<b>MĚLKÝ TUNEL</b>	GEOLOGIE 1	GEOLOGIE 2	GEOLOGIE 3	GEOLOGIE 4
ŠTOLA 1	111	121	131	141
ŠTOLA 2	211	221	231	241
ŠTOLA 3	311	321	331	341
ŠTOLA 4	411	421	431	441
BEZ ŠTOLY (5)	511	521	531	541
<b>HLUBOKÝ TUNEL</b>	GEOLOGIE 1	GEOLOGIE 2	GEOLOGIE 3	GEOLOGIE 4
ŠTOLA 1	112	122	132	142
ŠTOLA 2	212	222	232	242
ŠTOLA 3	312	322	332	342
ŠTOLA 4	412	422	432	442
BEZ ŠTOLY (5)	512	522	532	542

*Tab. 28 Číselné označení variant výpočtů*

## 5.8 Síť konečných prvků

Na linii ostění štól a tunelů je zvoleno zahuštění s krokem 0,3 m a dosahem 1 m. Na střed spodní hrany kaloty je umístěn bod, z něhož je síť zahuštěna pomocí kružnice s krokem 0,5 m a dosahem 40 m. V nadloží tunelu je ručně umístěno několik horizontálních zahušťovacích linií s krokem 1 m a délkou 50 m. Na povrchu terénu je pak linie zahuštěna krokem o velikosti 2 m. Tímto je tedy zájmová oblast pokryta řidší sítí a základní délka hrany prvků může být nastavena na 4 m. U výpočtů mělkých tunelů má síť přes 10000 uzlů a u hlubšího přes 12000. Na *Obr. 21* je zobrazena síť konečných prvků pro úroveň terénu a nejbližší okolí profilu tunelu.

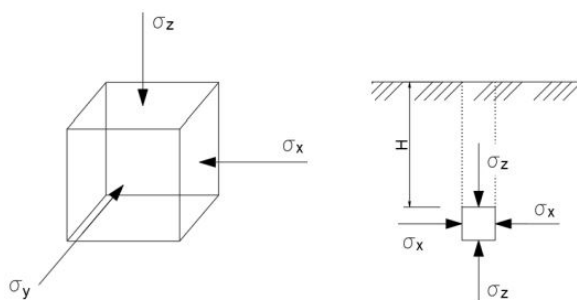


*Obr. 21 Síť konečných prvků v okolí tunelu*



## 5.9 Výpočetní fáze

Posledním krokem je vytvoření a definování jednotlivých fází výpočtu. V první fázi výpočtu je vždy spočítána primární napjatost. To je původní napjatost v horninovém masivu dosud neporušeném výrubem. Primární napjatost lze rozdělit na tektonickou a gravitační. Tektonická napjatost je vyvolaná nahromaděním energií od horotvorné činnosti v geologickém vývoji. 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. 22 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]

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

$K_0 = 1 - \sin \varphi$  pro nesoudržné zeminy

$\nu$  Poissonovo číslo [-]

$\varphi$  úhel vnitřního tření [°]

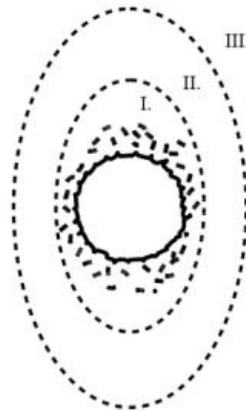
Po výpočtu primární napjatosti následuje střídání fází s výrubem a instalací primárního ostění. Vytvořením výrubu v horninovém masivu dochází k porušení původní primární napjatosti a dochází tak k přeskupení napětí a přechodu na sekundární napjatost. Předpokládá se, že boční stěny výrubu jsou symetricky namáhány. Tento předpoklad vytváří podmínky pro vznik ochranného horninového prstence. Původní pole napětí se nemůže vytratit, pouze se transformuje – napětí „obečte“ výrub.





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. 23 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 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 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  $-(1-\beta) \cdot \sigma$  (pro primární napjatost  $\beta=1$ ). Pokud modelujeme změnu primárního napětí ve 2 fázích výpočtu (budování), tak v **první fázi** se zatíží nevystrojený výrub hodnotou  $(1-\beta) \cdot \sigma$  a ve **druhé fázi** se použije zbylé zatížení o velikosti  $\beta \cdot \sigma$ .



Prostorové chování horniny je v tomto případě zavedeno použitím exkavačních sil, které působí na celý výrub štoly. Pro výpočty je stanovena hodnota  $\beta = 0,6$ . To odpovídá rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60. Neboli v **první fázi** působí 40 % zatížení do výrubu, 60 % zůstává v hornině. A ve **druhé fázi** působí do výrubu zbylých 60 % zatížení. V každé fázi, ve které se nachází primární ostění, je také počítáno s jeho vlastní tíhou. [57]

Stručný popis výpočtových fází:

a) **Modely se štolami:**

Fáze 1 – výpočet primární napjatosti

Fáze 2 – výrub štoly (sekundární napjatost), rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60

Fáze 3 – primární ostění štoly (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

Fáze 4 – výrub kaloty, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60, odstranění prim. ostění štoly a případně zachování a zesílení (**starý beton**) jeho části, která bude součástí prim. ostění tunelu (VARIANTY štol 1 a 2)

Fáze 5 – primární ostění kaloty (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

Fáze 6 – výrub opěří, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60, zesílení prim. ostění kaloty (**starý beton**)

Fáze 7 – primární ostění opěří (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

Fáze 8 – výrub dna, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60, zesílení prim. ostění opěří (**starý beton**)

Fáze 9 – primární ostění dna (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

b) **Modely bez štol (obdoba modelů se štolami, bez 2. a 3. fáze):**

Fáze 1 – výpočet primární napjatosti

Fáze 2 – výrub kaloty, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60

Fáze 3 – primární ostění kaloty (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

Fáze 4 – výrub opěří, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60, zesílení prim. ostění kaloty (**starý beton**)

Fáze 5 – primární ostění opěří (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)

Fáze 6 – výrub dna, rozdělení exkavačních sil v poměru 40:60, zesílení prim. ostění opěří (**starý beton**)

Fáze 7 – primární ostění dna (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (60 %)



## 5.10 Výsledky výpočetních modelů

Výsledky jsou porovnány ve dvou vybraných fázích výpočtu. **První** je Fáze č. 5 (respektive Fáze č. 3 u výpočtu bez štoly), ve které dojde k instalaci primárního ostění kaloty (**mladý beton**) a k následnému zbylému zatížení do výrubu. **Druhou** fází je Fáze č. 9 (respektive Fáze č. 7 u výpočtu bez štoly), ve které je dokončeno uzavření primárního ostění celého tunelu.

Pro porovnání výsledků jsou zvoleny 4 veličiny a to: ohybový moment  $M$ , normálová síla  $N$ , radiální deformace ostění  $D$ , pokles terénu  $V$  (Pozn.: hodnoty výsledků jsou v **absolutních hodnotách v jednotkách na 1 m délky tunelu**; normálové síly jsou v tlaku; ohybové momenty táhnou vlákna vnitřní strany ostění; deformace ostění je ve fázi tunelu rozdělena do dvou grafů, na kalotu a dno).

Výsledky jsou prezentovány na grafech, kdy jeden graf prezentuje všechny varianty umístění štoly (včetně výpočtu bez štoly), jeden typ geologie, jednu variantu hloubky tunelu a buď to fázi kaloty nebo fázi uzavření celého tunelu. Dohromady je tak vytvořeno **72 grafů**. Z důvodu přehlednosti, se v hlavním textu DP nachází pouze **9 grafů** pro **tunel mělce pod terénem s první variantou geologie**. Důvodem je, že u této kombinace se nejvíce projevují odlišnosti výsledků, způsobené volbou varianty štoly. Zbylé grafy jsou dokladovány v příloze a jejich výsledky jsou zde prezentovány pouze slovně. Pro pět variant výpočtu mělkého tunelu s prvním typem geologie jsou také v přílohách dokladovány jednotlivé statické výpočty z programu GEO5 – MKP.

Součástí každého grafu je ještě jedna veličina a to Poměr plochy štoly ku kalotě, která slouží k přibližnému porovnání jednotlivých štol. Jedná se o hodnoty plochy výrubu z výpočetních modelů. Jelikož ostění ve výpočtech je modelováno na střednici a ne v celé tloušťce, jsou tyto plochy o něco málo menší než reálné teoretické výrubu. Avšak pro porovnání výsledků tato skutečnost nemá významný vliv. Procentuální poměr se totiž oproti reálným výrubům u štol zmenší o hodnotu v rozmezí 1 až 1,6 procent a mezi štolami je vzájemný rozdíl max. 0,6 %, což odpovídá 0,006 m<sup>2</sup> (viz Tab. 29).

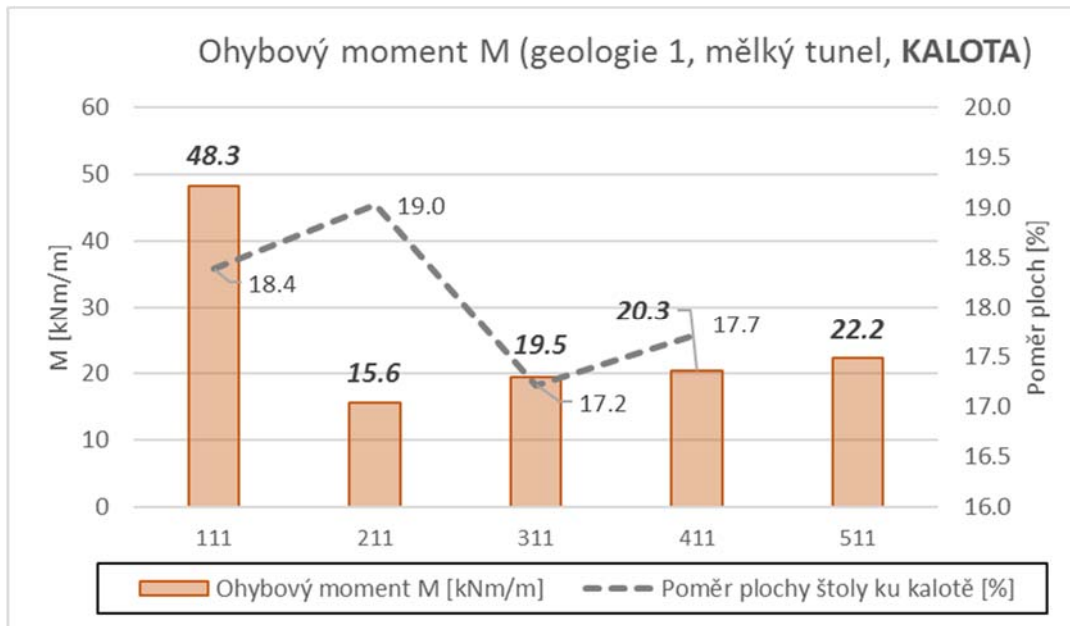
Varianta	Plocha výrubu REÁLNÁ [m <sup>2</sup> ]	Poměr ploch výrubu Štola : Kalota [%]	Plocha výrubu VÝPOČET [m <sup>2</sup> ]	Poměr ploch výrubu Štola : Kalota [%]	Rozdíl poměrů [%]
ŠTOLA 1	11.53	20.0	10.31	18.4	1.6
ŠTOLA 2	11.73	20.3	10.67	19.0	1.3
ŠTOLA 3	10.50	18.2	9.65	17.2	1.0
ŠTOLA 4	11.10	19.2	9.94	17.7	1.5
KALOTA	57.74	-	56.07	-	-

Tab. 29 Plocha výrubu štol a kaloty tunelu



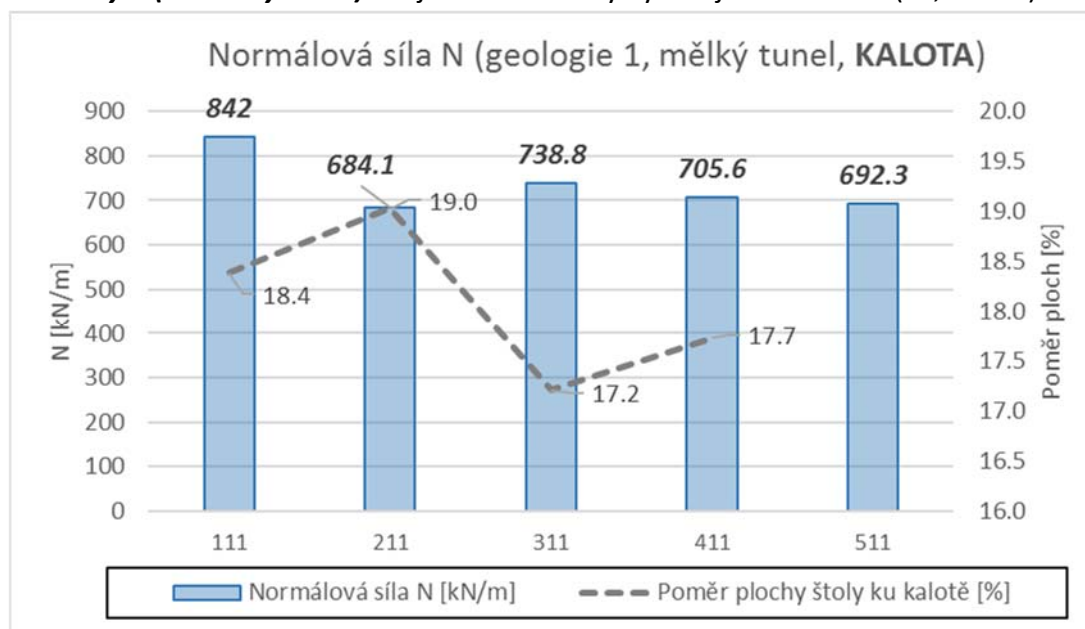
### 5.10.1 Výsledky pro první typ geologie

#### 5.10.1.1 Kalota



Graf 1 Ohybový moment (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)

Ve fázi kaloty je nejvíce patrný ohybový moment **Varianty 1** o hodnotě **48,3 kNm**, který je ke všem ostatním hodnotám **nepoměrně veliký** (mezi dvojnásobkem a trojnásobkem zbylých hodnot). Tento ohybový moment vzniká v místě zachované části ostění štoly. Zbylé tři varianty jsou si svými hodnotami podobnější. Největší z nich je **22,2 kNm** u **Varianty 5 (samotný tunel)**. Nejmenší hodnoty vykazuje **Varianta 2** (15,6 kNm).

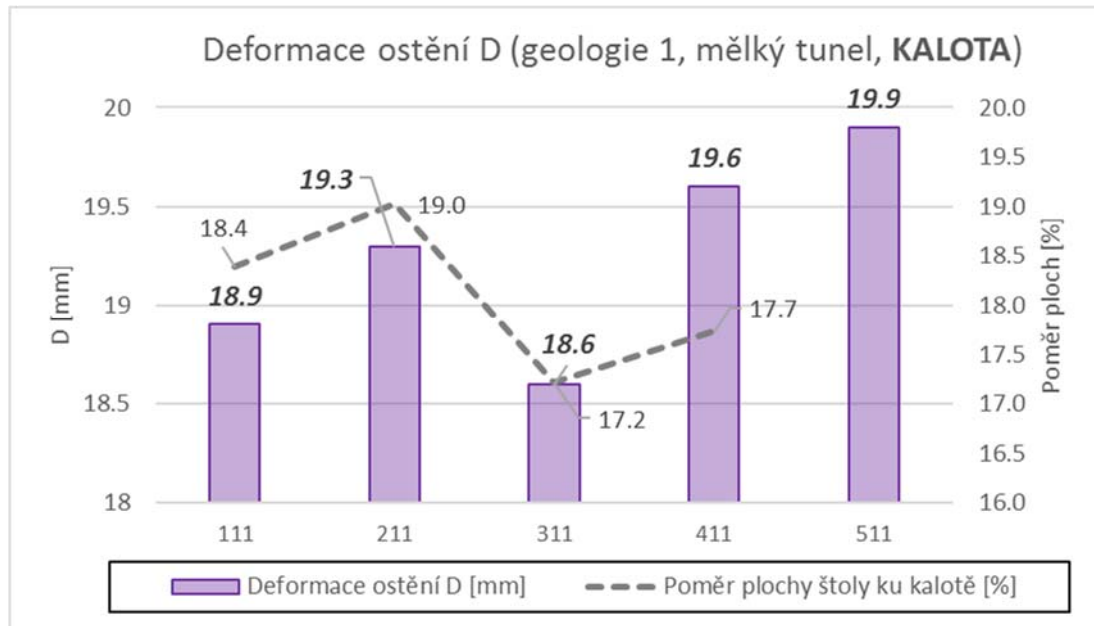


Graf 2 Normálová síla (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)

I u normálových sil platí, že **Varianta 1** dosahuje výraznějších hodnot (842 kN) oproti ostatním variantám. Druhá nejvyšší hodnota (**Varianta 3**) je od první vzdálená o vcelku výraznou hodnotu 103,2 kN (12,3 % z maximální hodnoty). Hodnoty zbylých 4 variant

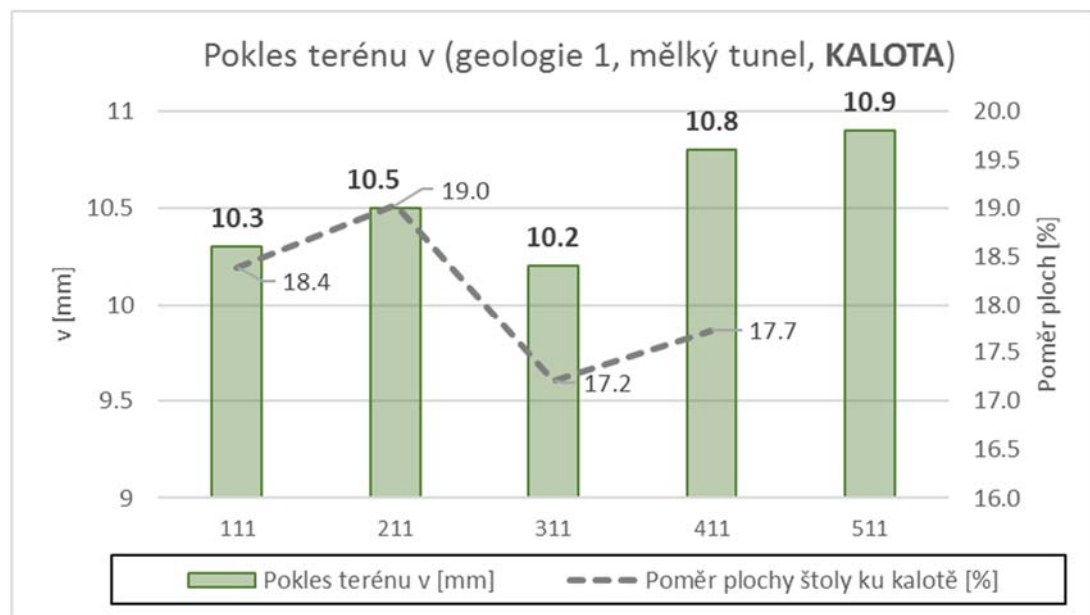


(včetně *Varianty 3*) jsou si vcelku podobné a největší se od nejmenší liší o 54,7 kN. Nejmenší hodnotu vykazuje **Varianta 2** (684,1 kN).



Graf 3 Deformace ostění (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)

Nejmenší deformaci vykazuje **Varianta 3** o hodnotě 18,6 mm a největší **Varianta 5 (samotný tunel)** o hodnotě 19,9 mm. V rozdílu absolutních hodnot se od sebe deformace zásadně neliší, maximální rozdíl hodnot je 1,3 mm. To se ale v relativním měřítku rovná 6,5 %.

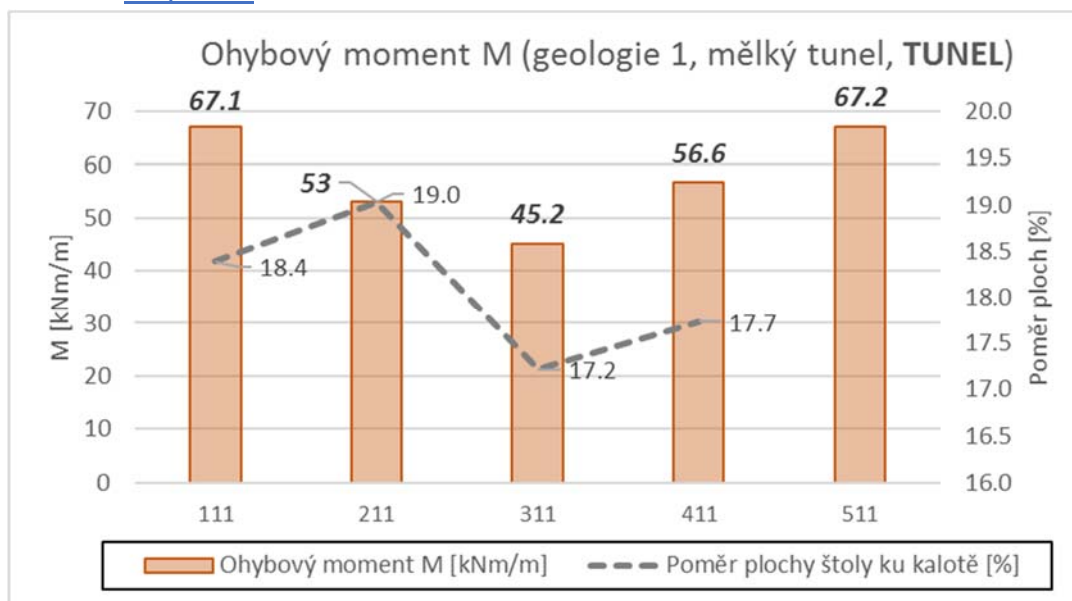


Graf 4 Pokles terénu (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)

U poklesu terénu se opakuje vývoj hodnot jako u deformace ostění. Nejmenší deformaci vykazuje **Varianta 3** o hodnotě 10,2 mm a největší **Varianta 5 (samotný tunel)** o hodnotě 10,9 mm. Rozdílu absolutních hodnot je opět minimální a to 0,7 mm. V relativním měřítku pak 6,4 %.

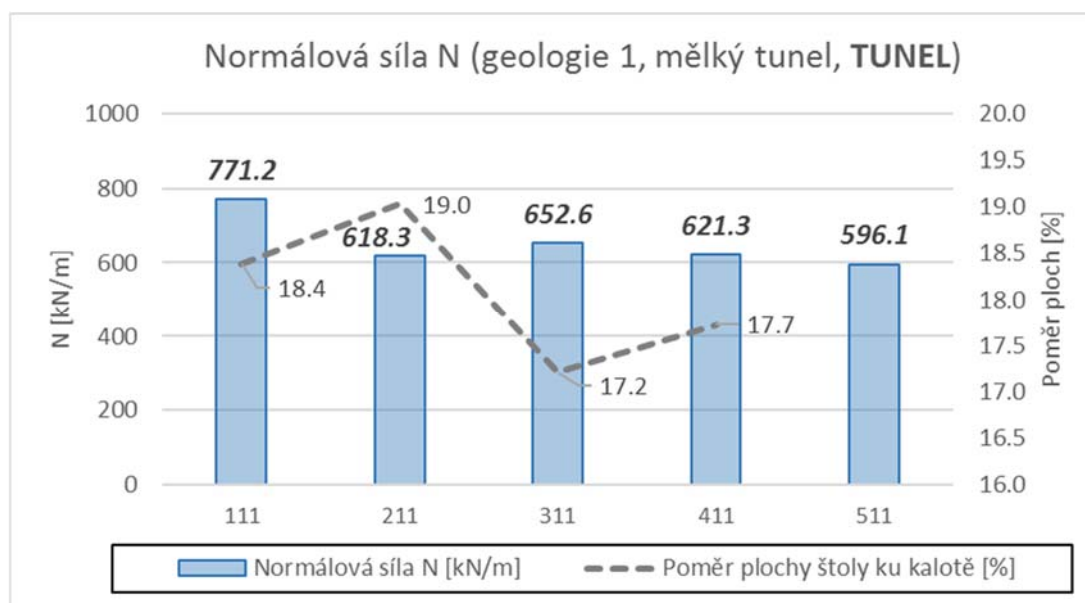


### 5.10.1.2 Celý tunel



Graf 5 Ohybový moment (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

Ve fázi tunelu již není největší hodnota u *Varianty 1*, ale první příčku těsně získává **Varianta 5 (samotný tunel)** s hodnotou 67,2 kNm. Nejmenší hodnoty vykazuje **Varianta 3** s hodnotou 45,2 kNm (ve fázi kaloty to byla *Varianta 2*).

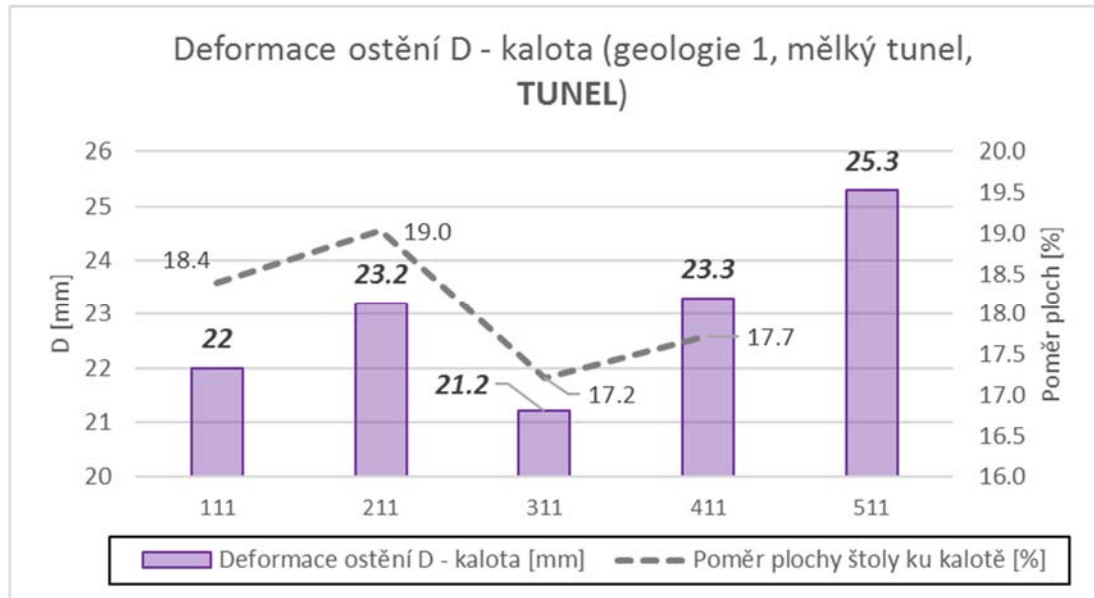


Graf 6 Normálová síla (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

Na první pohled je patrné, že všechny hodnoty normálových sil klesly oproti fázi kaloty. To je způsobeno zejména změnou napjatosti v horninovém prostředí v souvislosti s provedením výrubu opěří a dna, přičemž šířka díla se již nemění. Ve fázi kaloty se pata primárního ostění opírala o horninové prostředí. Při postupu ražby se ale podepření ostění změnilo z horninového prostředí na délku obvodu primárního ostění ve spodní části výrubu (*opěří a dna*). U normálových sil opět platí, že **Varianta 1** dosahuje nejvyšší hodnoty (771,2 kN). Druhá nejvyšší hodnota (stejně jako u kaloty) připadá na **Variantu 3**, s hodnotou 652,6 kN (menší o 15,4 % z maximální hodnoty).

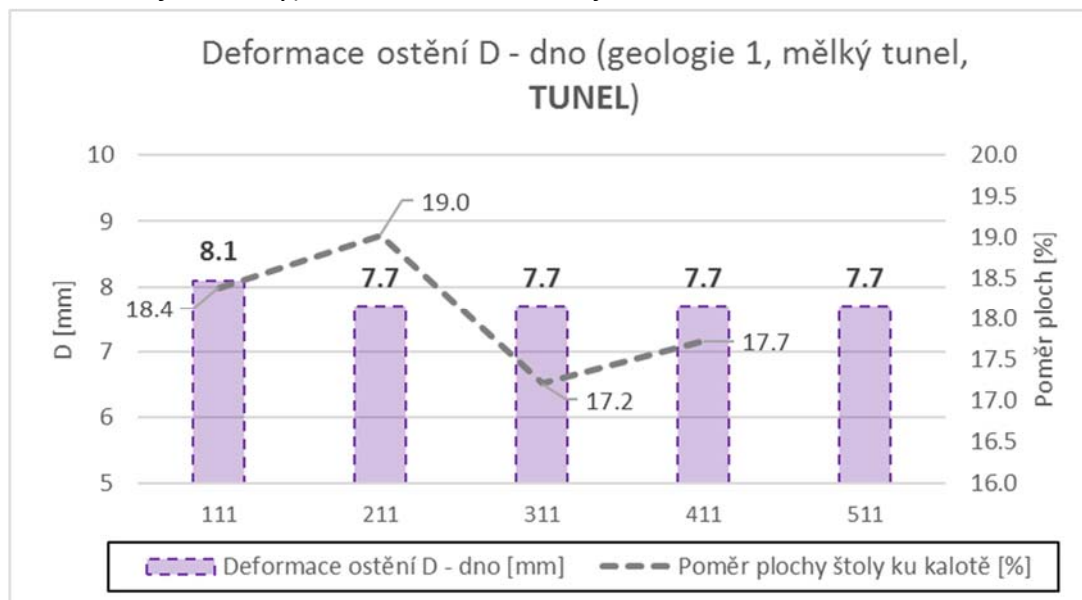


Hodnoty ostatních variant, s výjimkou *Varianta 1*, jsou si taktéž vcelku podobné, jako ve fázi kaloty, a hodnoty se od sebe maximálně liší o 56,5 kN. Nejmenší hodnotu vykazuje **Varianta 2** (618,3 kN).



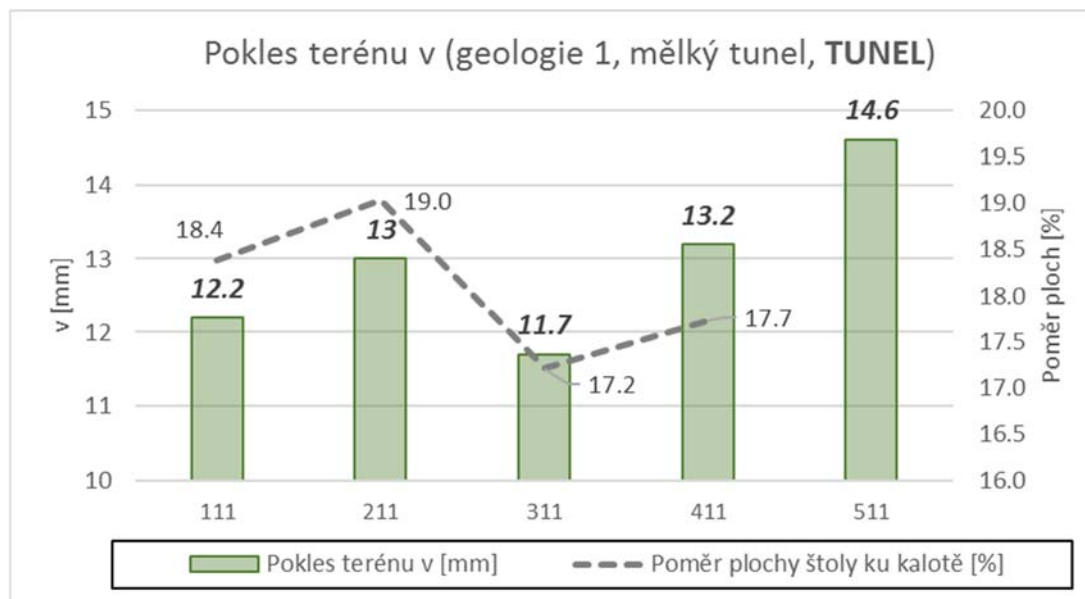
Graf 7 Deformace ostění – kalota (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

Vývoj hodnot deformace ostění v kalotě tunelu odpovídá fázi kaloty. Kde nejmenší deformaci vykazuje **Varianta 3** o hodnotě 21,2 mm a největší **Varianta 5 (samotný tunel)** o hodnotě 25,3 mm. Rozdíl absolutních hodnot je v této fázi o dost výraznější než ve fázi kaloty. Maximální rozdíl hodnot je 4,1 mm (což je více jak trojnásobně větší hodnota ve fázi kaloty). V relativním měřítku jde o 17,0 %.



Graf 8 Deformace ostění – dno (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

Hodnoty deformace ostění dna se pro varianty modelů v zásadě vůbec nemění. Pouze **Varianta 1** je o 0,4 mm větší, což je ale velmi malá změna.



Graf 9 Pokles terénu (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

I pro pokles terénu vývoj hodnot poklesu terénu odpovídá fázi kaloty, opět jen s výjimkou, že se rozdíl absolutních hodnot od sebe více liší. Nejmenší deformaci vykazuje **Varianta 3** o hodnotě *11,7 mm* a největší **Varianta 5 (samotný tunel)** o hodnotě *14,6 mm*. Rozdíl absolutních hodnot je *2,9 mm*. V relativním měřítku jde o **19,9 %**.





### 5.10.2 Vývoj výsledků pro ostatní výpočetní modely

Zde jsou slovně vyhodnoceny zbylé varianty výpočtů, a to primárně pro poslední fázi výpočtu (*celý tunel*). U normálových sil ale platí, že maximálních hodnot dosahují ve fázi kaloty a u ohybových momentů to v některých případech také platí. Grafy jednotlivých variant jsou dostupné v Příloze 1: *Grafy vnitřních sil a deformací*.

#### 5.10.2.1 Tunel mělce pod terénem

##### 1) Mělký tunel, geologie 2

Oproti první geologii je u druhého typu *velice významný pokles ohybových momentů*. Maxima dosahuje **Varianta 1** s hodnotou **27,5 kNm**. Ostatní varianty se pohybují od 15,4 do 19,1 kNm, přičemž maxima z ostatních 4 variant dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**.

Normálové síly se oproti první geologii zvýšily, ale vývoj hodnot je stejný. Maximum je ve fázi kaloty u **Varianty 1** s hodnotou **925,8 kN** a zbylé varianty se pohybují od 663,9 do 742,7 kN. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty *cca o 60 až 80 kN nižší*.

Radiální deformace ostění (v kalotě tunelu) se také velmi výrazně zmenšily. Rozptyl hodnot není moc velký, je od 10,1 do 11,1 mm. Maxima dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**. Změnou je také porovnání hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu. Rozdíl hodnot deformací je mezi fázemi *pouze od 0,2 do 0,5 mm*. Primární část deformace ostění tak vznikla při ražbě kaloty a později se o moc nezvětšovala. Deformace ostění dna je průměrné hodnoty 4,5 mm.

S poklesem terénu je to skoro stejné jako s deformací ostění. Fáze kaloty a celého tunelu se od sebe skoro neliší, pouze u dvou variant a to jen o 0,1 a 0,2 mm. Hodnoty jsou *od 5,1 do 5,8 mm ve fázi celého tunelu*. Maxima dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**.

##### 2) Mělký tunel, geologie 3

Vývoj hodnot ohybových momentů je pro 3. typ geologie stejný jako u 2. typu, jen s nižšími hodnotami. Maxima dosahuje **Varianta 1** s hodnotou **20,0 kNm**. Ostatní varianty se pohybují od 11,5 do 14,6 kNm, přičemž maxima z ostatních 4 variant dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**.

Normálové síly mají též stejný vývoj jako u 2. typu geologie. Maximum je ve fázi kaloty u **Varianty 1** s hodnotou **894,6 kN** a zbylé varianty se pohybují od 640,1 do 710,8 kN. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty *cca o 40 až 60 kN nižší*.

Radiální deformace ostění (v kalotě tunelu) oproti předchozí geologii opět klesly. Hodnoty variant jsou od 6,9 do 7,7 mm. Maxima dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**. Hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu se téměř neliší. Největší rozdíl je 0,4 mm u **Varianty 5**. Deformace ostění dna je průměrné hodnoty 3,2 mm.

Pokles terénu se také snižuje. Hodnoty jsou od 3,4 do 3,8 mm. Maxima dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**. Pouze zmíněná **Varianta 5** má *rozdíl* hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu a to pouze 0,2 mm.

Celkový trend zůstává zachován jako v případě geologie 1.



### 3) Mělký tunel, geologie 4

U této varianty jsou si ohybové momenty velice podobné. Hodnoty se pohybují od 13,0 do 14,8 kNm. Maxima dosahuje **Varianta 2 a 3** s hodnotou **14,8 kNm**.

Zato normálové síly jsou zde ze všech typů geologie (pro mělký tunel) největší. Maximum je ve fázi kaloty u **Varianty 1** s hodnotou **997,9 kN** a zbylé varianty se pohybují od 684,1 do 757,8 kN. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty cca o 20 až 40 kN nižší.

Radiální deformace ostění (v kalotě tunelu) jsou ze všech typů geologií nejmenší. Hodnoty variant jsou od 4,1 do 4,6 mm. Maxima dosáhla **Varianta 2**. Hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu se liší pouze o nepatrných 0,1 mm u **Varianty 1 a 4**. Deformace ostění dna je průměrné hodnoty pouhých 2,0 mm.

Pokles terénu je minimální. Hodnoty jsou od 1,9 do 2,1 mm. Maxima dosáhla **Varianta 2 a 4**. Pokles terénu se ve fázi kaloty a celého tunelu neliší.

#### 5.10.2.2 Tunely hluboko pod terénem

##### 1) Hluboký tunel, geologie 1

Oproti variantě mělkého tunelu, se stejnou geologií, je vývoj hodnot ohybových momentů jiný. **Varianta 4** dosahuje ve fázi kaloty **47,6 kNm** a ve fázi celého tunelu **41,1 kNm**, se zohledněním obou fází jde tak o variantu s minimální hodnotou (u mělkého tunelu byla 3. největší). Ostatní 4 zbylé varianty mají hodnoty od 58,9 do 66 kNm. Maxima dosáhla **Varianta 5 (bez štoly)**. Když porovnáme mělký a hluboký tunel, tak u hlubokého došlo ke snížení hodnot u **Variant 1, 4 a 5**. U **Varianty 5** velmi málo (o 1,2 kNm), u **Varianty 1** méně (o 6,5 kNm) a u **Varianty 4** výrazněji (o 9 kNm). Naopak zvýšení hodnot došlo u **Variant 2 a 3**. U **Varianty 2** o 5,9 kNm a u **Varianty 3** o velmi výrazných 15,2 kNm (na celk. hodnotu 60,4 kNm).

Ze všech vytvořených variant (pro mělký i hluboký tunel) vycházejí pro tuto variantu největší normálové síly. Maximum je dosaženo vždy ve fázi kaloty. První je **Varianta 4** o hodnotě **1597,2 kN**, druhá je **Varianta 2** s **1542,2 kN**, třetí **Varianta 1** s **1497,0 kN**. Zbylé dvě varianty, **Varianta 3 (1381,6 kN)** a **Varianta 5 (1357,9 kN)**, mají výrazněji menší hodnoty oproti prvním třem variantám. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty výrazně nižší, cca o 120 až 180 kN.

I vývoj hodnot deformace ostění (v kalotě tunelu) je jiný než u mělkého tunelu se stejnou geologií. Největší deformace je u **Varianty 3** o hodnotě **20,7 mm**. Na druhém místě jsou shodně **Varianta 1 a 5** s hodnotou **20,3 mm**. Třetí je **Varianta 2** s **19,1 mm** a poslední **Varianta 4** s **18,6 mm**. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u variant od 1,3 mm do 2,3 mm. Za zmínku také stojí deformace ostění dna. To se z průměrných 7,9 mm u mělkého tunelu zvýšilo na průměrnou hodnotu **16,2 mm**.

Pokles terénu kopíruje vývoj hodnot jako deformace ostění. Největší pokles je u **Varianty 3** o hodnotě **9,2 mm**. Na druhém místě jsou shodně **Varianta 1 a 5** s hodnotou **9,0 mm**. Třetí je **Varianta 2** s **8,3 mm** a poslední **Varianta 4** s **8,1 mm**. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u variant od 0,8 mm do 1,2 mm.



## 2) Hluboký tunel, geologie 2

U této varianty je u [ohybových momentů](#) překvapivá změna. **Varianty 1, 3 a 5** totiž dosahují svých maximálních hodnot ve **fázi kaloty** a jen **Varianty 2 a 4** ve **fázi celého tunelu**. To je způsobeno zejména změnou napjatosti v horninovém prostředí v souvislosti s provedením výrubu opěří a dna. Maximum je dosaženo ve fázi kaloty u **Varianty 1** o hodnotě **46,4 kNm**. Maximální hodnoty zbylých variant (*různé fáze*) jsou v rozmezí 29,3 až 31,6 kNm. Nejmenší hodnotu (29,3 kNm) má **Varianta 4** ve fázi celého tunelu.

Vývoj hodnot [normálových sil](#) se oproti první geologii také trochu změnil. Maximum (o hodnotě **1325,6 kN**) je stále u **Varianty 4**. Ale **Varianty 1 a 2** a také **3 a 5** si prohodily místa. Druhá největší hodnota **1308,2 kN** je u **Varianty 1**, třetí je pak **Varianta 2** s **1253,7 kN**, čtvrtá **Varianta 5** s **1241,9 kN** a poslední **Varianta 3** s hodnotou **1216,0 kN**. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty *výrazně nižší*, cca o 100 až 180 kN.

Hodnoty [deformace ostění \(v kalotě tunelu\)](#) zde, na rozdíl od přechozí geologie, více připomínají hodnoty mělkého tunelu se stejnou geologií, pouze jsou větší. Největší deformace je u **Varianty 3 a 5** o hodnotě **11,0 mm**. Zbylé varianty mají hodnoty *od 10,3 do 10,8 mm*. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u variant *od 0,3 mm do 0,5 mm*. [Deformace ostění dna](#) se snížila oproti minulé geologii na *průměrnou hodnotu 9,3 mm*.

[Pokles terénu](#) taktéž kopíruje vývoj hodnot jako deformace ostění. Největší pokles je u **Varianty 3 a 5** o hodnotě **4,7 mm**. Zbylé varianty mají hodnoty *od 4,4 do 4,6 mm*. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u některých variant pouze *0,2 mm*.

## 3) Hluboký tunel, geologie 3

I u této geologie platí, že maxima [ohybových momentů](#) jsou pro některé varianty ve fázi kaloty a pro některé ve fázi tunelu. Maximum je dosaženo opět ve fázi kaloty u **Varianty 1** a to o hodnotě **38,7 kNm**. Maximální hodnoty zbylých variant (*různé fáze*) jsou v rozmezí 20,5 až 26,9 kNm. Nejmenší hodnotu (20,5 kNm) má **Varianta 4** ve fázi celého tunelu.

Vývoj hodnot [normálových sil](#) je stejný jako u druhé geologie. Maximum (o hodnotě **1303,5 kN**) je stále u **Varianty 4**. Ostatní varianty jsou v rozmezí 1230,7 až 1293,3 kN, minimum je u **Varianty 3**. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty *výrazně nižší*, cca o 90 až 180 kN.

Vývoj hodnot [deformace ostění \(v kalotě tunelu\)](#) je také stejný jako u druhé geologie. Největší deformace je u **Varianty 3 a 5** o hodnotě **8,3 mm**. Zbylé varianty mají hodnoty *od 7,9 do 8,1 mm*. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u variant *od 0,1 mm do 0,4 mm*. [Deformace ostění dna](#) se snížila oproti minulé geologii na *průměrnou hodnotu 7,1 mm*.

[Pokles terénu](#) taktéž kopíruje vývoj hodnot jako deformace ostění. Největší pokles je u **Varianty 3 a 5** o hodnotě **3,5 mm**. Zbylé varianty mají hodnoty *od 3,2 do 3,3 mm*. Rozdíl hodnot mezi fází kaloty a celého tunelu je u některých variant pouze *0,1 nebo 0,2 mm*.



#### 4) Hluboký tunel, geologie 4

Princip výsledků ohybových momentů je u této geologie opět stejný jako u mělkého tunelu, tudíž že, největší hodnoty jsou dosaženy ve *fázi celého tunelu*. Maxima dosahuje **Varianta 4** s hodnotou **33,8 kNm**. Těsně za ní je **Varianta 2** s **33,5 kNm**. **Varianty 1 a 3** mají shodně **27,2 kNm** a nejmenší hodnota je **26,7 kNm** u **Varianty 5**.

U normálových sil vyčnívají hned tři varianty. S dosti podobnými hodnotami vede **Varianta 4** s **1322,2 kN**, za ní **Varianta 1** s **1319,7 kN** a poté **Varianta 2** s **1315,3 kN**. Čtvrtá je **Varianta 5** s menší hodnotou **1243,4 kN** a poslední s výrazně menší hodnotou **1183,1 kN** je **Varianta 3**. Hodnoty ve fázi celého tunelu jsou oproti fázi kaloty *výrazně nižší a s velkým rozptylem, cca o 130 až 312 kN*. Finálové hodnoty, ve fázi celého tunelu, jsou si ale u 2. až 5. *Varianty* poměrně blízké. Pouze hodnota u 1. *Varianty* vyčnívá.

Maximum hodnoty deformace ostění (v kalotě tunelu) je pro všechny varianty stejné a to **4,6 mm**. Rozdíl hodnot mezi fázi kaloty a celého tunelu je u variant *pouhých 0,1 mm nebo žádný*. Deformace ostění dna dosáhla u hlubokých tunelů nejnižší hodnoty **4,1 mm**.

Pokles terénu je stejně jako u varianty mělkého tunelu minimální, dokonce nejmenší ze všech výpočetních modelů. Průměrná hodnota poklesu je **1,8 mm**. Oproti fázi kaloty se též skoro vůbec nemění.

#### 5.10.3 Výsledky ostatních výpočetních modelů ve vazbě na modely s prvním typem geologie

V této podkapitole jsou ve formě tabulky (**Tab. 30**) zpracovány **rozdíly hodnot** variant výpočtů s jiným typem geologie a hloubkou tunelu od **variant pro mělký tunel s prvním typem geologie**. Porovnání je vždy vztaženo na určitou variantu umístění štoly (*resp. bez štoly*) a mění se typ geologie a hloubky tunelu. Pro varianty s mělkým tunelem a prvním typem geologie jsou v tabulce vypsány **maximální dosažené hodnoty** (v *absolutních hodnotách*), které slouží jako **referenční**. Rozdíly hodnot je získán odečtením hodnoty pro *jinou variantu* od *referenční hodnoty*. Pokud je rozdíl **ZÁPORNÝ**, daná veličina při změně parametrů (*typu geologie nebo hloubky tunelu*) **klesá**. Naopak pokud je **KLADNÝ**, tak veličina **stoupá**.

Z *rozdílu hodnot* je vidět, že v zásadě jedinými **rostoucími** veličinami jsou normálová síla a deformace dna kaloty. Zatímco *ostatní veličiny* skoro ve všech případech (*s výjimkou pár hodnot ohybových momentů*) **klesají**.

Zvýšení normálových sil odpovídá teorii dle *Fenner-Pacherovy křivky* (**Obr. 28 na str. 74**). Geostatická napjatost je stále stejná, ale při menší deformaci ostění dojde k zvýšení tlaku na výrub, tudíž i normálových sil. Díky tomu ubyde tlak na výztuž, ale zvýší se tlak na beton.



VARIANTA		Geol. 1 mělký t.	Geol. 2 mělký t.	Geol. 3 mělký t.	Geol. 4 mělký t.	Geol. 1 hluboký t.	Geol. 2 hluboký t.	Geol. 3 hluboký t.	Geol. 4 hluboký t.
VARIANTA 1	M [kNm]	67.1	-39.6	-47.1	-52.6	-6.5	-20.7	-28.4	-39.9
	N [kN]	842.0	83.8	52.6	155.9	655.0	466.2	451.3	477.7
	D (kalota) [mm]	22.0	-11.9	-15.1	-17.9	-1.7	-11.2	-13.9	-17.4
	D (dno) [mm]	8.1	-3.4	-4.7	-6.0	8.2	1.2	-1.0	-4.0
	v [mm]	12.2	-7.1	-8.8	-10.3	-3.2	-7.6	-8.9	-10.5
VARIANTA 2	M [kNm]	53.0	-37.6	-41.5	-38.2	5.9	-21.9	-31.1	-19.5
	N [kN]	684.1	-20.2	-44.0	0.0	858.1	569.6	580.8	631.2
	D (kalota) [mm]	23.2	-12.5	-15.8	-18.6	-4.1	-12.6	-15.2	-18.6
	D (dno) [mm]	7.7	-3.3	-4.5	-5.7	8.3	1.5	-0.7	-3.6
	v [mm]	13.0	-7.5	-9.4	-10.9	-4.7	-8.5	-9.7	-11.2
VARIANTA 3	M [kNm]	45.2	-27.3	-32.2	-30.4	15.2	-13.6	-18.3	-18.0
	N [kN]	738.8	3.9	-28.0	-3.6	642.8	477.2	491.9	444.3
	D (kalota) [mm]	21.2	-10.8	-14.1	-16.8	-0.5	-10.2	-12.9	-16.6
	D (dno) [mm]	7.7	-3.2	-4.5	-5.7	8.8	1.7	-0.5	-3.6
	v [mm]	11.7	-6.3	-8.2	-9.7	-2.5	-7.0	-8.2	-9.9
VARIANTA 4	M [kNm]	56.6	-38.8	-43.8	-43.6	-9.0	-27.3	-36.1	-22.8
	N [kN]	705.6	-6.8	-24.8	16.3	891.6	620.0	597.9	616.6
	D (kalota) [mm]	23.3	-12.5	-15.8	-18.8	-4.7	-13.0	-15.4	-18.7
	D (dno) [mm]	7.7	-3.3	-4.5	-5.7	8.2	1.4	-0.7	-3.6
	v [mm]	13.2	-7.6	-9.5	-11.1	-5.1	-8.8	-10.0	-11.5
VARIANTA 5	M [kNm]	67.2	-48.1	-52.6	-53.5	-1.2	-37.3	-41.7	-40.5
	N [kN]	692.3	9.9	0.5	65.5	665.6	549.6	540.6	551.1
	D (kalota) [mm]	25.3	-14.2	-17.6	-20.9	-5.0	-14.3	-17.0	-20.7
	D (dno) [mm]	7.7	-3.2	-4.5	-5.7	8.7	1.6	-0.5	-3.6
	v [mm]	14.6	-8.8	-10.8	-12.6	-5.6	-9.9	-11.1	-12.8

Tab. 30 Porovnání výsledků výpočetních modelů



### 5.11 Posouzení primárního ostění

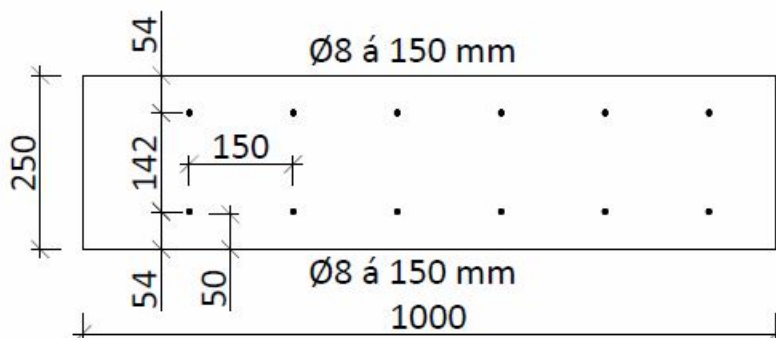
V této části je ve výpočetním programu FIN EC provedeno posouzení primárního ostění na kombinaci tlaku a ohybu pro mezní stav únosnosti pro varianty tunelu mělce pod terénem s prvním typem geologie. Vstupní hodnoty do výpočtů jsou výsledků ohybových momentů a normálových sil získaných z výpočtů MKP. Výpočty jsou i zde rozděleny na kalotu a celý tunel. Pro každou variantu štoly i samotný tunel jsou stanoveny **dvě nejnepříznivější kombinace zatížení** (pro jeden posudek je tedy 10 kombinací zatížení). První kombinace s **maximálním ohybovým momentem** a druhá s **maximální normálovou silou**. Jelikož výsledky z MKP jsou charakteristických hodnot, je nejprve nutné vnitřní síly vynásobit součinitelem zatížení  $\gamma_f$ . Jaká hodnota součinitele zatížení bude použita, závisí na druhu mezního stavu, návrhové situaci a charakteru působení zatížení (tj. nepříznivé či příznivé).

V první kombinaci (**Max. M**) je uvažováno:  $\gamma_f = 1,35$  pro ohybový moment M  
 $\gamma_f = 1,00$  pro normálovou sílu N

V druhé kombinaci (**Max. N**) je uvažováno:  $\gamma_f = 1,35$  pro ohybový moment M  
 $\gamma_f = 1,35$  pro normálovou sílu N

Výchozí průřez pro posouzení má rozměry **1000 x 250 mm**. Vyztužen je ocelovými Kari sítěmi **150x150x8 mm** u horního i spodního povrchu betonu. Krytí výztuže je **50 mm**. Materiál primárního ostění je stříkaný beton **SB25 J2**.

Pro každý posudek je vytvořen interakční diagram a tabulka obsahující návrhové zatížení, únosnost a procentuální využitelnost průřezu.



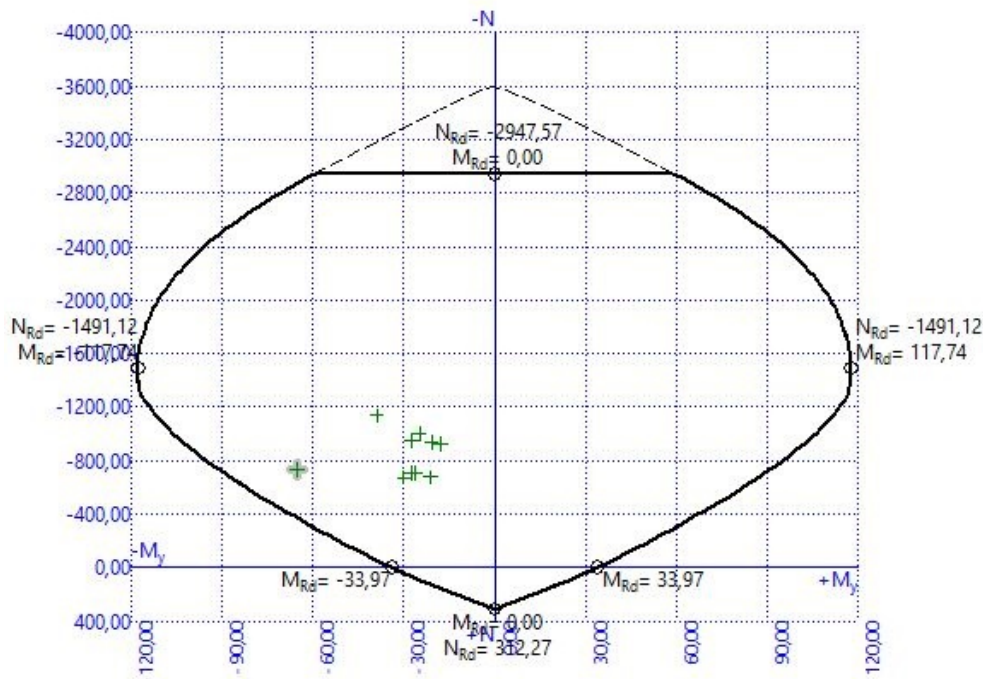
Obr. 24 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm



5.11.1 Primární ostění – kalota

NÁVRHOVÉ HODNOTY ZATÍŽENÍ - KALOTA						
VARIANTA VÝPOČTU	Max. ohyb. moment M			Max. normálová síla N		
	Č. kombinace	M [kNm/m]	N [kN/m]	Č. kombinace	M [kNm/m]	N [kN/m]
111	1	-65.2	-734.5	2	-38.9	-1136.7
211	3	-21.1	-676.4	4	-17.7	-923.5
311	5	-26.3	-708.4	6	-24.8	-997.4
411	7	-27.4	-705.6	8	-27.4	-952.6
511	9	-30.0	-672.5	10	-20.8	-934.6

Tab. 31 Návrhové hodnoty zatížení - kalota



Graf 10 Interakční diagram – kalota

Posouzení mezního stavu únosnosti - kalota, ostění tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm							
č.	Název	N <sub>Ed</sub> [kN]	N <sub>Rd</sub> [kN]	M <sub>Edy</sub> [kNm]	M <sub>Rdy</sub> [kNm]	Využití [%]	Posouzení
1	111 KALOTA - Max	-734.5	-3601.4	-65.2	-91.2	71.5	Vyhovuje
2	111 KALOTA - Max N	-1136.7	-3601.4	-38.9	-111.9	34.8	Vyhovuje
3	211 KALOTA - Max	-676.4	-3601.4	-21.1	-87.4	24.1	Vyhovuje
4	211 KALOTA - Max N	-923.5	-3601.4	-17.7	-102.2	25.6	Vyhovuje
5	311 KALOTA - Max	-708.4	-3601.4	-26.3	-89.5	29.4	Vyhovuje
6	311 KALOTA - Max N	-997.4	-3601.4	-24.8	-105.9	27.7	Vyhovuje
7	411 KALOTA - Max	-705.6	-3601.4	-27.4	-89.3	30.7	Vyhovuje
8	411 KALOTA - Max N	-952.6	-3601.4	-27.4	-103.7	26.5	Vyhovuje
9	511 KALOTA - Max	-672.5	-3601.4	-30.0	-87.2	34.4	Vyhovuje
10	511 KALOTA - Max N	-934.6	-3601.4	-20.8	-102.8	26.0	Vyhovuje

Tab. 32 Výsledky MSÚ KALOTA - tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm



Maximální využití průřezu je **71,5 %** pro 1. variantu štoly (trojúhelníková štola u boku kaloty). To je způsobeno ohybovým zatížením o hodnotě 65,2 kNm, které je nepoměrně veliké ke všem ostatním kombinacím. Minimální využití z nejhorších kombinací je **25,6 %** pro 2. variantu štoly (soudkovitá štola u vrcholu klenby kaloty). Průřez 1000 x 250 mm, vyztužen 2x ocelovými sítěmi 150x150x8 mm **VYHOVUJE**.



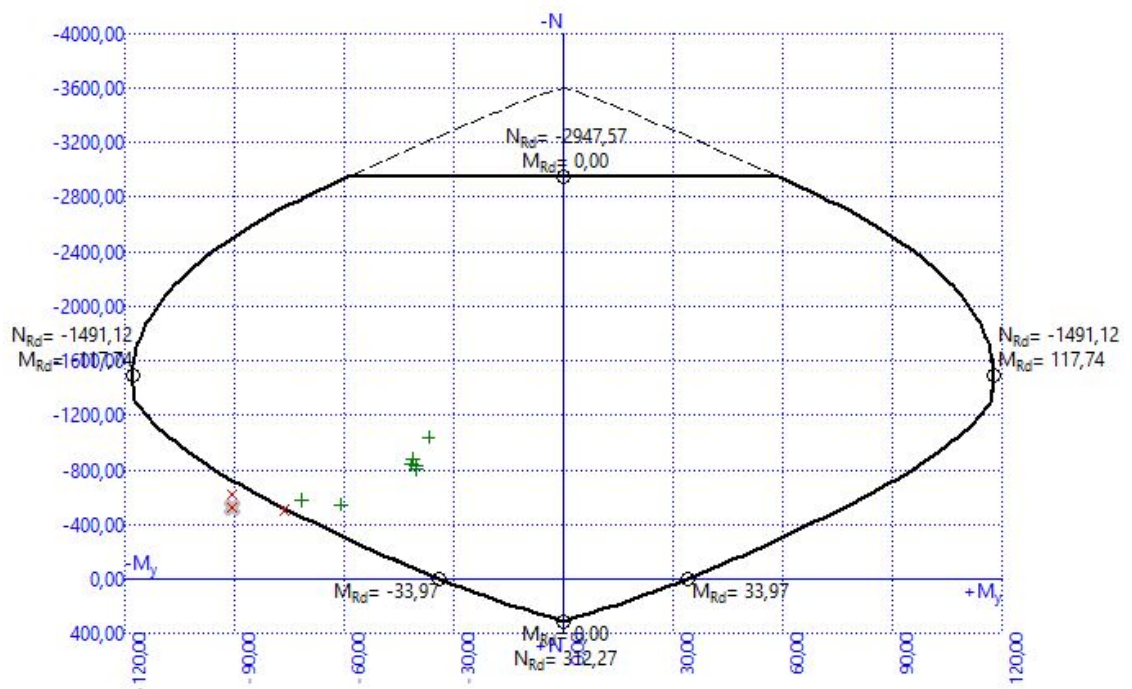


5.11.2 Primární ostění – tunel

NÁVRHOVÉ HODNOTY ZATÍŽENÍ - TUNEL						
VARIANTA VÝPOČTU	Max. ohyb. moment M			Max. normálová síla N		
	Č. kombinace	M [kNm/m]	N [kN/m]	Č. kombinace	M [kNm/m]	N [kN/m]
111	1	-90.6	-621.8	2	-36.9	-1041.1
211	3	-71.6	-574.5	4	-40.2	-834.7
311	5	-61.0	-546.1	6	-41.2	-881.0
411	7	-76.4	-506.6	8	-41.6	-838.8
511	9	-90.7	-522.7	10	-40.2	-804.7

Tab. 33 Návrhové hodnoty zatížení – tunel

5.11.2.1 Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm



Graf 11 Interakční diagram - tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm

Posouzení mezního stavu únosnosti - tunel, ostění tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm							
č.	Název	N <sub>Ed</sub> [kN]	N <sub>Rd</sub> [kN]	M <sub>Edy</sub> [kNm]	M <sub>Rdy</sub> [kNm]	Využití [%]	Posouzení
1	111 TUNEL - Max M	<b>-621.8</b>	-3601.4	<b>-90.6</b>	-83.8	<b>108.1</b>	<b>Nevyhovuje</b>
2	111 TUNEL - Max N	-1041.1	-3601.4	-36.9	-107.8	34.2	Vyhovuje
3	211 TUNEL - Max M	<b>-574.5</b>	-3601.4	<b>-71.6</b>	-80.5	88.9	Vyhovuje
4	211 TUNEL - Max N	-834.7	-3601.4	-40.2	-97.3	41.3	Vyhovuje
5	311 TUNEL - Max M	<b>-546.1</b>	-3601.4	<b>-61.0</b>	-78.5	77.7	Vyhovuje
6	311 TUNEL - Max N	-881.0	-3601.4	-41.2	-99.8	41.3	Vyhovuje
7	411 TUNEL - Max M	<b>-506.6</b>	-3601.4	<b>-76.4</b>	-75.6	<b>101.1</b>	<b>Nevyhovuje</b>
8	411 TUNEL - Max N	-838.8	-3601.4	-41.6	-97.5	42.7	Vyhovuje
9	511 TUNEL - Max M	<b>-522.7</b>	-3601.4	<b>-90.7</b>	-76.8	<b>118.1</b>	<b>Nevyhovuje</b>
10	511 TUNEL - Max N	-804.7	-3601.4	-40.2	-95.6	42.0	Vyhovuje

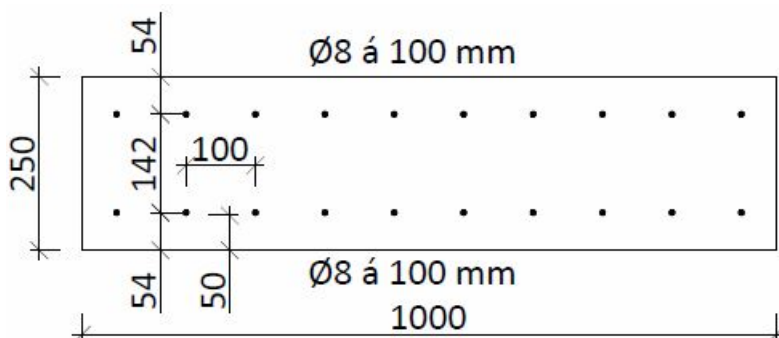
Tab. 34 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm



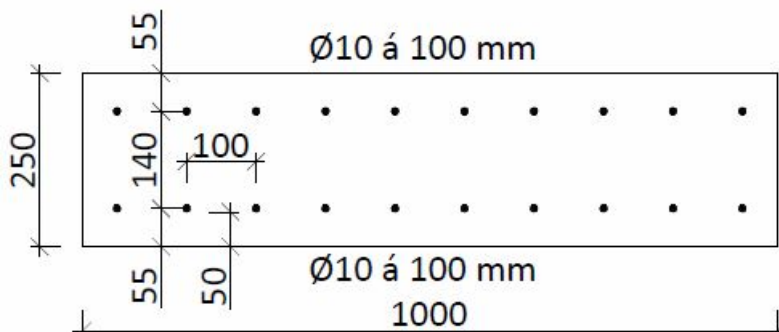
Navržený průřez **NEVYHOVUJE hned pro tři varianty výpočtu**. A to pro třetí a čtvrtou variantu štoly (trojúhelníková a podkovovitá u dna kaloty) a pro samotný tunel. Průřez **VYHOVUJE** pouze u 2. (soudkovitá) a 3. (podkovovitá, cca uprostřed kaloty) varianty umístění štoly. Z těchto dvou vyhovujících variant je nejvíce využít průřez u 2. varianty a to na **88,9 %**. Pro tento návrh průřezu tak ze všech variant nejlépe vychází **tunel s 3. variantou štoly**.

Jelikož 3 z 5 variant nevyhovují, je pro průřez navrženo několik úprav:

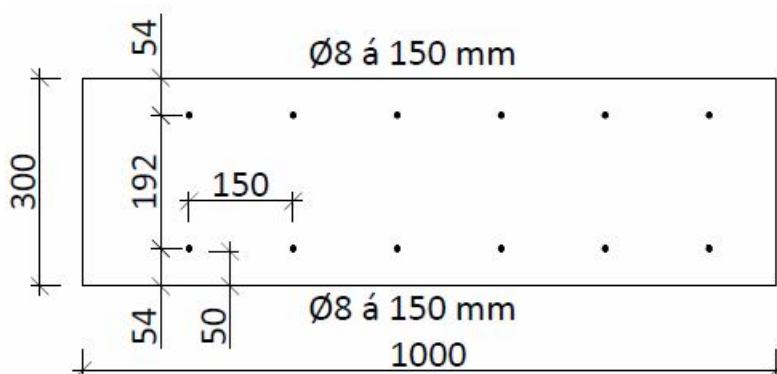
1. Použití hustší ocelové sítě (**100x100x8 mm**) (Obr. 25)
2. Použití hustší ocelové sítě a zvětšení profilu výztuže (**100x100x10 mm**) (Obr. 26)
3. Použití původní výztuže (150x150x8 mm) a **zvýšení tloušťky betonu na 300 mm** (Obr. 27)



Obr. 25 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm



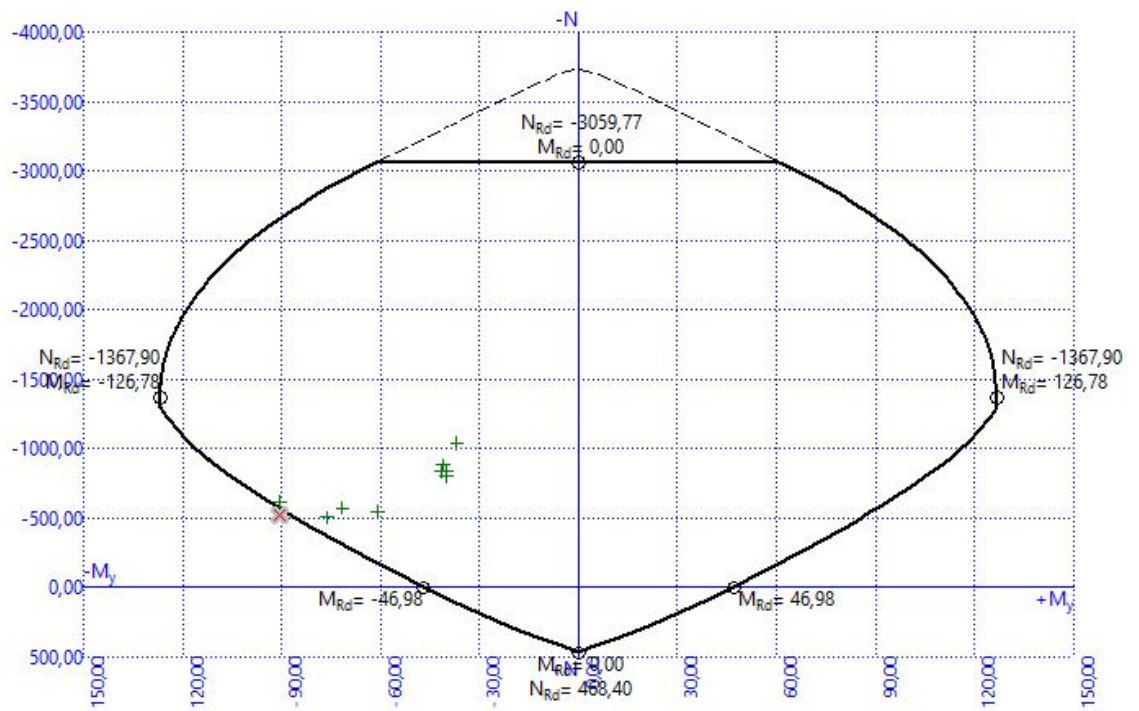
Obr. 26 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm



Obr. 27 Průřez primárního ostění, tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm



5.11.2.2 Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm



Graf 12 Interakční diagram – tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm

Posouzení mezního stavu únosnosti - tunel, ostění tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm							
č.	Název	$N_{Ed}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$M_{Edy}$ [kNm]	$M_{Rdy}$ [kNm]	Využití [%]	Posouzení
1	111 TUNEL - Max M	-621.8	-3735.5	-90.6	-94.1	96.3	Vyhovuje
2	111 TUNEL - Max N	-1041.1	-3735.5	-36.9	-117.7	31.4	Vyhovuje
3	211 TUNEL - Max M	-574.5	-3735.5	-71.6	-90.9	78.8	Vyhovuje
4	211 TUNEL - Max N	-834.7	-3735.5	-40.2	-107.2	37.5	Vyhovuje
5	311 TUNEL - Max M	-546.1	-3735.5	-61.0	-88.9	68.6	Vyhovuje
6	311 TUNEL - Max N	-881.0	-3735.5	-41.2	-109.8	37.5	Vyhovuje
7	411 TUNEL - Max M	-506.6	-3735.5	-76.4	-86.1	88.7	Vyhovuje
8	411 TUNEL - Max N	-838.8	-3735.5	-41.6	-107.4	38.7	Vyhovuje
9	511 TUNEL - Max M	<b>-522.7</b>	-3735.5	<b>-90.7</b>	-87.3	<b>103.9</b>	<b>Nevyhovuje</b>
10	511 TUNEL - Max N	-804.7	-3735.5	-40.2	-105.5	38.1	Vyhovuje

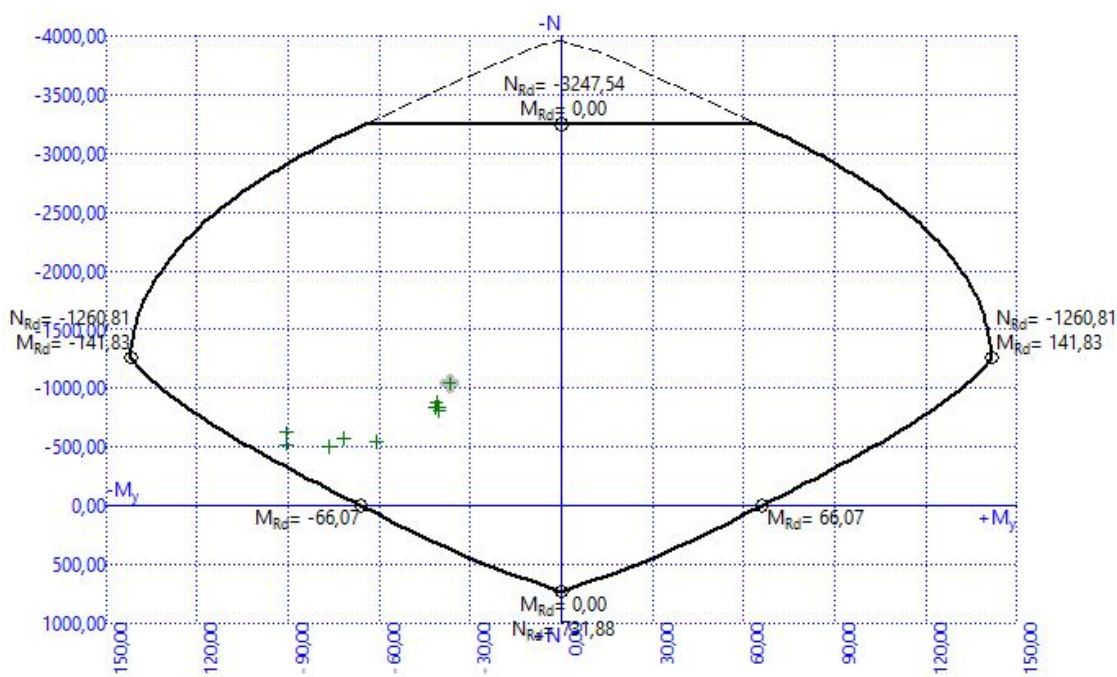
Tab. 35 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm

Použitím této úpravy se zredukoval počet nevyhovujících variant na jednu a to na **samotný tunel bez štoly**. Z ostatních variant je nejvíce využit průřez u **1. varianty** a to na **96,3 %**, kdy se jedná o dosti hraniční hodnotu.

Ze zbylých variant je nejmenší využití **68,6 %** (pro nejhorsí kombinaci) u **3. varianty**.



### 5.11.2.3 Ostění tloušťky 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm



Graf 13 Interakční diagram - tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm

Posouzení mezního stavu únosnosti - tunel, ostění tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm							
č.	Název	$N_{Ed}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$M_{Edy}$ [kNm]	$M_{Rdy}$ [kNm]	Využití [%]	Posouzení
1	111 TUNEL - Max M	-621.8	-3961.7	-90.6	-110.8	81.8	Vyhovuje
2	111 TUNEL - Max N	-1041.1	-3961.7	-36.9	-133.7	27.6	Vyhovuje
3	211 TUNEL - Max M	-574.5	-3961.7	-71.6	-107.7	66.5	Vyhovuje
4	211 TUNEL - Max N	-834.7	-3961.7	-40.2	-123.4	32.6	Vyhovuje
5	311 TUNEL - Max M	-546.1	-3961.7	-61.0	-105.8	57.7	Vyhovuje
6	311 TUNEL - Max N	-881.0	-3961.7	-41.2	-126.0	32.7	Vyhovuje
7	411 TUNEL - Max M	-506.6	-3961.7	-76.4	-103.2	74.1	Vyhovuje
8	411 TUNEL - Max N	-838.8	-3961.7	-41.6	-123.6	33.7	Vyhovuje
9	511 TUNEL - Max M	-522.7	-3961.7	-90.7	-104.2	87.0	Vyhovuje
10	511 TUNEL - Max N	-804.7	-3961.7	-40.2	-121.7	33.0	Vyhovuje

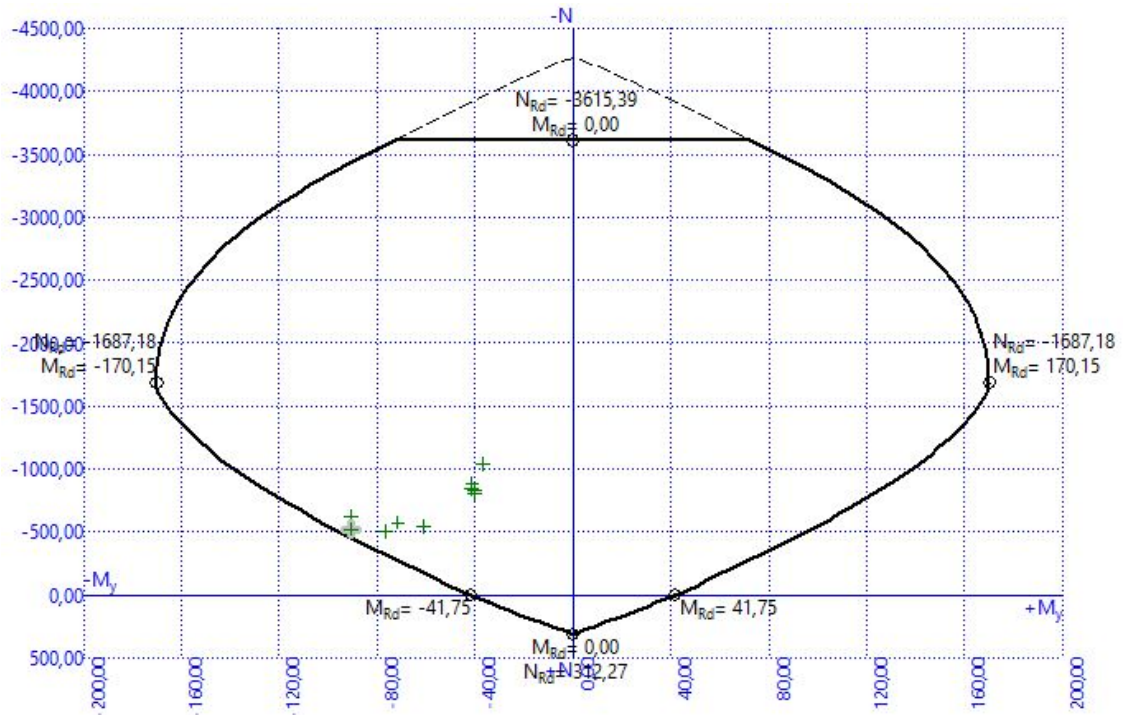
Tab. 36 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm

Použitím hustší ocelové sítě s roztečí 100 mm místo 150 mm a zvětšením profilu výztuže z 8 na 10 mm **VYHOVUJÍ** všechny varianty výpočtu. Maximální využití průřezu je **87,0 %** pro variantu bez štoly (**5. varianta**) a naopak nejmenší je **57,7 %** opět pro **3. variantu**.



5.11.2.4 Ostění tloušťky 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm

Předešlou úpravou je sice již dosaženo vyhovění všech variant, ale jako její alternativa je provedena ještě jedna úprava ve formě tlustšího ostění a zachování původní výztuže. Průřez má tedy tloušťku 300 mm a je vyztužen 2 sítěmi Ø8 á 150 mm.



Graf 14 Interakční diagram – tunel, tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm

Posouzení mezního stavu únosnosti - tunel, ostění tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm							
č.	Název	$N_{Ed}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$M_{Edy}$ [kNm]	$M_{Rdy}$ [kNm]	Využití [%]	Posouzení
1	111 TUNEL - Max M	-621.8	-4268.1	-90.6	-106.8	84.8	Vyhovuje
2	111 TUNEL - Max N	-1041.1	-4268.1	-36.9	-141.3	26.1	Vyhovuje
3	211 TUNEL - Max M	-574.5	-4268.1	-71.6	-102.3	70.0	Vyhovuje
4	211 TUNEL - Max N	-834.7	-4268.1	-40.2	-125.7	32.0	Vyhovuje
5	311 TUNEL - Max M	-546.1	-4268.1	-61.0	-99.6	61.3	Vyhovuje
6	311 TUNEL - Max N	-881.0	-4268.1	-41.2	-129.3	31.9	Vyhovuje
7	411 TUNEL - Max M	-506.6	-4268.1	-76.4	-95.8	79.8	Vyhovuje
8	411 TUNEL - Max N	-838.8	-4268.1	-41.6	-126.0	33.0	Vyhovuje
9	511 TUNEL - Max M	-522.7	-4268.1	-90.7	-97.3	93.2	Vyhovuje
10	511 TUNEL - Max N	-804.7	-4268.1	-40.2	-123.1	32.6	Vyhovuje

Tab. 37 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm

Zvětšením tloušťky průřezu ale zachováním původní výztuže vyhovuje výpočet pro všechny varianty. Alternativní vylepšení průřezu vede na maximální využití **93,2 %** pro variantu bez štoly (**5. variantu**) a nejmenší využití **61,3 %** pro **3. variantu**. Oproti předchozí úpravě je tedy průřez více namáhán neboli více využit.



### 5.11.3 Zhodnocení posouzení primárního ostění

Pro posouzení primárního ostění byl stanoven výchozí průřez o rozměrech **1000 x 250 mm** ze stříkaného betonu **SB25 J2**. Který je vyztužen je ocelovými sítěmi **150x150x8 mm** u horního i spodního povrchu betonu s krytím výztuže **50 mm**.

Pro posudek kaloty tunelu **VYHOVĚLY všechny výpočetní varianty**.

Pro výpočet výchozího průřezu pro fázi celého tunelu vyhověly **pouze 3 z 5 variant**.

Vyhovující variantou byl buďto tunel s **2. variantou štoly** (soudkovitý tvar, u horní klenby kaloty) nebo **3. variantou štoly** (podkovovitá, cca uprostřed kaloty). Z nichž méně namáhaná byla **Variantá 3**.

Aby bylo dosaženo vyhovění u všech variant, musel by být průřez buďto:

- a) **vyztužen hustší ocelovou sítí s profilem 10 mm o rozteči 100 mm**
- b) **zvětšen o 5 cm**

Reálně to pro možnosti zesílení průřezu znamená:

- a) **zvýšení spotřeby oceli** na segment ostění o rozměrech 1x1 m z **10,53 kg** (2x 150x150x8 mm) na **24,65 kg** (2x 100x100x10 mm), což je o **235 % více**
- b) **zvýšení spotřeby betonu** na plochu ostění 1x1 m o **0,05 m<sup>3</sup>**, což je o **20 % více**

V Tab. 38 se pak nachází přehled výsledků posouzení primárního ostění pro jednotlivé varianty výpočtu a navržené průřezy ostění.

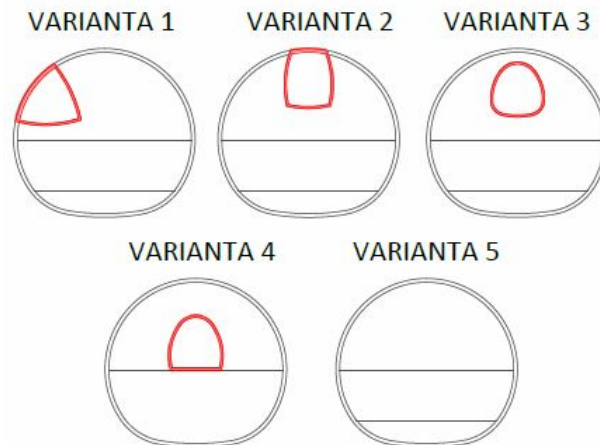
VARIANTA VÝPOČTU	NAVRŽENÝ PRŮŘEZ - POSUDEK CELÝ TUNEL			
	tl. 250 mm 2xØ8 á 150	tl. 250 mm 2xØ8 á 100	tl. 250 mm 2xØ10 á 100	tl. 300 mm 2xØ8 á 150
111	<b>Nevyhovuje</b>	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
	Využití 108,1 %	Využití 96,3 %	Využití 81,8 %	Využití 84,8 %
211	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
	Využití 88,9 %	Využití 78,8 %	Využití 66,5 %	Využití 70,0 %
311	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
	Využití 77,7 %	Využití 68,6 %	Využití 57,7 %	Využití 61,3 %
411	<b>Nevyhovuje</b>	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
	Využití 101,1 %	Využití 88,7 %	Využití 74,1 %	Využití 79,8 %
511	<b>Nevyhovuje</b>	<b>Nevyhovuje</b>	Vyhovuje	Vyhovuje
	Využití 118,1 %	Využití 103,9 %	Využití 87,0 %	Využití 93,2 %

Tab. 38 Výsledky posouzení primárního ostění

## 5.12 Závěry numerických výpočtů

Z výsledků z výpočetního programu *GEO 5 – MKP* lze vyvodit zřejmý vliv realizace štoly na následnou ražbu tunelu.

*Pozn.: pro orientaci ve variantách umístění štoly je zde znovu umístěn obrázek s jednotlivými variantami a pro přehlednost výsledků jsou zde znovu umístěny nejzajímavější grafy*



Obr. 18 Varianty umístění štoly v profilu tunelu

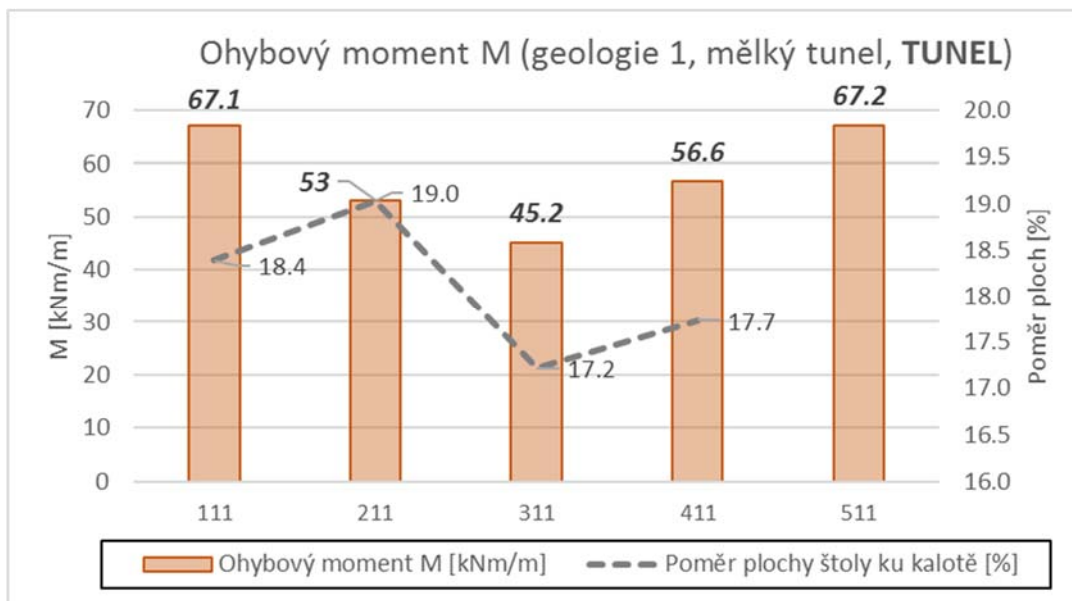
### 5.12.1 Varianty výpočtů pro tunely mělce pod terénem a první geologii

#### A) Vnitřní síly

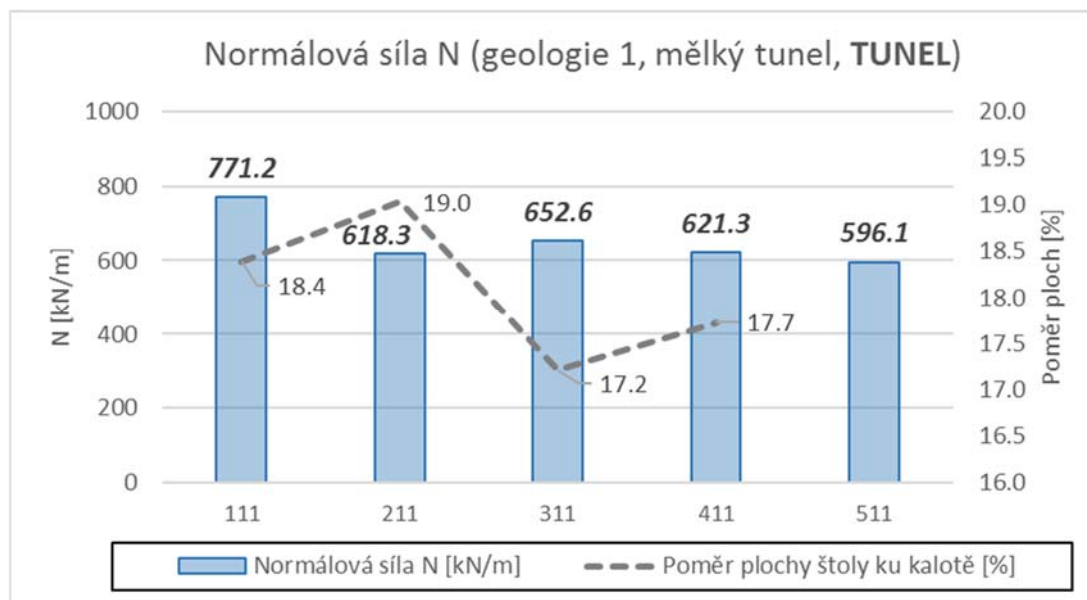
Výrazné přispění štoly je možné pozorovat na průbězích vnitřních sil, což je následně ukázáno na posudcích primárního ostění na mezní stav únosnosti. Ve fázi kaloty vzniká výrazný nepoměr ve velikosti ohybového momentu (dvojnásobek až trojnásobek zbylých hodnot) Varianty 1 oproti ostatním čtyřem. Také normálová síla je pro tuto variantu větší oproti ostatním (o 12 až 19 % z maximální hodnoty). Jelikož ale hodnoty vnitřních sil ve fázi celého tunelu tyto hodnoty převyšují, nejsou tyto nadměrné hodnoty tolik podstatné. To co nás primárně zajímá, je fáze uzavření ostění tunelu.

Nejvíce namáhanou variantou na ohybový moment se stává téměř shodně **Varianta 5 a 1** (hodnoty 67,2 a 67,1 kNm). Nejméně namáhaná je **Varianta 3** s hodnotou 45,2 kNm. Na normálové síly, je oproti ostatním výrazněji namáhaná **Varianta 1** (771,2 kN). Zbylé čtyři varianty jsou si dosti podobné a maximálně se od sebe liší o 56,5 kN.

Praktičtější pohled na porovnávání pak přináší posouzení primárního ostění na kombinaci tlaku a ohybu ve fázi dokončení tunelu. Pro první (výchozí) průřez vyhověly pouze Varianty 2 a 3. Díky úpravě průřezu ve formě hustších ocelových sítí vyhověly i zbylé dvě varianty se štolami, avšak **Varianta 5 nikoliv**. Aby vyhověla i **Varianta 5**, muselo dojít jak k zahuštění roztečí, tak i ke zvětšení profilu výztuže.



Graf 5 Ohybový moment (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)



Graf 6 Normálová síla (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)

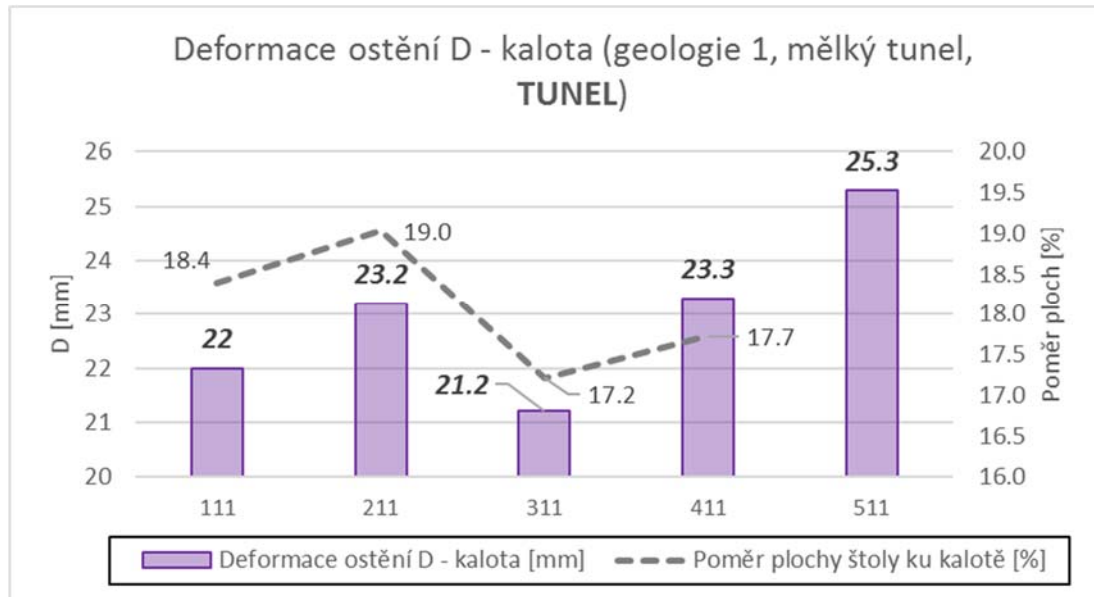
## B) Deformace a pokles terénu

U modelů se štolami vyšly menší hodnoty, oproti samotnému tunelu, jak u [radiální deformace primárního ostění](#), tak u [poklesu povrchu terénu](#). Tento jev je zřejmě zapříčiněn fungováním štoly jako dalšího dílčího členění profilu tunelu. Rozdíl deformací v *absolutních hodnotách* nebyl nijak extrémní, jednalo se pouze o jednotky milimetrů. Avšak pokud jsou tyto rozdíly deformací prezentovány **procentuálně**, vzhledem k maximálním hodnotám deformací, dostáváme se na hodnoty od **6 do 20 %**.

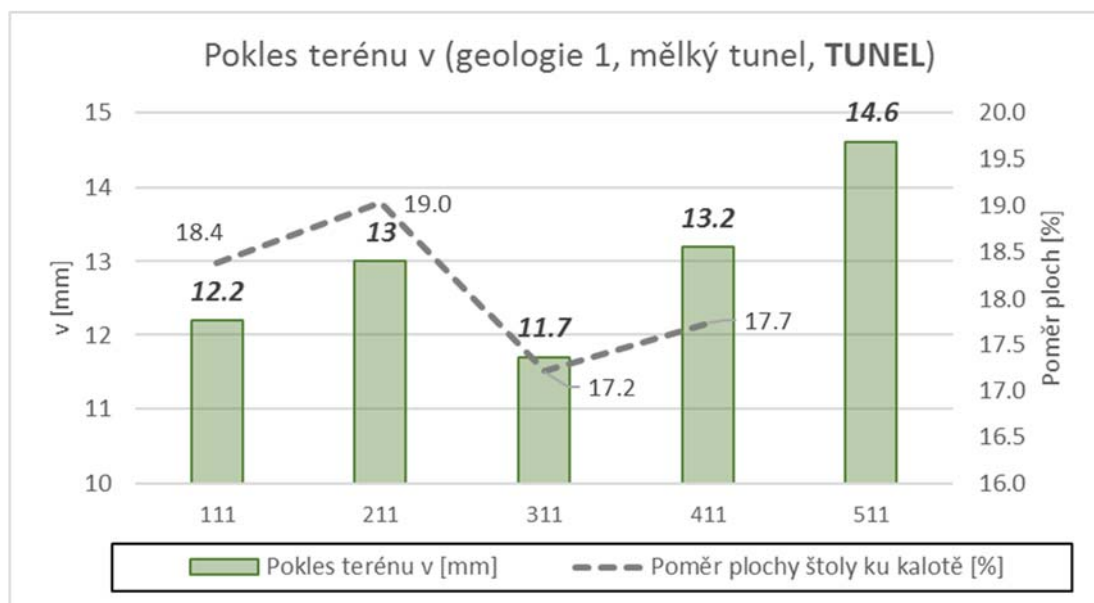
Co se deformací týče, nejlepších výsledků bylo dosaženo u **Varianty štoly 3** a těsně za ní u **Varianty 1**, poté skoro nastejno vyšly **Varianty 2 a 4** a naposled **Varianta 5**.

Jako nejlepší z navržených variant, z hlediska deformací i namáhání, tak vychází **Varianta 3** (štola podkovovitého tvaru, přibližně v polovině výšky kaloty).





Graf 7 Deformace ostění – kalota (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)



Graf 9 Pokles terénu (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)



### 5.12.2 Zbylé tunely mělce pod terénem

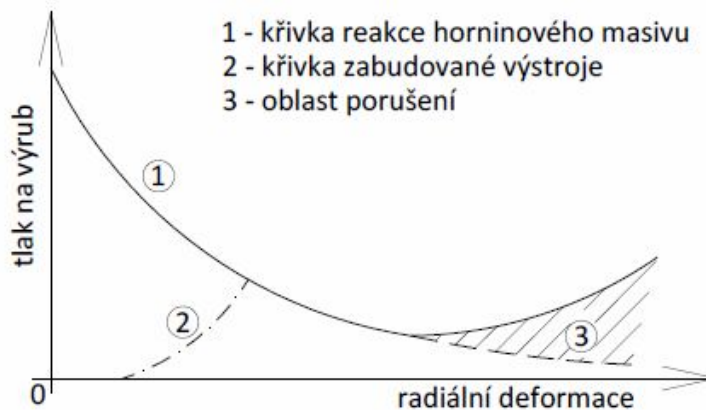
**Pozn.:** čím vyšší číslo typ geologie má, tím lepší jsou jeho parametry

#### A) Vnitřní síly

U ohybových momentů je jasně patrné, že se zlepšující se geologií jejich **hodnoty klesají**.

Zato normálové síly nemají jasně daný vývoj, ale v zásadě se dá říct, že se jejich hodnoty se zlepšující se geologií zvětšují. Kromě rozdílu hodnot mezi **2. a 3. geologií**, zde s lepší geologií hodnoty normálových sil **naopak klesly** (až na jednu hodnotu u **Varianty 5 ve fázi tunelu**). Zvýšení normálových sil odpovídá teorii dle Fenner-Pacherovy křivky (Obr. 28). Geostatická napjatost je stále stejná ale při menší deformaci ostění dojde k zvýšení tlaku na výrub, tudíž i k nárůstu normálových sil.

Vnitřní síly vycházejí u 2. a 3. geologie největší pro **Variantu 1** a druhá je **Varianta 5**. U 4. geologie vyčnívá pouze normálová síla **Varianty 1**, ostatní vnitřní síly se od sebe výrazněji neliší.



Obr. 28 Fenner-Pacherova křivka

#### B) Deformace a pokles terénu

Jak u deformací ostění, tak u poklesu terénu jasně platí, že se zlepšující se geologií hodnoty **klesají**. S postupným zlepšením geologie klesá i rozdíl mezi výsledky jednotlivých variant. Vývoj hodnot je ve většině případů stejný jako u prvního typu geologie a tudíž největších deformací dosahuje **Varianta 5**.



### 5.12.3 Tunely hluboko pod terénem

#### A) Vnitřní síly

U ohybových momentů stejně jako u mělkých tunelů hodnoty se *zlepšující se geologií klesají*. S menší výjimkou, a to, že u **geologie 2 a 3** nejsou maximální hodnoty ohybových momentů vždy ve fázi celého tunelu, ale také ve fázi kaloty. U nejhorší *geologie 1* dosahuje největších hodnot **Varianta 5**, u *geologie 2 a 3* je to **Varianta 1** a u *geologie 4* je to pak **Varianta 4**. Kromě výsledků pro *geologii 1* a výraznějších maximum *Varianty 1* u *geologie 2 a 3*, se od sebe hodnoty ostatních variant liší méně výrazněji.

Normálové síly dosahují **maximálních hodnot** pro nejhorší **geologii 1**. S *geologií 2 nebo 3* hodnoty sil, oproti první geologii, *klesají*. Když mezi s sebou porovnáme *2. a 3. geologii*, zjistíme, že hodnoty sil buď to střídavě *klesají*, nebo rostou. Pro **nejlepší geologii 4** vznikají ve fázi kaloty *druhé nejvyšší hodnoty sil*. Zato ve fázi celého tunelu pak klesnou na **nejnižší hodnoty** pro všechny modely hlubokých tunelů.

Vnitřní síly vycházejí u *2. a 3. geologie* největší pro **Variantu 1** a druhá je **Varianta 5**. U *4. geologie* vyčnívá pouze normálová síla **Varianty 1**, ostatní vnitřní síly se od sebe výrazněji neliší.

#### B) Deformace a pokles terénu

Stejně jako u mělkých tunelů, i zde jasně platí, že se *zlepšující se geologií* hodnoty deformací ostění a poklesu terénu klesají. Oproti tunelům mělce pod terénem se od sebe absolutní hodnoty deformací liší výrazně méně. Ve většině případů dosahuje největších deformací **Varianta 5 a 3**. Oproti mělkým tunelům se u horších typů geologie výrazně zvýšila deformace ostění ve dně tunelu.



## 6 VERIFIKACE VÝPOČTENÝCH HODNOT SKUTEČNÝCH NA VÝSLEDČÍCH GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU

### 6.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá vytvořením výpočetního modelu MKP, podle předlohy reálné stavby a také s reálnými naměřenými hodnotami monitoringu. Ve výpočtu jsou současně provedeny dvě tunelové trouby **Tunelového komplexu Blanka** (v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka) ve vzdálenosti přibližně 40 m od portálu, ve staničení 7,225 km (jižní tunelové trouby). V levé, resp. jižní tunelové troubě (**označena jako JTT**) je zároveň umístěna průzkumná štola. Ta je vyražena jako první, po ní je realizována ražba pravé, resp. severní tunelové trouby (**označena jako STT**) a v poslední řadě je realizována jižní tunelová trouba.

Pro vytvoření modelu byly použity následující podklady: *podélný řez s geologií, příčný řez tunelových trub, příčný řez průzkumné štoly*, výsledky deformací *primárního ostění štoly a JTT (z konvergenčních měření)*, výsledky deformací horninového prostředí v nadloží tunelů (z *extenzometrů* pro STT a JTT, které jsou umístěny v osách jednotlivých tunelů). Po vyhodnocení tohoto výpočtu, jsou provedeny ještě **4 další výpočty**. V každém z nich je reálná štola vyměněna za jednu z předešlých **variant štoly** z kapitoly **5 NUMERICKÉ VÝPOČTY**. Následně je porovnán vliv jiného tvaru a umístění průzkumné štoly na průběh vnitřních sil a deformace tunelu i horninového prostředí.

### 6.2 Použitý software

Pro výpočetní modely byl použit, stejně jako pro předchozí výpočty, program *GEO5 - MKP* od české společnosti Fine spol. s r.o. využívající metodu konečných prvků.

### 6.3 Příčný řez tunelů a štoly

Do výpočetních modelů je použit profil tunelu jako v **kapitole 5 NUMERICKÉ VÝPOČTY**, pouze se změnou tloušťky ostění. To se z tloušťky 250 mm rozšířilo na **300 mm**. Tvar tunelu vychází z dvoupruhové tunelové trouby **Tunelového komplexu Blanka** (v úseku Špejchar – Pelc-Tyrolka). Profil tunelu je horizontálně členěn na tři části: na kalotu, opěří a dno. Jeho teoretická plocha výrubu je **110,36 m<sup>2</sup>**. Na *Obr. 29* je patrný okótovaný příčný řez tunelu, včetně popisu dílčí i celkové plochy výrubu.

Na *Obr. 30* jsou zobrazeny navržené varianty profilů štol. Oproti **kapitole 5** se změnilo pouze štoly 1 a 2. U těchto dvou variant taktéž došlo k rozšíření částí ostění, které jsou součástí primárního ostění tunelu. Pro jejich hrubé porovnání je u každé varianty napsána i plocha výrubu.

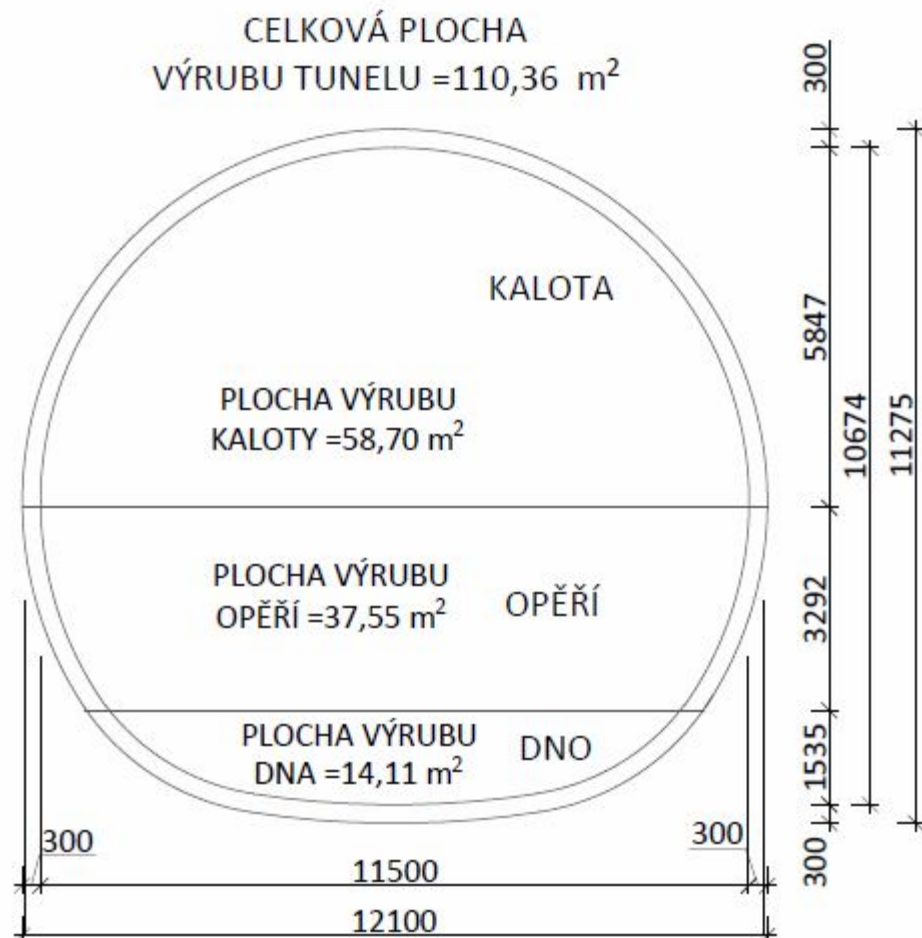
**1) První varianta** štoly má trojúhelníkový profil a levý bok jejího ostění se stává součástí primárního ostění tunelu. Návrh tvaru štoly vychází z tvaru průzkumné štoly Královopolského tunelu Velkého městského okruhu v Brně.

**2) Druhá varianta** štoly má soudkovitý tvar a horní klenba štoly je též součástí primárního ostění tunelu. Návrh tvaru štoly vychází z tvaru průzkumné štoly tunelu Slivenec – Lahovice (*SOKP 514*).

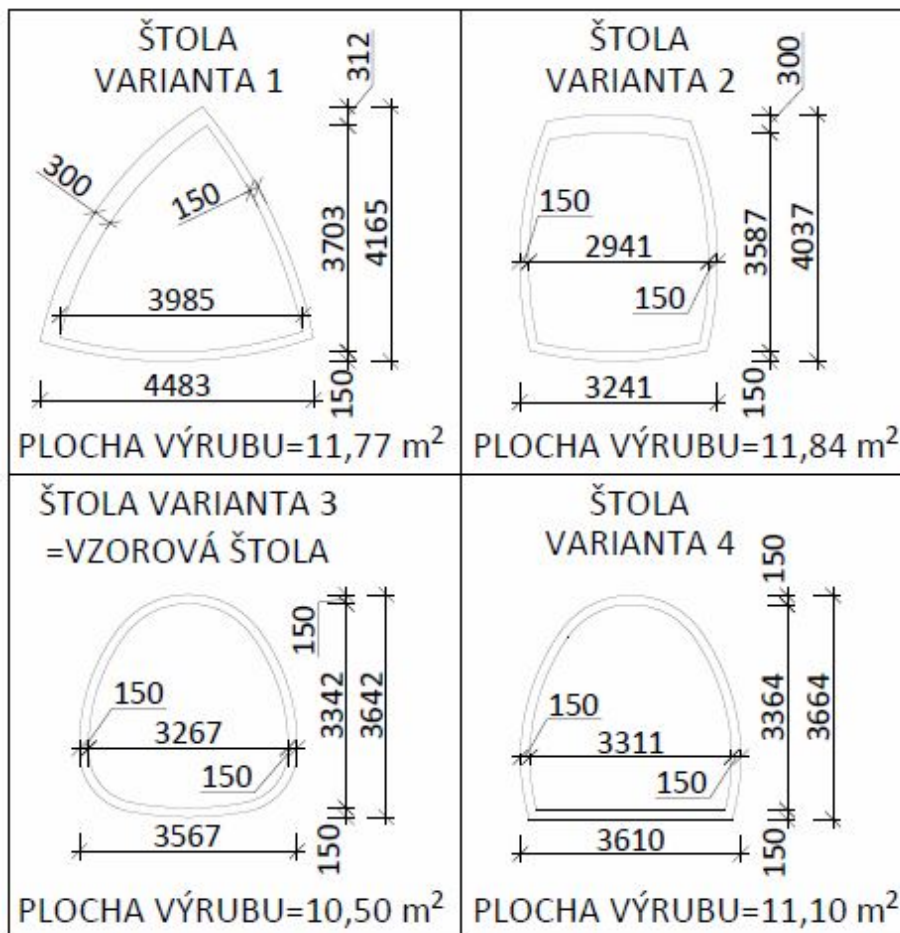


**3) Třetí varianta** má podkovitý tvar a u této varianty je primárního ostění během ražby kaloty tunelu vybouráno. Podkladem pro tvar štoly byla půzkumná štola pro Tunelový komplex Blanka. *Tato varianta je totožná se štolou ve vzorovém výpočtu.*

**4) Čtvrtá varianta** má také podkovitý tvar, ale u této varianty není spodní klenba obloukovitá. Jako u třetí varianty je primárního ostění během ražby kaloty tunelu vybouráno. Navržený tvar štoly se blíží tvaru průzkumné štoly pro tunel Mrázovka, ta však měla větší poměr šířky ku výšce výrubu.



Obr. 29 Příčný řez tunelu – model Blanka



Obr. 30 Příčné řezy štol – model Blanka

## 6.4 Geologické poměry

Skalní podloží zájmového území je tvořeno horninami severovýchodní části ordovické barrandienské synklinály. Horniny vznikly ukládáním psefitického, aleuritického a pelitického materiálu v sedimentační pánvi se značně mobilním dnem i pobřežní čarou. 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.

Výpočet ve staničení **km 7,225 (JTT)** se nachází v litologickém typu **dobrotivských břidlic**. Horniny tohoto litologického typu, které se nacházejí v místě výpočtu, jsou **písčité břidlice** s ojedinělými lavicemi jemnozrnných křemenců a křemenných pískovců. [59] [17]

## 6.5 Materiálový model zemin a hornin

Aby bylo dosaženo požadovaných výsledků, byl pro výpočty v této kapitole použit nelineární materiálový model **Mohr-Coulomb (MC)**. Jde o izotropní pružný-ideálně plastický model bez zpevnění. V předešlé podkapitole **5.4 Materiálový model zemin a hornin** je podrobně popsán materiálový model Modifikovaný Mohr-Coulomb (**MMC**). Teorie popsaná v této podkapitole je aplikovatelná na oba materiálové modely, jelikož



vstupní parametry obou materiálových modelů se od sebe neliší. Jedinými rozdíly jsou, že MMC zlepšuje konvergence výpočtu a vykazuje tužší odezvu. [57]

## 6.6 Parametry zemin a hornin

Zde se nachází tabulka s geotechnickými parametry potřebnými k výpočtu. Geologie výpočtu je rozdělena do **9 vrstev**. První dvě vrstvy obsahují kvartérní zeminy. Následující vrstvy již reprezentují horninové prostředí. Jelikož profil povrchu není rovinný, ve výpočtech je uvažováno s průměrnou tloušťkou jednotlivých vrstev. Ty jsou vypsány v posledním pravém sloupci tabulky.

stratigrafický útvar		číslo vrstvy	symbol vrstvy	geologická charakteristika	obj. tíha v přirozeném uložení $\gamma$ [kN.m <sup>-3</sup> ]	Přetvárné parametry				Smyk. pevnost		třída podle ČSN 73 1001	prům. mocnost vrstvy [m]
						modul přetvárnosti $E_{def}$ [MPa]	modul pružnosti $E$ [MPa]	modul přitížení/odtížení $E_{ur}$ [MPa]	Poissonovo číslo $\nu$ [-]	soudržnost $c_{ef}$ [kPa]	úhel vnitř. tření $\varphi_{ef}$ [°]		
<b>KVARTÉR HOLOCÉN</b>	holocénní náplavy	1	FL-H	hlíny, místy měkké	19.00	6.0	12.0	18.0	0.40	10	20	F3	2.73
<b>KVARTÉR PLEISTOCÉN</b>	fluviální sedimenty	2	FL	písky s příměsí jemnozrné zeminy, středně ulehle	20.50	25.0	50.0	75.0	0.35	0	34	S2	1.94
<b>PALEO-ZOIKUM</b>	břidlice	3	RZL	rozložené	21.00	8.0	15.0	24.0	0.40	15	21	F6	0.78
		4	ZVT	silně zvětralé	22.50	20.0	40.0	60.0	0.36	15	23	R6	1.22
<b>ordovik,</b>		5	NVT	navětralé	24.50	60.0	120.0	180.0	0.32	30	29	R5	3.03
<b>souvrství</b>	písčité až	6	ZDR A	zdravé - mocnost 0 až 5 m	25.50	115.0	235.0	345.0	0.30	40	30	R4	5.00
<b>dobrotivské</b>	drobové	7	ZDR B	zdravé - mocnost 5 až 10 m	25.75	170.0	325.0	510.0	0.29	55	31	R3	5.00
		8	ZDR C	zdravé - mocnost 10 až 15 m	26.00	225.0	415.0	675.0	0.28	70	32	R3	5.00
		9	ZDR D	zdravé - od mocnosti 15 m	26.50	385.0	700.0	1155.0	0.27	100	34	R3	-

Tab. 39 Geologie – dobrotivské břidlice (model Blanka)



## 6.7 Primární ostění

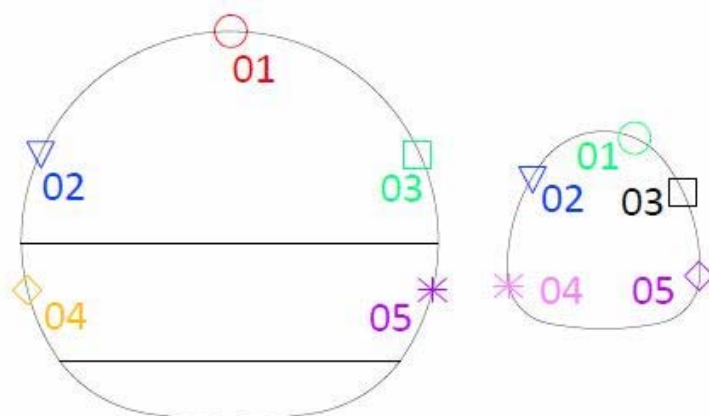
Tloušťka primárního ostění je u obou tunelů 300 mm a u průzkumné štoly 150 mm. Primární ostění tunelu i štoly je provedeno ze stříkaného betonu SB 25 (C20/25) J2. Pro zavedení vlivu tvrdnutí betonu byly v modelu uvažovány dvě stádia pevnosti stříkaného betonu, mladý a starý (vzrálý) SB, stejně jako u předešlých výpočetních modelů.

Podrobná teorie k primárnímu ostění je popsána v předešlé podkapitole **5.6 Primární ostění**.

## 6.8 Monitoring – extenzometry, svislá deformace primárního ostění

Podkladem pro výpočetní model jsou také výsledky monitoringu. Jsou to svislé deformace primárního ostění **štoly a JTT**, změřené v konvergenčních profilech a také dva extenzometry, umístěné v osách tunelů (*JTT* i *STT*), které měří posuny horninového prostředí ve směru osy vrtu.

Poklesy primárního ostění jsou u tunelu i štoly měřeny v konvergenčních profilech v 5 bodech, jejich rozmístění je znázorněno na *Obr. 31*. Naměřené hodnoty pro tunel i štolu jsou sepsány v *Tab. 40*. Vůči referenční pozici jednotlivých bodů znamenají záporné hodnoty pokles směrem dolů a kladné naopak nahoru. Obě reálná konvergenční měření jsou dokladována v samostatných přílohách 9 a 10.



*Obr. 31 Umístění bodů konvergenčních profilů tunelu a štoly*

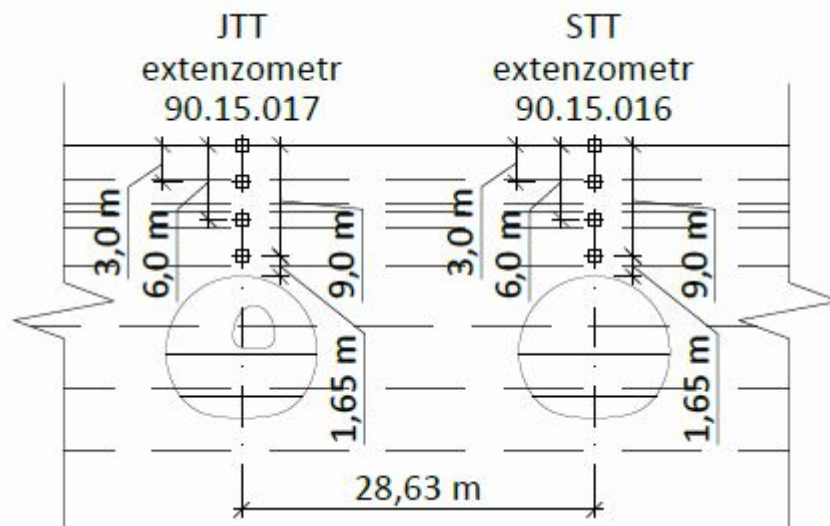
SVISLÁ DEF. PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ		
BOD KONV. PROFILU	MONITORING TUNEL	MONITORING ŠTOLA
	[mm]	[mm]
1	-21.8	-3.0
2	-19.9	-4.0
3	-27.3	-3.0
4	-7.4	+1.5
5	-6.3	-4.0

*Tab. 40 Hodnoty konvergenčních měření*





Dostupné extenzometry jsou víceúrovňové a měří deformace ve **4 hloubkových úrovních**, na povrchu terénu, v hloubce 3, 6 a 9 m. Ve výpočetním modelu dělí poslední úroveň extenzometru od hrany ostění 1,65 m. Extenzometr nad **JTT** je označen dle podkladu jako 90.15.017 a extenzometr nad **STT** jako 90.15.016. Pro porovnávání jsou z reálných měření převzaty poklesy s největšími hodnotami. Hodnoty z reálného měření se nacházejí v **Tab. 41**. Obě reálná extenzometrická měření jsou dokladována v samostatných přílohách 7 a 8.



Obr. 32 Extenzometry - model Blanka

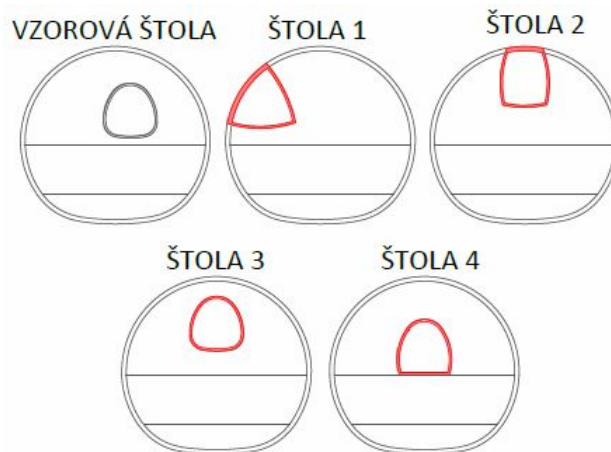
EXTENZOMETRY		
ÚROVEŇ	JTT 90.15.017	STT 90.15.016
EXTENZOMETRU	pokles [mm]	pokles [mm]
povrch t.	34.9	18.1
3 m	37.3	19.5
6 m	39.8	23.6
9 m	47.4	26.5

Tab. 41 Hodnoty extenzometrických měření



## 6.9 Varianty výpočtů

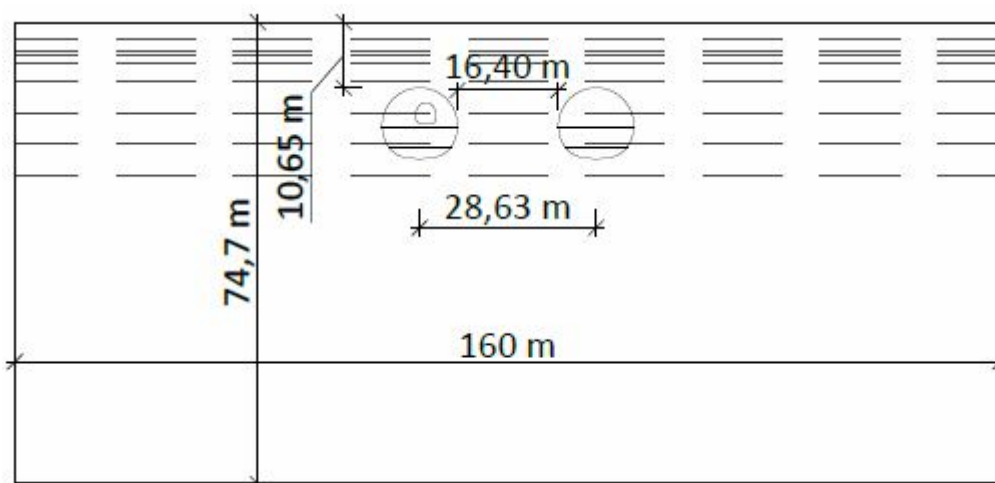
V úvodu již bylo zmíněno, že tato kapitola obsahuje celkem **5 výpočtů**. Nejprve je jako první proveden výpočet se vzorovou štolou, který obsahuje reálný tvar a umístění štoly. Po vyhodnocení vzorového výpočtu, jsou provedeny zbylé 4 výpočty. V každém z nich je reálná štola vyměněna za jednu z předešlých **variant štoly** z kapitoly 5 NUMERICKÉ VÝPOČTY. Předlohou pro štola č. 3 byla průzkumná štola Tunelového komplexu Blanka, tudíž jsou štola č. 3 a štola vzorového výpočtu tvarově totožné, pouze se liší umístěním v profilu tunelu.



Obr. 33 Varianty štoly – model Blanka

## 6.10 Rozhraní prostoru výpočetního modelu

Šířka modelového prostoru je 120 m a spodní hranice modelu je v hloubce 50 m pod posledním rozhraním geologických vrstev. Dostáváme tak velikost modelu 120x74,7 m. Výška nadloží obou tunelů je 10,65 m. Mezi jednotlivými tunelovými troubami je mezera o světlosti 16,4 m, osově jsou od sebe vzdálené 28,63 m.

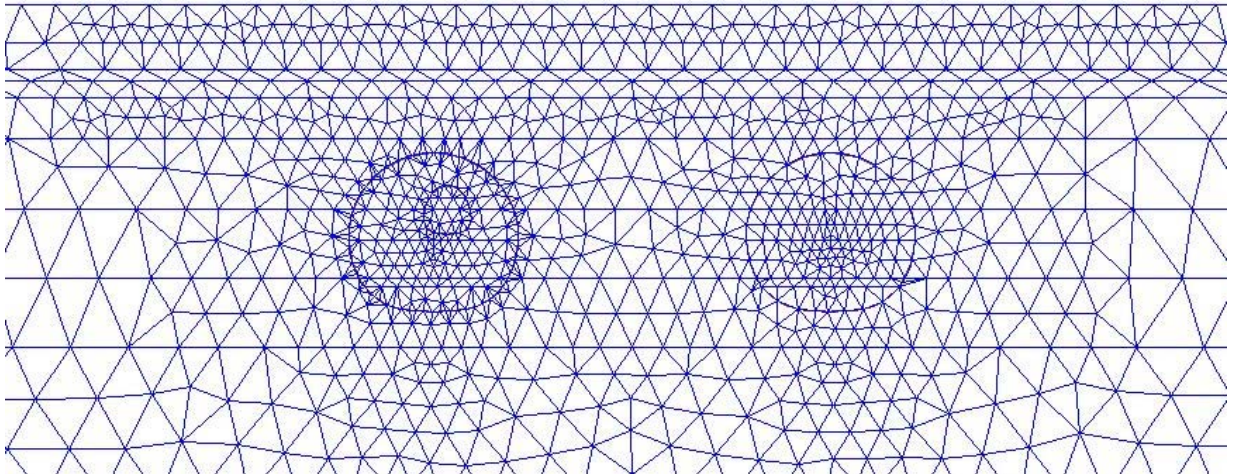


Obr. 34 Rozhraní - model Blanka



### 6.11 Síť konečných prvků

Pro přesnější výsledky je na linii ostění štoly a levé tunelové trouby (*JTT*) zvoleno zahuštění s krokem 0,5 m a dosahem 1 m. Na střed spodní hrany kaloty obou tunelů je umístěn bod, z něhož je síť zahuštěna pomocí kružnice s krokem 0,5 m a dosahem 25 m. V nadloží tunelu jsou ručně umístěny dvě horizontální zahušťovací linie s krokem 1 m a délkou 70 m. Tímto je tedy zájmová oblast pokryta řidší sítí a základní délka hrany prvků může být nastavena na 4 m. Vzniká tak síť s necelými 10000 uzly.



Obr. 35 Síť konečných prvků - model Blanka

### 6.12 Výpočetní fáze

Princip a posloupnost výpočetních fází jsou stejné jako u předešlých výpočtů v kapitole 5. Podrobně je teorie ohledně výpočtu popsána v podkapitole 5.9 **Výpočetní fáze**.

Jedinou významnou změnou oproti předešlým výpočtům je změna hodnoty koeficientu na  $\beta = 0,55$ . To odpovídá rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55. Neboli v **první fázi** ražby působí 45 % zatížení do výrubu, 55 % zůstává v hornině. A ve **druhé fázi** ražby působí zbylých 55 % zatížení do výrubu.

#### Stručný popis výpočtových fází:

Fáze 1 – výpočet primární napjatosti

Fáze 2 – výrub štoly v profilu *JTT* (sekundární napjatost), rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55

Fáze 3 – primární ostění štoly (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (55 %)

Fáze 4 – výrub kaloty *STT*, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění štoly (**starý beton**)

Fáze 5 – primární ostění kaloty *STT* (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (55 %)

Fáze 6 – výrub opěří *STT*, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění kaloty *STT* (**starý beton**)

Fáze 7 – primární ostění opěří *STT* (**mladý beton**), zbylé zatížení do výrubu (55 %)

Fáze 8 – výrub dna *STT*, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění opěří *STT* (**starý beton**)



- Fáze 9 – primární ostění dna **STT (mladý beton)**, zbylé zatížení do výrubu (55 %)
- Fáze 10 – odstranění prim. ostění štoly a případně zachování jeho části, která bude součástí prim. ostění tunelu (*VARIANTY štoly 1 a 2*), výrub kaloty **JTT**, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění dna **STT (starý beton)**
- Fáze 11 – primární ostění kaloty **JTT (mladý beton)**, zbylé zatížení do výrubu (55 %)
- Fáze 12 – výrub opěří **JTT**, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění kaloty **STT (starý beton)**
- Fáze 13 – primární ostění opěří **JTT (mladý beton)**, zbylé zatížení do výrubu (55 %)
- Fáze 14 – výrub dna **JTT**, rozdělení exkavačních sil v poměru 45:55, zesílení prim. ostění opěří **JTT (starý beton)**
- Fáze 15 – primární ostění dna **JTT (mladý beton)**, zbylé zatížení do výrubu (55 %)

### 6.13 Výsledky výpočetních modelů

Výsledky výpočtů jsou prezentovány ve stejném duchu jako v **kapitole 5 NUMERICKÉ VÝPOČTY**. Výsledky jsou porovnány ve *dvou vybraných fázích* výpočtu. *První* je Fáze č. 11, ve které dojde k instalaci primárního ostění kaloty (**mladý beton**) v **JTT** a k následnému zbylému zatížení do výrubu. *Druhou* fází je Fáze č. 15, ve které je dokončeno uzavření primárního ostění celého tunelu.

Nejprve bylo provedeno “naladění” vzorového výpočtu na naměřené hodnoty geotechnického monitoringu. Bohužel se nepodařilo vytvořit výpočet tak, aby se přiblížil jak reálným hodnotám z extenzometrických měření, tak i deformací primárního ostění (složitě geologické podmínky). Přednost při tvoření výpočtu dostaly hodnoty extenzometrických měření z důvodu menšího nebezpečí chybovosti při měření oproti konvergenčním měřením. S hodnotami extenzometrických měření vzorového výpočtu jsou porovnány i zbylé 4 výpočty. Toto porovnání je zpracováno ve formě tabulky.

Dále jsou pro porovnání výsledků zvoleny 4 veličiny a to: ohybový moment  $M$ , normálová síla  $N$ , radiální deformace ostění  $D$ , pokles terénu  $V$  (*Pozn.: hodnoty výsledků jsou v absolutních hodnotách v jednotkách na 1 m délky tunelu; normálové síly jsou v tlaku; ohybové momenty táhnou vlákna vnitřní strany ostění; deformace ostění je ve fázi tunelu rozdělena do dvou grafů, na kalotu a dno*).

Výsledky 4 veličin jsou prezentovány na grafech, kdy v jednom grafu jsou zahrnuty všechny varianty výpočtu pro jednu konkrétní veličinu a buďto pro *Fázi č. 11 (kalota JTT)* nebo *Fázi č. 15 (dokončená JTT)*. Celkem tak vzniká 9 grafů.

Stejně tak jako v *kapitole 5*, i zde je součástí každého grafu je ještě jedna veličina, a to Poměr plochy štoly ku kalotě, která slouží k přibližnému porovnání jednotlivých štol. Jedná se o hodnoty plochy výrubu z výpočetních modelů. Jelikož ostění ve výpočtech je modelováno na střednici a ne v celé tloušťce, jsou tyto plochy o něco málo menší než reálné teoretické výrubu. Avšak pro porovnání výsledků tato skutečnost nemá významný vliv. Procentuální poměr se totiž oproti reálným výrubům u štol zmenší o hodnotu v rozmezí 1 až 1,6 procent a mezi štolami je vzájemný rozdíl max. 0,6 %, což odpovídá 0,006 m<sup>2</sup> (viz *Tab. 42*).



Varianta	Plocha výrubu REÁLNÁ [m <sup>2</sup> ]	Poměr ploch výrubu Štola : Kalota [%]	Plocha výrubu VÝPOČET [m <sup>2</sup> ]	Poměr ploch výrubu Štola : Kalota [%]	Rozdíl poměrů [%]
VZOR. ŠTOLA	10.50	17.9	9.65	17.3	0.6
ŠTOLA 1	11.77	20.1	10.43	18.7	1.4
ŠTOLA 2	11.84	20.2	10.68	19.1	1.0
ŠTOLA 3	10.50	17.9	9.65	17.3	0.6
ŠTOLA 4	11.10	18.9	9.94	17.8	1.1
KALOTA	58.70	-	55.85	-	-

Tab. 42 Plocha výrubu štol a kaloty tunelu – model Blanka

### 6.13.1.1 Extenzometrická měření

EXTENZOMETR JTT 90.15.017						
ÚROVEŇ EXTENZOMETRU	MONITORING pokles [mm]	VZOR. ŠTOLA pokles [mm]	ŠTOLA 1 pokles [mm]	ŠTOLA 2 pokles [mm]	ŠTOLA 3 pokles [mm]	ŠTOLA 4 pokles [mm]
povrch t.	<b>34.9</b>	34.0	30.2	34.0	29.4	35.3
3 m	<b>37.3</b>	37.8	33.8	37.9	32.9	39.3
6 m	<b>39.8</b>	40.9	36.7	41.0	35.8	42.4
9 m	<b>47.4</b>	43.5	39.3	43.6	38.3	45.0

Tab. 43 Hodnoty extenzometru JTT

EXTENZOMETR STT 90.15.016						
ÚROVEŇ EXTENZOMETRU	MONITORING pokles [mm]	VZOR. ŠTOLA pokles [mm]	ŠTOLA 1 pokles [mm]	ŠTOLA 2 pokles [mm]	ŠTOLA 3 pokles [mm]	ŠTOLA 4 pokles [mm]
povrch t.	<b>18.1</b>	20.6	20.8	20.8	20.8	20.7
3 m	<b>19.5</b>	23.3	23.5	23.5	23.4	23.4
6 m	<b>23.6</b>	25.7	26.0	25.9	25.9	25.9
9 m	<b>26.5</b>	28.2	28.4	28.4	28.4	28.4

Tab. 44 Hodnoty extenzometru STT

Zde se nachází porovnání *extenzometrických měření* v poslední fázi výpočtu. Snahou bylo co nejvíce přiblížit hodnoty výpočtu reálně naměřeným hodnotám. Při vytváření výpočetního modelu měly přednost hodnoty měření pro **JTT** (*levý tunel*), jelikož v profilu tohoto tunelu je umístěna průzkumná štola.

U extenzometru **JTT** (Tab. 43) se vzorový výpočet od reálného měření liší, pro první tři úrovně měření, pouze od 0,5 do 1,1 mm. Poslední úroveň, 9 m pod povrchem terénu, se liší o 3,9 mm. Mezi jednotlivými měřeními jde o odchylku -1,3 % až maximálně 8,2 %.

U extenzometru **STT** (Tab. 44) se vzorový výpočet od reálného měření liší od 1,7 do 3,8 mm. Mezi jednotlivými měřeními jde o odchylku -6,6 % až maximálně 19,6 %. Jelikož je upřednostňováno měření pro **JTT**, u **STT** nebylo dosaženo stejné přesnosti, ta ale není pro prezentované výsledky nutná.



V obou tabulkách se také nacházejí hodnoty ostatních výpočtů. Výsledky u **STT** (*pravého tunelu*) se v zásadě nemění a jsou téměř stejné. Lze tedy konstatovat, že změna tvaru a umístění štoly nemá na ražbu *pravého tunelu* vliv.

Naopak u **JTT** jsou výsledky zajímavější. U varianty **štoly 4** došlo ke zvýšení poklesů průměrně o **1,5 mm**. **Štola 2** vykazuje téměř stejné hodnoty jako vzorový výpočet, rozdíl je *pouze 0,1 mm*. Nejzajímavější výsledky jsou u variant **štoly 1 a 3**, kde došlo ke snížení hodnot poklesů. U **štoly 1** je tento pokles *od 3,8 do 4,2 mm*. Největší snížení je u varianty **štoly 3 od 4,6 do 5,2 mm**. Tento výsledek je o to podstatnější, jelikož **štola 3** je totožná se **štolou vzorového výpočtu** a pouze se změnila její poloha v profilu kaloty. Štola ve **vzorovém výpočtu** je umístěna blízko dna kaloty a více u pravé strany ostění, zatímco **štola 3** se posunula do osy tunelu a přibližně do poloviny výšky kaloty.

#### 6.13.1.2 Svislá deformace primárního ostění

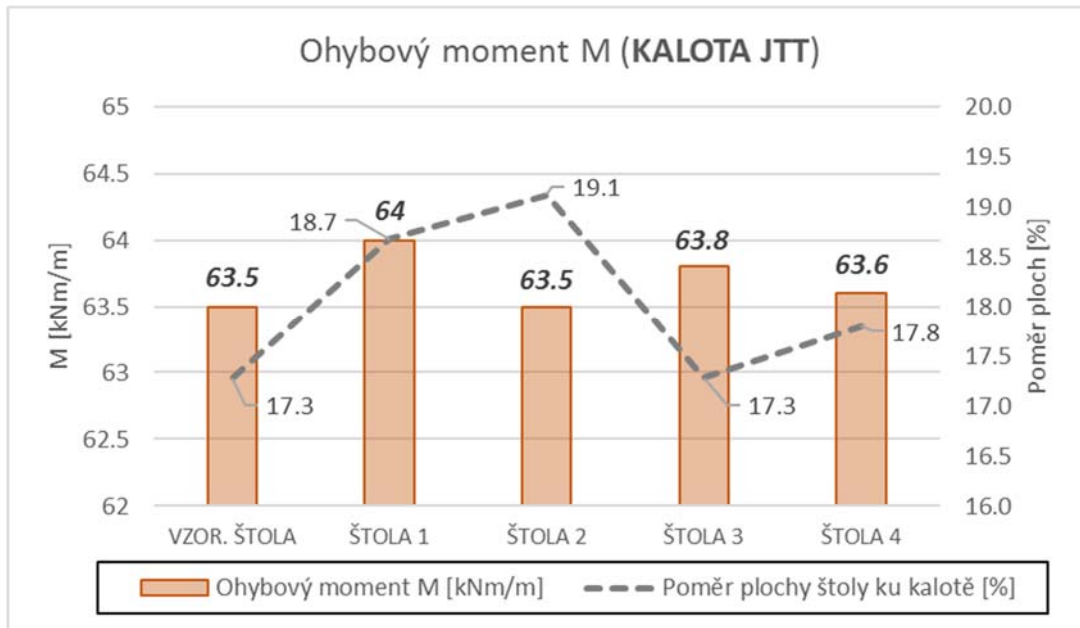
Zde se nachází porovnání *konvergenčních měření* pro štolu v 3. fázi výpočtu a pro tunel v poslední fázi. Vůči referenční pozici jednotlivých bodů znamenají záporné hodnoty pokles směrem dolů a kladné naopak nahoru. Výpočet se nepodařilo vytvořit tak, aby vyhověl hodnotám z extenzometrických i konvergenčních měření. Přednost při tvoření výpočtu dostaly hodnoty extenzometrických měření z důvodu menšího nebezpečí chybovosti při měření oproti konvergenčním měřením. Díky tomu se vypočtené hodnoty svislé deformace primárního ostění tunelu od změřených hodnot výrazně liší a ve 3 z 5 bodů jsou o 38 až 104 % větší. Naopak pro štolu vyšly ve všech bodech, oproti monitoringu, deformace menší.

SVISLÁ DEFORMACE PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ				
BOD KONV. PROFILU	MONITORING TUNEL	VÝPOČET TUNEL	MONITORING ŠTOLA	VÝPOČET ŠTOLA
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	-21.8	-44.6	-3.0	-1.8
2	-19.9	-36.3	-4.0	-1.4
3	-27.3	-37.7	-3.0	-1.2
4	-7.4	+0.2	+1.5	+0.2
5	-6.3	-1.9	-4.0	-0.1

Tab. 45 Porovnání konvergenčních měření

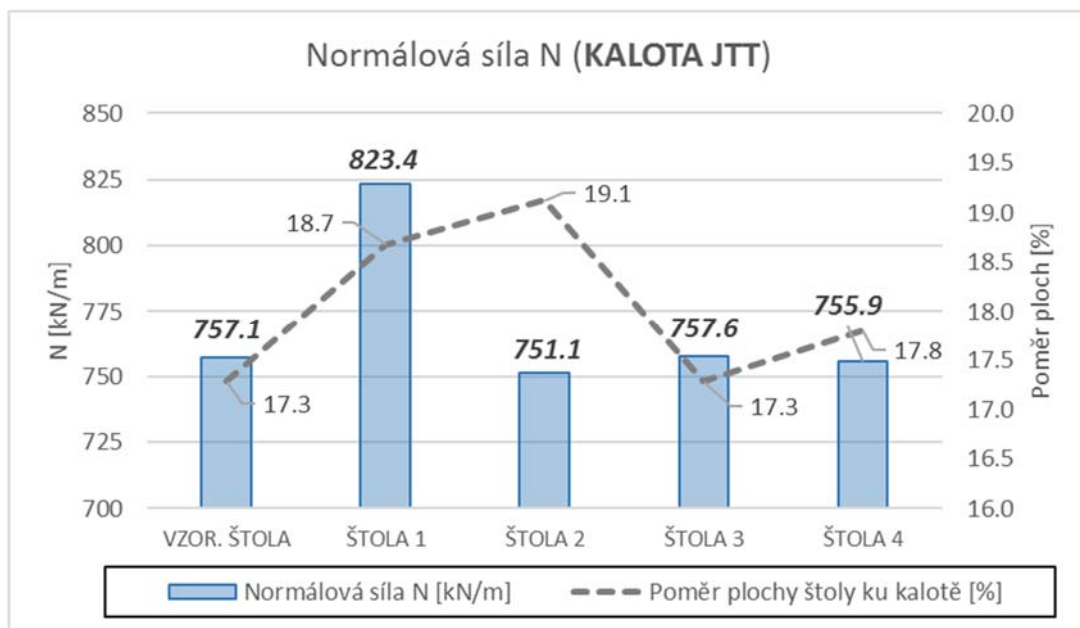


6.13.1.3 Kalota JTT



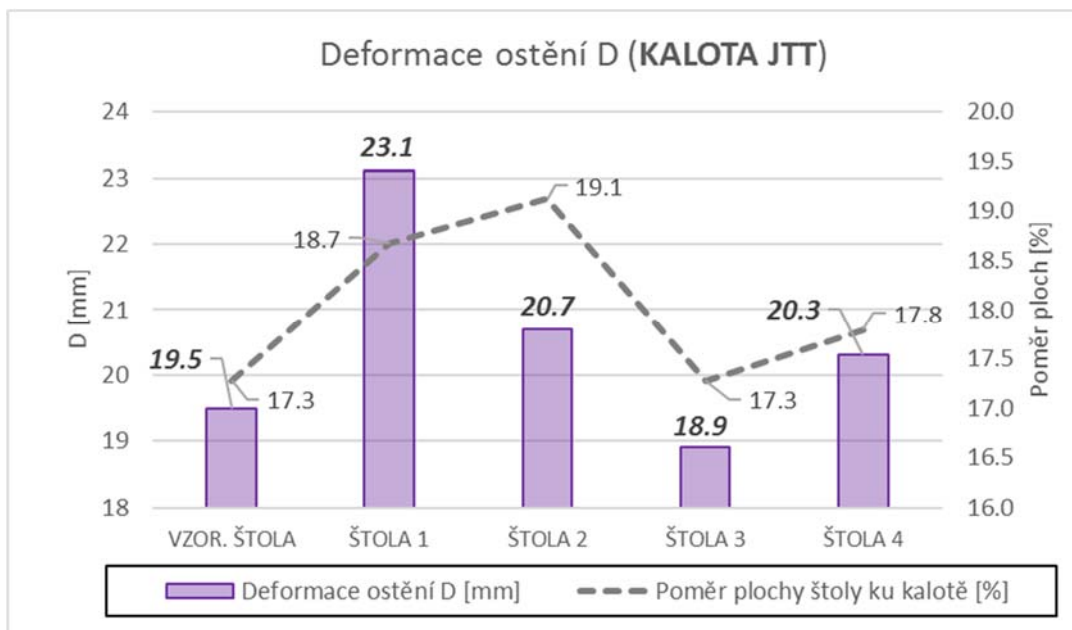
Graf 15 Ohybový moment (KALOTA JTT)

Hodnoty ohybových momentů všech variant výpočtu jsou téměř stejné a maximálně se od sebe liší o 0,5 kNm. Největší hodnota je 64,0 kNm u **Štoly 1**.



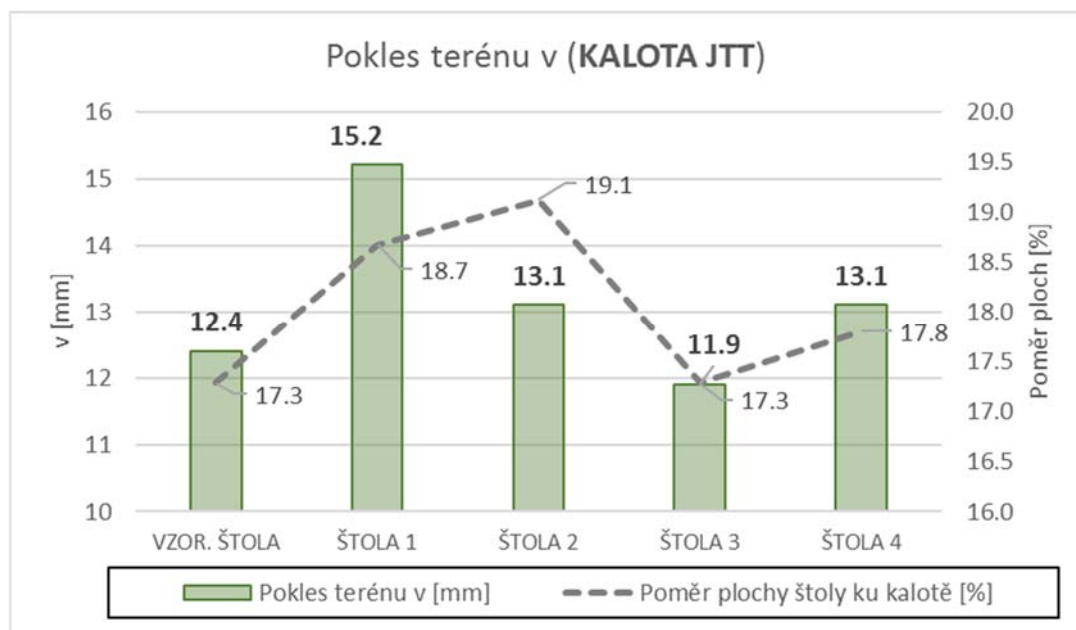
Graf 16 Normálová síla (KALOTA JTT)

Ve fázi kaloty se od ostatních variant výrazně odlišuje normálová síla štoly 1 o hodnotě 823,4 kN, která se od zbylých variant liší průměrně o 68 kN. Tato normálová síla vzniká v místě zachované části ostění štoly. Hodnoty ostatních variant jsou si dosti podobné a maximálně se od sebe liší o 4,8 kN.



Graf 17 Deformace ostění (KALOTA JTT)

**Vzorový výpočet** dosahuje druhé nejmenší deformace o hodnotě **19,5 mm**. Menší je pouze varianta se **Štolou 3** o hodnotě **18,9 mm**. U zbylých variant štol došlo ke zvýšení deformací. U **Štoly 2** a **4** se jedná o zvýšení hodnot o 1,3 a 0,8 mm. Největší nárůst je u **Štoly 1**, kde se oproti vzorovému výpočtu deformace zvětšila o 3,6 mm na hodnotu **23,1 mm**.



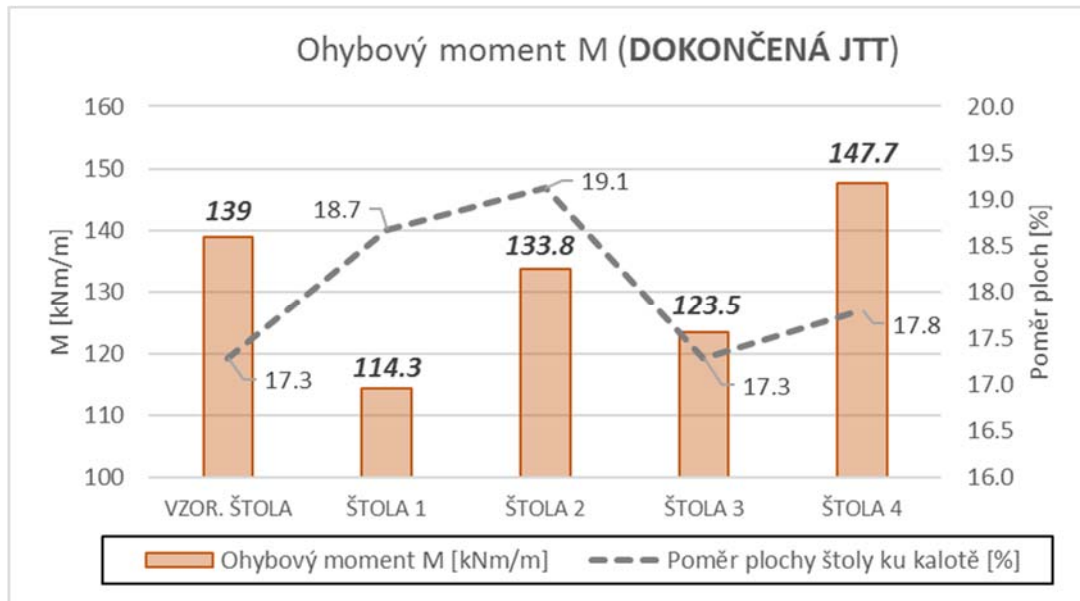
Graf 18 Pokles terénu (KALOTA JTT)

U poklesu terénu se opakuje vývoj hodnot jako u deformace ostění. **Vzorový výpočet** dosahuje druhé nejmenší hodnoty poklesu **12,4 mm**. Menší je pouze varianta se **Štolou 3** o hodnotě **11,9 mm**. U zbylých variant štol došlo ke zvýšení deformací. U **Štoly 2** a **4** se pokles zvýšil o 0,7 mm na hodnotu **13,1 mm**. Největší nárůst je u **Štoly 1**, kde se oproti vzorovému výpočtu pokles zvětšil o 2,8 mm na hodnotu **15,2 mm**.



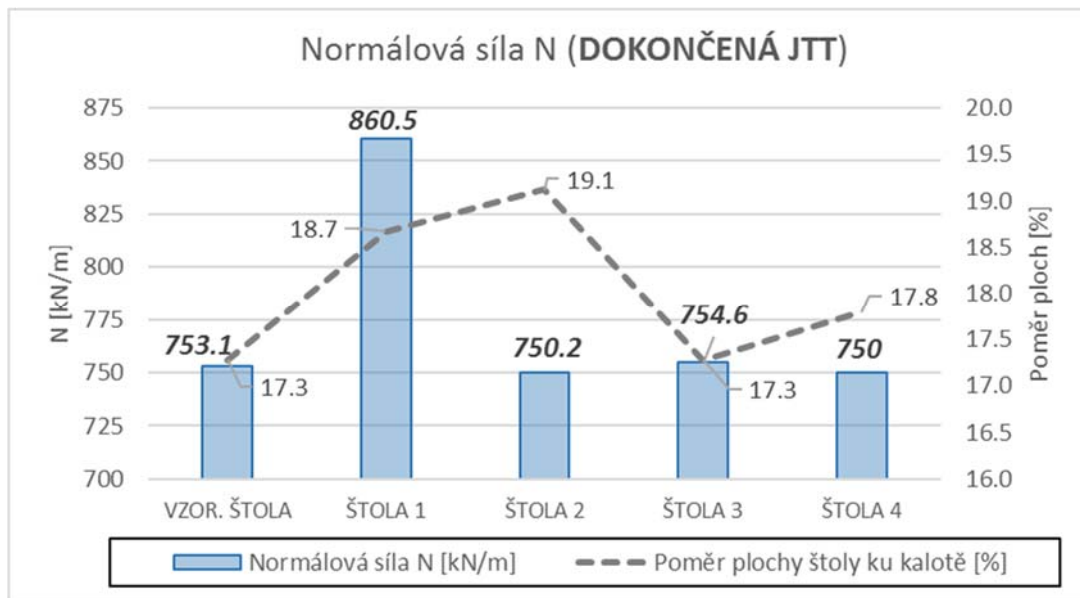


## 6.13.1.4 Dokončená JTT



Graf 19 Ohybový moment (DOKONČENÁ JTT)

Oproti fázi kaloty se již od sebe hodnoty ohybových momentů výrazněji liší. **Vzorový výpočet** dosahuje druhé největší hodnoty **139,0 kNm**. Největší hodnotu **147,7 kNm**, s navýšením oproti vzorovému výpočtu **8,7 kNm**, dosahuje varianta se **Štolou 4**. Oproti **Vzorové štole** jsou tři varianty štol s nižšími hodnotami. Největší rozdíl je o **24,7 kNm** u varianty se **Štolou 1**. U **Štoly 3** je rozdíl **15,5 kNm** a u **Štoly 2** je to **5,2 kNm**.

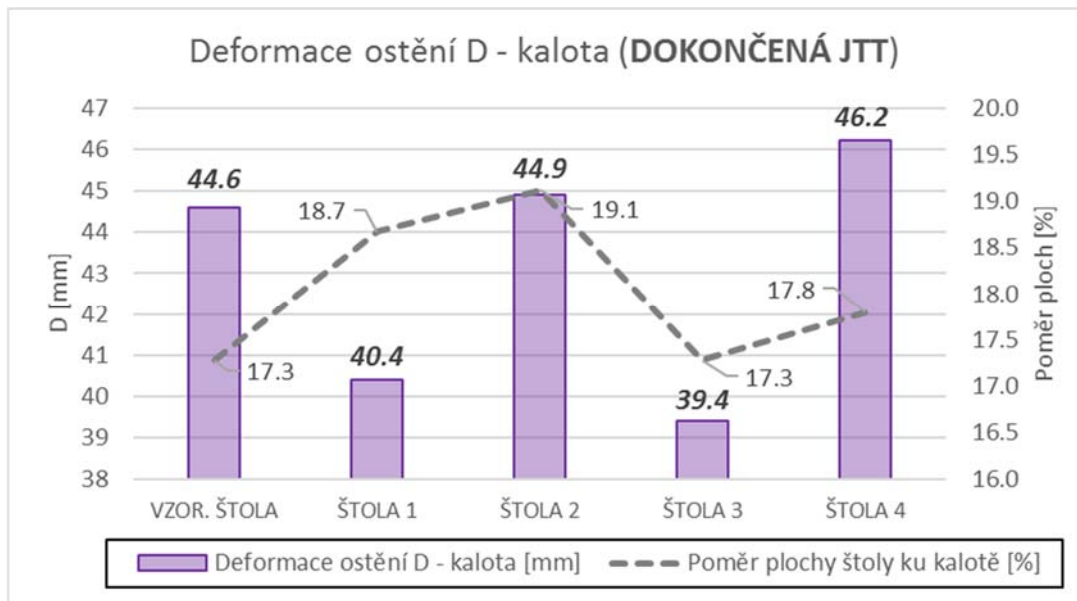


Graf 20 Normálová síla (DOKONČENÁ JTT)

Ve fázi dokončené JTT je vývoj hodnot podobný jako ve fázi kaloty, s výjimkou toho, že hodnoty normálových sil jednotlivých variant poklesly, až na **Štolu 1**, u které se naopak hodnota zvýšila. Od ostatních variant se stále výrazně odlišuje normálová síla **Štoly 1**, která se oproti fázi kaloty zvýšila o **37,1 kN** na hodnotu **860,5 kN**. Hodnoty zbylých čtyř variant poklesly oproti fázi kaloty o **0,9** až **5,9 kN**. Vzájemně se od sebe tyto čtyři varianty

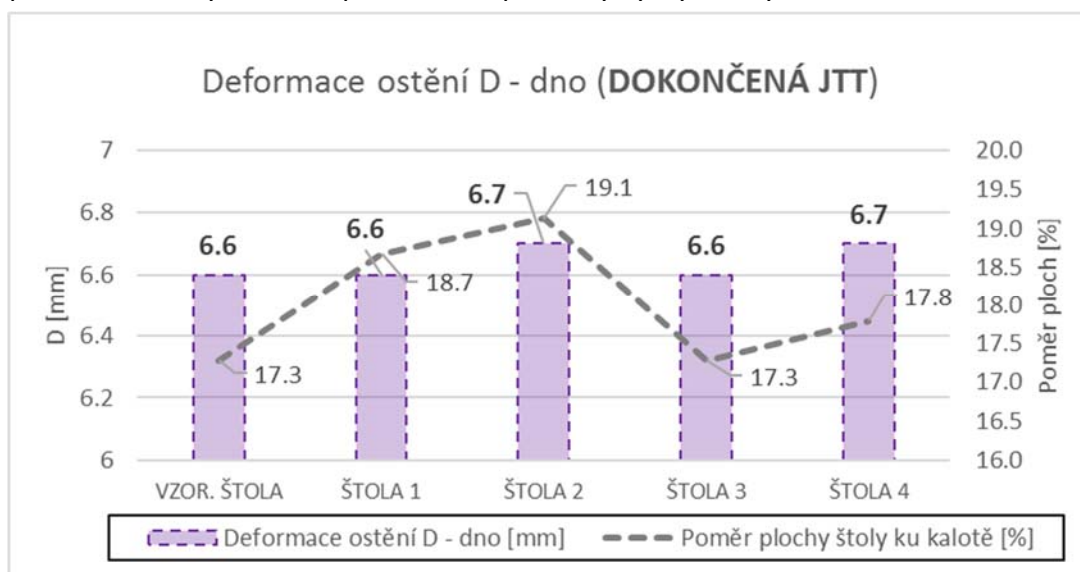


liší maximálně o 4,6 kN a jsou si tak dosti podobné. Z těchto čtyř variant je největší hodnota 754,6 kN u Štoly 3 a nejmenší 750,0 kN u Štoly 4.



Graf 21 Deformace ostění – kalota (DOKONČENÁ JTT)

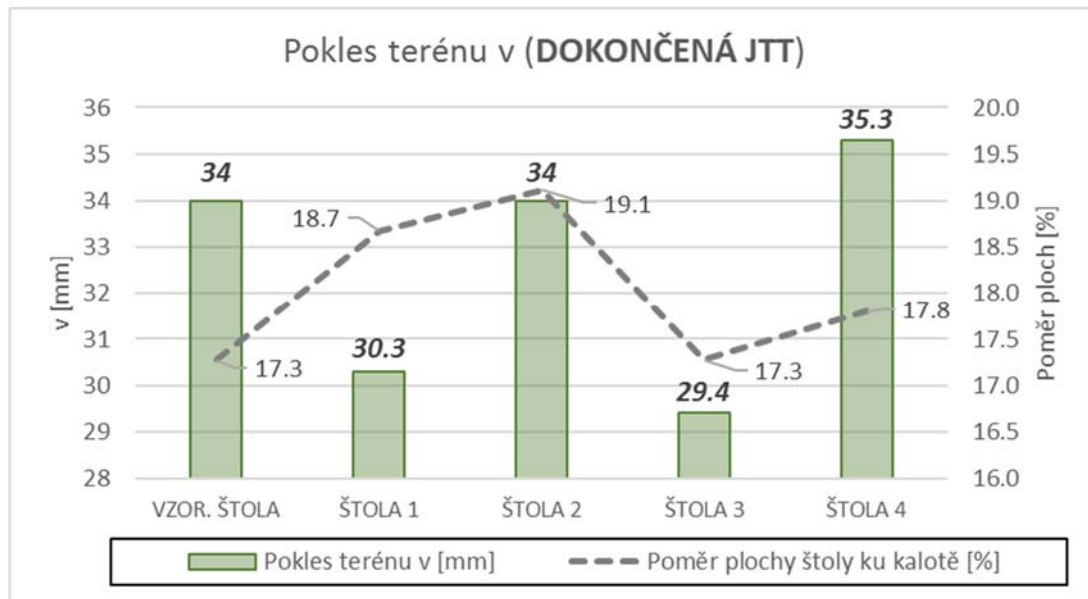
**Vzorový výpočet** dosahuje třetí největší deformace o hodnotě 44,6 mm, větších deformací tak dosahují dvě jiné štoly. Výpočet s variantou **Štoly 2** dosáhl hodnoty 44,9 mm a s variantou **Štoly 4** hodnoty 46,2 mm, maximální nárůst deformace je tak 1,6 mm. Oproti tomu zbylé dvě varianty dosahují výraznějších rozdílů hodnot oproti vzorovému výpočtu. Deformace varianty se **Štolou 1** je nižší o 4,2 mm, oproti fázi kaloty je to značný rozdíl, kde tato varianta dosahovala největší deformace (23,1 mm) ze všech variant. Nejmenší deformace 39,4 mm, s rozdílem 5,2 mm oproti vzorovému výpočtu, dosahuje varianta se **Štolou 3**. Tento výsledek je o to podstatnější, jelikož **Štola 3** je totožná se **Vzorovou štolou** a pouze se změnila jejího poloha v profilu kaloty. Štola ve **vzorovém výpočtu** je umístěna blízko dna kaloty a více u pravé strany ostění, zatímco **Štola 3** se posunula do osy tunelu a přibližně do poloviny výšky kaloty.



Graf 22 Deformace ostění - dno (DOKONČENÁ JTT)



Hodnoty deformace ostění dna se pro varianty modelů v zásadě vůbec nemění. Pouze u dvou variant o 0,1 mm, což je nepatrná změna.



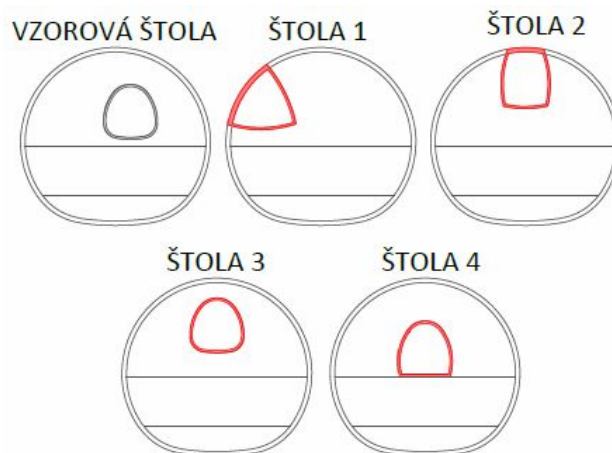
Graf 23 Pokles terénu (DOKONČENÁ JTT)

Pokles terénu je již částečně popsán v podkapitole 6.13.1.1 *Extenzometrická měření*. U poklesu terénu se opakuje vývoj hodnot jako u deformace ostění. **Vzorový výpočet** spolu s variantou **Štoly 2** dosahují druhé největší deformace o hodnotě **34,0 mm**. Větší deformace, s nárůstem o 1,3 mm, tak dosahuje pouze varianta se **Štolou 4** o hodnotě **35,3 mm**. Druhá nejmenší hodnota 30,3 mm je u varianty se **Štolou 1**, což oproti vzorovému výpočtu činí rozdíl 3,7 mm. Oproti fázi kaloty je to značné zlepšení, kde tato varianta dosahovala největšího poklesu (15,2 mm) ze všech variant. Nejmenší deformace **29,4 mm**, s rozdílem 4,6 mm oproti vzorovému výpočtu, dosahuje varianta se **Štolou 3**. Jak již bylo zmíněno, tento výsledek je o to podstatnější, jelikož **Štola 3** je totožná se **Vzorovou štolou** a pouze se změnila jejího poloha v profilu kaloty. Štola ve **vzorovém výpočtu** je umístěna blízko dna kaloty a více u pravé strany ostění, zatímco **Štola 3** se posunula do osy tunelu a přibližně do poloviny výšky kaloty.



## 6.14 Závěry numerických výpočtů

Pozn.: pro orientaci ve variantách umístění štol je zde znovu umístěn obrázek s jednotlivými variantami



Obr. 33 Varianty štoly – model Blanka

### A) Vnitřní síly

Ve fázi kaloty JTT jsou hodnoty **ohybových momentů** všech variant výpočtu téměř stejné (průměrná hodnota 63,7 kNm) a maximálně se od sebe liší o 0,5 kNm. Ve fázi dokončené JTT se ale již jednotlivé hodnoty liší. **Vzorový výpočet** dosahuje druhé největší hodnoty **139 kNm**. Tři varianty tedy dosahují menších hodnot a jedna varianta hodnoty větší. Největší hodnotu **147,7 kNm**, s navýšením oproti vzorovému výpočtu 8,7 kNm, dosahuje varianta se **Štolou 4**. U třech variant s nižšími hodnotami je rozdíl o **24,7 kNm** u varianty se **Štolou 1**. U **Štoly 3** je rozdíl **15,5 kNm** a u **Štoly 2** je to **5,2 kNm**. Nejnižší hodnota je tak **114,3 kNm** u varianty se **Štolou 1**.

**Normálové síly** se od sebe vzájemně, kromě varianty se **Štolou 1**, výrazně neliší. Ve fázi kaloty varianta se **Štolou 1** dosahuje hodnoty **823,4 kN**, tato hodnota se ve fázi dokončené JTT zvýší na **860,5 kN**. Zbylé čtyři varianty dosahují ve fázi kaloty hodnoty od 751,1 do 757,6 kN a ve fázi dokončené JTT klesnou o 0,9 až 5,9 kN na hodnoty od 750,0 do 754,6 kN.

Změna tvaru a umístění průzkumné štoly má tedy největší vliv na průběh ohybových momentů, kdy u **Štoly 4** došlo k mírnému nárůstu, u **Štoly 2** k mírnému snížení a **Štoly 1** a **3** k významnému snížení hodnot oproti vzorovému výpočtu. U normálových sil došlo ke značenému nárůstu hodnot, oproti vzorovému výpočtu, pouze u **Štoly 1**, zároveň ale tato varianta dosahuje nejmenších hodnot ohybových momentů.

### B) Deformace a pokles terénu

Ve fázi kaloty JTT dosahuje výpočet se **Vzorovou štolou** druhé nejmenší **radiální deformace ostění** o hodnotě **19,5 mm**. Menší je pouze varianta se **Štolou 3** a to o **0,6 mm**. U variant se **Štolou 2** a **4** se jedná o zvýšení hodnot o **1,3** a **0,8 mm**. Největší nárůst je u varianty se **Štolou 1**, kde se oproti vzorovému výpočtu deformace zvětšila o **3,6 mm** na hodnotu **23,1 mm**.

Ve fázi dokončené JTT dojde ke změně pořadí variant s největšími hodnotami. **Vzorový výpočet** dosahuje třetí největší **radiální deformace ostění (v kalotě tunelu)** o



hodnotě **44,6 mm**. U varianty se **Štolou 2** dojde ke zvýšení, oproti vzorovému výpočtu, o nepatrných 0,3 mm a u varianty se **Štolou 4** o 1,6 mm, maximální deformace je tak **46,2 mm**. Deformace varianty se **Štolou 1** je nižší o 4,2 mm, oproti fázi kaloty je to značný rozdíl, kde tato varianta dosahovala největší deformace (23,1 mm) ze všech variant. Nejmenší deformace **39,4 mm**, s rozdílem 5,2 mm oproti vzorovému výpočtu, dosahuje varianta se **Štolou 3**.

Hodnoty deformace ostění dna se pro varianty modelů v zásadě vůbec nemění. Pouze u dvou variant o 0,1 mm, což je nepatrná změna. Průměrná hodnota je **6,6 mm**.

U poklesu terénu ve fázi kaloty JTT se opakuje vývoj hodnot jako u deformace ostění ve fázi dokončené JTT. **Vzorový výpočet** dosahuje druhé nejmenší hodnoty poklesu **12,4 mm**. Menší je pouze varianta se **Štolou 3** a to o 0,5 mm. U variant se **Štolou 2** a **4** se jedná o zvýšení hodnot o 0,7 mm. Největší nárůst je u **Štoly 1**, kde se oproti vzorovému výpočtu pokles zvětšil o 2,8 mm na hodnotu **15,2 mm**.

Ve fázi dokončené JTT se zachová vývoj hodnot poklesu terénu z předešlé fáze a odpovídá tedy vývoji pro radiální deformaci ostění (v kalotě tunelu). **Vzorový výpočet** spolu s variantou **Štoly 2** dosahují druhé největší deformace o hodnotě **34,0 mm**. Větší deformace, s nárůstem o 1,3 mm, tak dosahuje pouze varianta se **Štolou 4** o hodnotě **35,3 mm**. Druhá nejmenší hodnota 30,3 mm je u varianty se **Štolou 1**, což oproti vzorovému výpočtu činí rozdíl 3,7 mm. Oproti fázi kaloty je to značné zlepšení, kde tato varianta dosahovala největšího poklesu (15,2 mm) ze všech variant. Nejmenší deformace **29,4 mm**, s rozdílem 4,6 mm oproti vzorovému výpočtu, dosahuje varianta se **Štolou 3**.

#### **Z výše uvedených závěrů vyplývají dvě nejlepší varianty štol:**

- 1) Z hlediska radiálních deformací a poklesu terénu jasně vychází nejlépe varianta se **Štolou 3**, tato varianta zároveň dosahuje druhého nejmenšího ohybového momentu.
- 2) Druhé nejmenší hodnoty radiálních deformací a poklesu terénu dosahuje varianta se **Štolou 1**, tato varianta zároveň dosahuje nejmenšího ohybového momentu.

Jak již bylo několikrát zmíněno, výsledky výpočtu varianty se **Štolou 3** jsou to podstatnější, jelikož **Štola 3** je totožná se **Vzorovou štolou** a pouze se změnila jejího poloha v profilu kaloty. Štola ve **vzorovém výpočtu** je umístěna blízko dna kaloty a více u pravé strany ostění, zatímco **Štola 3** se posunula do osy tunelu a přibližně do poloviny výšky kaloty.

Z porovnání výsledků v této kapitole vychází stejný trend jako v předešlé **kapitole 5**, a to ten, že varianta výpočtu se štolou podkovovitěho tvaru, umístěnou přibližně v polovině výšky kaloty, dosahuje ze všech variant jedné z nejmenší hodnoty ohybového momentu a nejmenší hodnoty radiálních deformací a poklesu terénu.



## 7 DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY

V této části DP jsou uvedeny 3 různé pohledy na přístup k problematice průzkumných štol, vyvozené z dílčích závěrů.

### 7.1 Inženýrskogeologický průzkum

Ze shrnutí přístupu k problematice průzkumných štol, respektive průzkumných tunelů jako inženýrskogeologického průzkumu, v České republice i zahraničí, lze vyvodit, že nejčastěji opakujícími se důvody pro jejich zhotovení jsou:

- *upřesnění geotechnických podmínek*
- *komplikované geologické a hydrogeologické podmínky, poznání geologických podmínek spojitě po celé délce trasy tunelu*
- *poznání reálného chování horniny při ražbě*
- *snížení HPV, odvodnění, větrání či jako únikový východ*
- *využití praktických zkušeností z ražby štoly při ražbě tunelu*
- *provedení speciálních polních zkoušek*

Je vhodné zmínit, že kromě geotechnických důvodů existují také důvody společenské; politické jako např.:

- *posun rozhodovacích procesů výstavby celé stavby (ne jen pouze samotného tunelu)*
- *zjištění celospolečenského dopadu*
- *předstihové zahájení projektu realizací průzkumné štoly na základě jiných než stavebních předpisů*
- *předstihové vytvoření podmínek pro budoucí stavbu (zařízení staveniště, komunikace, doprava, energie, média)*

### 7.2 Ekonomické hledisko

Na základě závěrů **kapitoly 4** lze konstatovat, že díky předem realizované štolě vycházejí investiční náklady vzorového tunelu o **20 tisíc Kč** (včetně DPH) nižší oproti tunelu, kde štola nebyla realizována. Tato částka představuje **4,3 %** z nákladů na tunel, u kterého štola nebyla realizována. Tato informace je zajímavá, jen pokud uvažujeme samotnou realizaci tunelu bez nákladů na průzkumné práce. V celkové sumě bude tunel se štolou samozřejmě dražší, ovšem budou získány výrazně podrobnější informace o místních geologických a hydrogeologických podmínkách. U tunelů s větším profilem bude procentuální rozdíl cen ražeb tunelů, v tomto případě pro dvoupruhový tunel 4,3 %, díky většímu objemu razících prací klesat.

Je však nutné pamatovat, že se v **kapitole 4** počítalo pouze s investičními náklady a nebyly započteny náklady vedlejší (energie, zařízení staveniště, projektová dokumentace, zapůjčení techniky atd.).



### 7.3 Statické hledisko

Ze závěrů **kapitoly 5** vyplývá, že **5. varianta** výpočtu (*varianta bez štoly*), vykazuje ve většině případů největší hodnoty deformací primárního ostění i poklesu terénu. Realizace štoly má tak pozitivní vliv na deformace – viz analogie s pozitivním přínosem členění výrubu.

Největších rozdílů, oproti variantám výpočtu se štolou, je dosaženo u nejméně přívětivého typu geologie (geologie 1) a u tunelu mělce pod terénem. U této kombinace parametrů vyšly u **5. varianty** i největší ohybové momenty (u varianty tunelu hluboko pod terénem také). U kombinace nejméně přívětivé geologie 1 a mělkého tunelu to konkrétně vedlo k nutnosti změny dimenze ostění.

Volbou polohy a tvaru průzkumné štoly lze významným způsobem ovlivnit velikosti vnitřních sil v ostění.

Aby navrhovaný průřez vyhovoval při posouzení na kombinaci tlaku a ohybu, musel být průřez **Varianty 5** budto:

**a) vyztužen hustší ocelovou sítí s profilem 10 mm o rozteči 100 mm (původní návrh byla síť s profilem 8 mm a roztečí 150 mm)**

**b) zvětšen o 5 cm**

Reálně to pro možnosti zesílení průřezu znamená:

a) zvýšení spotřeby oceli na segment ostění o rozměrech 1x1 m z **10,53 kg** (2x 150x150x8 mm) na **24,65 kg** (2x 100x100x10 mm), což je o **235 % více**

b) zvýšení spotřeby betonu na plochu ostění 1x1 m o **0,05 m<sup>3</sup>**, což je o **20 % více**

U zbylých variant tunelů mělce pod terénem vyšly deformace i poklesy terénu také největší u **Varianty 5**, ale rozdíly hodnot oproti ostatním variantám se díky lepší geologii výrazně zmenšily.

U variant tunelů hluboko pod terénem došlo, oproti mělkým variantám, také ke snížení rozdílů hodnot (i pro *geologii 1*) mezi jednotlivými variantami. **Pátá varianta** výpočtu díky hlubšímu uložení již nedosahovala, s výjimkou u typu geologie 1, největších ohybových momentů.

Ze statického hlediska má tedy největší opodstatnění použití štoly u tunelů s menším nadložím a v méně příznivých geologických podmínkách.



## 8 ZÁVĚR

Diplomová práce navazovala na moji předešlou bakalářskou práci ohledně problematiky realizace průzkumných štol, jakožto nejpodrobnějšího způsobu inženýrskogeologického průzkumu pro podzemní dílo. Někteří odborníci ji zavrhují pro vysoké pořizovací náklady a časovou náročnost, jiní ji zase doporučují pro získání „přesných“ a „spolehlivých“ údajů. Diplomová práce byla rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické.

### 8.1 Závěr teoretické části

Teoretická část se zabývala stručným popisem českých i zahraničních podzemních děl. Tento stručný popis byl zpracován ve formě tabulek. Část s českými podzemními stavbami obsahuje ražené tunely za posledních 25 let, u kterých byly nebo nebyly realizovány průzkumné štoly. Tyto stavby byly rozděleny dle druhu dopravy na tunely silniční a železniční. Stručný popis každé stavby se skládal z roku zahájení a dokončení ražeb, názvu stavby, geologických podmínek, způsobu ražby, celkové délky tunelu. Dále pak bylo v tabulce označeno, jestli byla součástí stavby tunelu průzkumná štola a pokud ano, tak v jaké délce a jaké byly důvody pro její realizaci. V tabulkách se tak nachází 13 silničních a 14 železničních tunelů.

Podobně jako u českých tunelů, byly pro zahraniční podzemní stavby vytvořeny tabulky se stručným popisem jednotlivých staveb, s výjimkou toho, že pro každou stavbu byla vytvořena samostatná tabulka. Zde jsem se oproti České republice zaměřil pouze na podzemní díla, u kterých byla realizována průzkumná štola, respektive průzkumný tunel. V rámci získávání informací jsem oslovil přes 50 národních tunelářských asociací sdružených v ITA-AITES a přes 10 jejich sponzorů. Bohužel se mi nazpět dostalo jen 5 odpovědí. Z toho mi pouze zástupci Švédské tunelářské asociace poskytli potřebný dokument, který splňoval potřeby mé práce a za poslání tohoto dokumentu jim děkuji. Informace ke zbylým stavbám, nacházející se v mé práci, jsem dohledával v odborných publikacích na internetu. Dohromady se tak v DP nachází 14 stavebních děl z 9 různých zemí. Ta byla seřazena podle počátku zahájení výstavby samotného tunelu od nejstaršího po nejmladší.

V závěru obou kapitol obsahující české a zahraniční tunely je uvedeno shrnutí důvodů pro realizaci průzkumných štol, respektive průzkumných tunelů, které vyplynuly z popisů jednotlivých staveb. Tyto poznatky byly ještě jednou shrnuty v kapitole 7 **DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY**.

### 8.2 Závěr praktické části

Praktická část byla rozdělena do 3 hlavních kapitol. První z nich (*kapitola 4*) se zabývala specifikací a výpočtem investičních nákladů na ražbu tunelu, ražby štoly a následného tunelu a z toho plynoucích dopadů. Porovnávány byly tedy 3 úseky, každý o délce 1 m. Prvním byl úsek štoly, druhým úsek tunelu, u kterého byla předem vyražena štola, a třetím byl úsek tunelu, kde k realizaci štoly nedošlo. Na konci této kapitoly byly vyčísleny





investiční náklady jednotlivých úseků a bylo provedeno porovnání nákladů na realizaci 1 m tunelu se štolou a tunelu, u kterého štola nebyla realizována.

Ze závěrů této kapitoly byl vytvořen pohled na průzkumnou štolu z ekonomického hlediska v kapitole 7 DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY. Krátce zde byly shrnuty závěry z výsledků 40 výpočetních modelů a také z posudků primárního ostění a reálného dopadu na jeho dimenzování.

Druhá praktická kapitola (*kapitola 5*) se zabývala výpočetními modely pomocí metody konečných prvků (MKP), ve kterých byla modelována ražení štol a tunelů. Pro výpočetní modely byl použit program GEO5 - MKP od české společnosti Fine spol. s r.o. Na výsledcích byl poté ukázán vliv průzkumné štoly na změny velikostí vnitřních sil, deformací primárního ostění tunelu a deformací povrchu terénu. Dohromady bylo pomocí kombinací třech parametrů vytvořeno 40 různých modelů. Tyto tři parametry byly varianta štoly (případně tunel bez štoly), typ geologie a hloubka tunelu. Výsledky modelů byly porovnávány ve dvou fázích výpočtu, ve fázi instalace primárního ostění kaloty a fázi uzavření primárního ostění celého tunelu. Porovnávány byly 4 veličiny, ohybové momenty, normálové síly, radiální deformace ostění a poklesy terénu. Výsledky byly prezentovány na grafech, kdy jeden graf prezentoval všechny varianty umístění štoly (včetně výpočtu bez štoly), jeden typ geologie, jednu variantu hloubky tunelu a buď to fázi kaloty nebo fázi uzavření celého tunelu. Dohromady bylo tak vytvořeno 72 grafů. Z důvodu přehlednosti, se v hlavním textu DP nacházelo pouze 9 grafů pro tunel mělce pod terénem s první variantou geologie, u kterého se výsledky nejvíce odlišovaly. Pro těchto 5 variant výpočtu mělkého tunelu s prvním typem geologie jsou také v přílohách dokladovány jednotlivé statické výpočty z programu GEO5 – MKP. Grafy zbylých modelů jsou dokladovány v příloze a jejich výsledky byly v textu práce prezentovány pouze slovně. Pro výsledky 5 variant výpočtu mělkého tunelu s prvním typem geologie bylo také provedeno posouzení primárního ostění na kombinaci tlaku a ohybu pro mezní stav únosnosti. Pro posouzení primárního ostění byl použit výpočetní program FIN EC – Beton, také od české společnosti Fine spol. s r.o. Z těchto posudků byly následně vyvozeny praktické závěry ohledně dimenze primárního ostění.

Ze závěrů této kapitoly byl taktéž vytvořen pohled na průzkumnou štolu v kapitole 7 DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY. Tentokrát z pohledu statického.

Třetí praktická kapitola (*kapitola 6*) se zabývala vytvořením výpočetního modelu MKP, podle předlohy reálné stavby a také reálně naměřených hodnot geotechnického monitoringu. Pro výpočetní modely byl použit také program GEO5 – MKP. Předlohou pro výpočet byly dvě tunelové trouby Tunelového komplexu Blanka. V levé, respektive jižní tunelové troubě byla zároveň umístěna průzkumná štola. Jako podklady pro vytvoření modelu sloužily podélný řez geologií, příčný řez tunelových trub, příčný řez průzkumné štoly, svislé deformace primárního ostění štoly a JTT z konvergenčních měření a extenzometry pro STT a JTT, které byly umístěny v osách jednotlivých tunelů. Nejprve bylo provedeno “naladění” vzorového výpočtu na naměřené hodnoty geotechnického monitoringu. Bohužel se nepodařilo vytvořit výpočet tak, aby se přiblížil jak reálným hodnotám z extenzometrických měření, tak i deformací primárního ostění (složité geologické podmínky). Přednost při tvoření výpočtu dostaly hodnoty extenzometrických měření z důvodu menšího nebezpečí chybovosti při měření oproti konvergenčním



měření. Po spočítání vzorového výpočtu byly jeho výsledky porovnány s reálně naměřenými hodnotami monitoringu. Po tomto vyhodnocení byly ještě provedeny 4 další výpočty. V každém z nich se reálná štola vyměnila za jednu z předešlých variant štoly z kapitoly 5. S hodnotami extenzometrů byly porovnány i 4 dodatečné výpočty. Následně byly obdobně, jako v kapitole 5, porovnávány výsledky ve fázi instalace primárního ostění kaloty JTT a fázi uzavření primárního ostění celé JTT. Závěrem této kapitoly bylo shrnutí vlivu změny tvaru a umístění průzkumné štoly v profilu kaloty tunelu. Přičemž nejpozitivněji ovlivnilo výsledky zachování stejného tvaru, jako byla vzorová štola, a pouze změna umístění.

Poslední kapitola, již zmiňovaná kapitola 7 DOPORUČENÍ PRO NÁVRH PRŮZKUMNÉ ŠTOLY, se zabývala celkovým shrnutím praktické části DP do 3 pohledů na podzemní dílo s průzkumnou štolou. A to z pohledu inženýrskogeologického průzkumu, pohledu ekonomického a statického.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Seznam silničních tunelů v Česku* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 29. 03. 2019 [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Seznam\\_silni%C4%8Dn%C3%ADch\\_tunel%C5%AF\\_v\\_%C4%8Cesku&oldid=17094319](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Seznam_silni%C4%8Dn%C3%ADch_tunel%C5%AF_v_%C4%8Cesku&oldid=17094319)
- [2] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Seznam železničních tunelů v Česku* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 30. 11. 2020 [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Seznam\\_%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%ADch\\_tunel%C5%AF\\_v\\_%C4%8Cesku&oldid=19217175](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Seznam_%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%ADch_tunel%C5%AF_v_%C4%8Cesku&oldid=19217175)
- [3] SRB, Martin a Matouš HILAR. Průzkumné štoly využité pro výstavbu dopravních tunelů v ČR. *Tunel*. 2011, **20**(3), 79-87.
- [4] HORÁK, Vlastimil a Jiří PECHMAN. *Brno VMO, Pražská radiála, Pisárecký tunel* [online]. [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16688122-Brno-vmo-prazska-radiala-pisarecky-tunel.html>
- [5] BARTÁK, Jiří. *Tunel Mrázovka*. Praha: Satra, 2004. ISBN 80-239-3472-4.
- [6] SÁLUS, Vladimír a Petr VOZARIK. Výstavba průzkumné geologické štoly pro dálniční tunely „Valík“. *Tunel*. 2003, **12**(1), 34-36.
- [7] KVAŠ, Jan a Pavel GAJDOŠ. Ražba a geotechnický monitoring průzkumných štol tunelu Panenská (stavba 0807/II-J, dálnice D8). *Tunel*. 2002, **11**(4), 43-47.
- [8] ČESKÁ TUNELÁŘSKÁ ASOCIACE ITA-AITES. *Tunel Libouchec* [online]. [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: [https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni\\_stavby/podzemni\\_stavby\\_v\\_provozu/tunel-libouchec.html](https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni_stavby/podzemni_stavby_v_provozu/tunel-libouchec.html)
- [9] PECHMAN, Jiří. Tunel Klimkovice, dálnice D47. *Tunel*. 2006, **15**(1), 32-34.
- [10] SÁLUS, Vladimír a Petr VOZARIK. Průzkumná štola tunelu Slivenec - Lahovice silničního okruhu kolem Prahy, stavba 514. *Tunel*. 2005, **14**(2), 19-21.
- [11] BERNARD, Radek a Jakub BOHÁTKA. Geotechnický monitoring při stavbě SOKP 514 - tunely Slivenec. *Tunel*. 2008, **17**(4), 77-86.
- [12] HASÍK, Otakar, Karel ZÁVORA a Mároš DAVID. Tunely Lochkov a Komořany – silniční tunely na okruhu kolem Prahy, stavby 513, 514. *Tunel*. 2006, **15**(1), 35-37.
- [13] TESAŘ, Otakar. Inženýrskogeologické poměry a podmínky pro ražení tunelů na dálnici D8 - tunel Prackovice. *Tunel*. 1998, **7**(1), 22-23.
- [14] TROCHTA, Jiří, Pavel KUDĚJ, Jiří SVOBODA a Michal HNILIČKA. Stavba dálnice D8 - 0805 Lovosice - Řehlovice, výstavba tunelů Prackovice a Radějčín. *Tunel*. 2017, **26**(2), 4-17.
- [15] 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.
- [16] 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.



- [17] 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.
- [18] HEŘT, Jaromír. Realizace tunelu Březno. *Tunel*. 2007, **16**(4), 51-60.
- [19] WOHLMUTH, Jiří. Tunel Vepřek - první tunel Českých drah v novém tisíciletí. *Tunel*. 2002, **11**(3), 28-31.
- [20] TESAŘ, Jiří a Zdeněk KLEIN. Tunely Krasíkov. *Tunel*. 2003, **12**(1), 29-33.
- [21] MAŘÍK, Libor. Projekt dvoukolejných železničních tunelů Malá Huba a Hněvkovský I. na traťovém úseku Zábřeh - Krasíkov. *Tunel*. 2003, **12**(1), 45-50.
- [22] METROPROJEKT. *Optimalizace traťového úseku Zábřeh-Krasíkov Tunel Hněvkovský II*. [online]. [cit. 12. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.metroprojekt.cz/nabidka-sluzeb/tunely-podzemni-stavby/optimalizace-tratoveho-useku-zabreh-krasikov-tunel-hnevkovsky-ii>
- [23] KÖSSLER, Milan a Josef TESKA. Geotechnický monitoring na tunelech Nového spojení. *Tunel*. 2006, **15**(2), 15-19.
- [24] ČESKÁ TUNELÁŘSKÁ ASOCIACE ITA-AITES. *Tunel Votický, Olbramovický, Zahradnický a Tomický I a II* [online]. [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: [https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni\\_stavby/podzemni\\_stavby\\_v\\_provozu/tunely-voticky-olbramovicky-zahradnicky-tomicky-ii.html](https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni_stavby/podzemni_stavby_v_provozu/tunely-voticky-olbramovicky-zahradnicky-tomicky-ii.html)
- [25] MAŘÍK, Libor. Ražené tunely Olbramovický a Tomický I. na trati Votice - Benešov u Prahy. *Tunel*. 2011, **20**(4), 24-32.
- [26] ČESKÁ TUNELÁŘSKÁ ASOCIACE ITA-AITES. *Jablunkovské tunely* [online]. [cit. 5. 12. 2020]. Dostupné z: [https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni\\_stavby/podzemni\\_stavby\\_v\\_provozu/jablunkovske-tunely.html](https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni_stavby/podzemni_stavby_v_provozu/jablunkovske-tunely.html)
- [27] EBERMANN, Tomáš, Ondřej HORT, Lukáš HUBINGER, Jindra OBERHELOVÁ a Pavel VIŽDA. Tunely Ejpovice - geotechnický monitoring. *Tunel*. 2017, **26**(1), 12-25.
- [28] SPRINGER NATURE SWITZERLAND AG. Springer Link. *Sondierstollen mit Probestrecken für den Engelberg-Basistunnel der Autobahn Heilbronn-Stuttgart* [online]. [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-8564-3\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-8564-3_10)
- [29] JANBERG, Nicolas. Structurae International Database and Gallery of Structures. *Engelberg Base Tunnel* [online]. [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://structurae.net/en/structures/engelberg-base-tunnel>
- [30] KUHNHENN, Karl a Winfried LORSCHIEDER. Sondierstollen mit Probestrecken für den Engelberg-Basistunnel der Autobahn Heilbronn-Stuttgart. *Rock Mechanics: Computation, Exploration and Design of Tunnels and Rock Structures* [online]. , 147-160 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=DzSYBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>



- [31] PRAJZLER, Vladimír. Výstavba tunelu Engelberg v SRN. *Tunel*. 1998, **7**(1), 27-28.
- [32] ABDALLAH, Ahmed. *The use of exploratory tunnels as a tool for scheduling and cost estimation* [online]. 2010 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13928619.2007.9637813>
- [33] FRANKOVSKÝ, Jozef. *Prerážka prieskumnej štôlne tunela Branisko*. 1998, **7**(1), 27.
- [34] FRANKOVSKÝ, Jozef. Razičské finále na tuneli Branisko. *Tunel*. 1999, **8**(4), 26-32.
- [35] REYNOLDS, Patrick. TunnelTalk. *Lötschberg plans full rail baseline finish* [online]. 21. 3. 2019 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Switzerland-20Feb19-L%C3%B6tschberg-plans-full-twin-tube-rail-completion.php>
- [36] VUILLEUMIER, François a Markus AESCHBACH. *The Lötschberg base tunnel – lessons learned from the construction of the tunnel* [online]. 2004. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/228524960\\_The\\_Lötschberg\\_base\\_tunnel-lessons\\_learned\\_from\\_the\\_construction\\_of\\_the\\_tunnel](https://www.researchgate.net/publication/228524960_The_Lötschberg_base_tunnel-lessons_learned_from_the_construction_of_the_tunnel)
- [37] HENKE, Andreas. *Excavation, Using TBM, of the longest rail tunnel of the world, Concepts and experiences* [online]. [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.lombardi.ch/en-gb/publications/underground-structures>
- [38] 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 Paulo [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.heinzehrbartpartners.com/Publikationen/Tunnelbau-allgemein>
- [39] Final finish for Gotthard Baseline excavation. *TunnelTalk.com* [online]. [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Gotthard-Baseline-Mar11-Excavation-finished.php>
- [40] ITA-AITES. Gotthard Base Tunnel, Switzerland. *Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects* [online]. 2015, , 20-23 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://about.ita-aites.org/publications/search-for-a-publication>
- [41] FABBRI, Davide. *The Gotthard Base Tunnel - Project overview* [online]. [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.lombardi.ch/en-gb/publications/underground-structures>
- [42] ECLAIRCY-CAUDRON, Stéphanie, Daniel DIAS a Richard KASTNER. *Displacements and stresses induced by a tunnel excavation: case of Bois de Peu (France)* [online]. 2008 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/256090316\\_Displacements\\_and\\_stresses\\_induced\\_by\\_a\\_tunnel\\_excavation\\_case\\_of\\_Bois\\_de\\_Peu\\_France](https://www.researchgate.net/publication/256090316_Displacements_and_stresses_induced_by_a_tunnel_excavation_case_of_Bois_de_Peu_France)
- [43] EVERDELL, Richard. International Water Power & Dam Construction. *New tunnel to optimize hydro potential at Niagara* [online]. 2009 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurenew-tunnel-to-optimize-hydro-potential-at-niagara/>



- [44] *Niagara Tunnel Project* [online]. 2015 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.niagarafrontier.com/tunnel.html>
- [45] ITA-AITES. *Porce III Hydropower project, Colombia* [online]. 2015, s. 26-28 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://about.ita-aites.org/publications/search-for-a-publication>
- [46] NOVOTNÝ, Miloslav. Brennerský bázový tunel. *Tunel*. 2015, **24**(1), 78-80.
- [47] Brenner Base Tunnel – let the works begin!. *TunnelTalk* [online]. 2011 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Brenner-Base-Tunnel-Apr11-Let-construction-begin.php>
- [48] Brenner Base Tunnel under Construction. *TunnelTalk* [online]. 2012 [cit. 28. 12. 2020]. 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)
- [49] REYNOLDS, Patrick. Brenner project takes a major leap forward. *TunnelTalk* [online]. 2011 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.tunneltalk.com/Brenner-Base-Tunnel-Feb11-A-leap-forward.php>
- [50] VALKO, Jozef, Peter JANEGA, Ladislav GREGA a Igor JURÍK. Tunel Ovčiarsko. *ASB* [online]. 2015 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/tunely/tunel-ovciarsko>
- [51] MAJTÁNOVÁ, Alexandra. *Výpočet primárního ostění tunelu Ovčiarsko* [online]. Praha, 2020 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/88605/F1-BP-2020-Majtanova-Alexandra-vypocetprimosteni1.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. doc. Dr. Ing. Jan Pruška.
- [52] MATEJČEK, Antonín a Július BOHYNÍK. Význam realizácie prieskumnej štôlne pre tunel Višňové. *Tunel*. 2006, **15**(4), 12-19.
- [53] KELEŠI, Juraj. Stavebno-technologické zhodnotenie razenia prieskumnej štôlne Višňové. *Tunel*. 2003, **12**(2), 2-11.
- [54] ITA-AITES. Kuchtai hydroelectric power plant, Austria. *Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects* [online]. 2015, , 18-19 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://about.ita-aites.org/publications/search-for-a-publication>
- [55] ARMETTI, Giacomo, Maria RITA MIGLIAZZA, Federica FERRARI, Andrea BERTI a Paolo PADOVESE. *Geological and mechanical rock mass conditions for TBM performance prediction. The case of “La Maddalena” exploratory tunnel, Chiomonte (Italy)* [online]. 2018 [cit. 28. 12. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088677981731060X>
- [56] STILLE, Björn, Frederik JOHANSSON, Francisco RIOS BAYONA, R. BATRES ESTRADA a M. ROSLIN. *Stockholm Bypass Project – Passage under the Lake Mälaren*. 2019.
- [57] FINE SPOL. S.R.O. *GEO5 - Uživatelská příručka* [online]. 2020. Dostupné také z: <https://www.fine.cz/manualy/>
- [58] AUTORSKÝ KOLEKTIV, . *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. 1. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008.



- [59] BUTOVIČ, Alexandr. Průzkumná štola pro tunely Blanka. *Tunel*. 2004, **13**(1), 13-18.
- [60] Brenner Base Tunnel under Construction. *Tunnel* [online]. [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)

## Seznam obrázků

Obr. 1 Geologický profil bázového tunelu Kaponig [31]	18
Obr. 2 Hlavní konstrukční úseky Lötschbergského bázového tunelu [36]	20
Obr. 3 Jednokolejní tunelové trouby Lötschbergského bázového tunelu [36]	20
Obr. 4 Geologický profil Gotthardského bázového tunelu [40]	21
Obr. 5 Schéma systému Gotthardského tunelu [41]	21
Obr. 6 Geologický profil tunelu Bois de Peu [42]	22
Obr. 7 Geologický profil tunelu vodní elektrárny na řece Niagara [43]	23
Obr. 8 Příčný řez Brennerským bázovým tunelem [48]	24
Obr. 9 Podélný geologický řez Brennerským masivem [49]	24
Obr. 10 Geologický profil a postup realizované průzkumné štoly tunelu Višňové [53]	26
Obr. 11 Geologický profil průzkumného tunelu „La Maddalena“ [55]	27
Obr. 12 Geologický profil průchodu tunelu pod jezerem Mälaren [56]	28
Obr. 13 Zatřídění štoly a tunelu podle indexu QTS	36
Obr. 14 Příčný řez tunelu	38
Obr. 15 Příčné řezy štol	38
Obr. 16 Mohr-Coulombova obalová křivka	39
Obr. 17 Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku [58]	43
Obr. 18 Varianty umístění štoly v profilu tunelu	45
Obr. 19 Rozhraní modelu - varianta 1	46
Obr. 20 Rozhraní modelu - varianta 2	46
Obr. 21 Síť konečných prvků v okolí tunelu	47
Obr. 22 Směry hlavních napětí – primární napjatost	48
Obr. 23 Pásma napětí okolo výrubu	49
Obr. 24 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	62
Obr. 25 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm	66
Obr. 26 Průřez primárního ostění, tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm	66
Obr. 27 Průřez primárního ostění, tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	66
Obr. 28 Fenner-Pacherova křivka	74
Obr. 29 Příčný řez tunelu – model Blanka	77
Obr. 30 Příčné řezy štol – model Blanka	78
Obr. 31 Umístění bodů konvergenčních profilů tunelu a štoly	80
Obr. 32 Extenzometry - model Blanka	81
Obr. 33 Varianty štoly – model Blanka	82
Obr. 34 Rozhraní - model Blanka	82
Obr. 35 Síť konečných prvků - model Blanka	83



## Seznam tabulek

Tab. 1 České silniční tunely (část 1)	12
Tab. 2 České silniční tunely (část 2)	13
Tab. 3 České železniční tunely (část 1)	14
Tab. 4 České železniční tunely (část 2)	15
Tab. 5 Bázový tunel Engelberg [28] [29] [30] [31]	17
Tab. 6 Tunel Kaponig [32]	18
Tab. 7 Tunel Branisko [33] [34]	19
Tab. 8 Lötschbergský bázový tunel [35] [36]	19
Tab. 9 Gotthardský bázový tunel [37] [38] [39] [40] [41]	21
Tab. 10 Tunel Bois de Peu [42]	22
Tab. 11 Tunel vodní elektrárny na řece Niagara [43] [44]	22
Tab. 12 Tunel hydrotechnického projektu Porce III [45]	23
Tab. 13 Brennerský bázový tunel [46] [47] [48]	24
Tab. 14 Tunel Ovčiarsko [50] [51]	25
Tab. 15 Tunel Višňové [52] [53]	25
Tab. 16 Tunel vodní elektrárny Kühtai [54]	26
Tab. 17 Průzkumný tunel „La Maddalena“ [55]	27
Tab. 18 Tunely bypassu E4 ve Stockholmu [56]	28
Tab. 19 Náklady na realizaci 1 m štoly	33
Tab. 20 Náklady na realizaci 1 m tunelu, s předem realizovanou štolou	34
Tab. 21 Náklady na realizaci 1 m tunelu, bez realizace štoly	35
Tab. 22 Geologie 1	41
Tab. 23 Geologie 2	41
Tab. 24 Geologie 3	42
Tab. 25 Geologie 4	42
Tab. 26 Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory (MPa) [58]	43
Tab. 27 Parametry stříkaného betonu	44
Tab. 28 Číselné označení variant výpočtů	47
Tab. 29 Plocha výrubu štol a kaloty tunelu	51
Tab. 30 Porovnání výsledků výpočetních modelů	61
Tab. 31 Návrhové hodnoty zatížení - kalota	63
Tab. 32 Výsledky MSÚ KALOTA - tl. 250 mm, výztuž 2x $\varnothing$ 8 á 150 mm	63
Tab. 33 Návrhové hodnoty zatížení – tunel	65
Tab. 34 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2x $\varnothing$ 8 á 150 mm	65
Tab. 35 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2x $\varnothing$ 8 á 100 mm	67
Tab. 36 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 250 mm, výztuž 2x $\varnothing$ 10 á 100 mm	68
Tab. 37 Výsledky MSÚ TUNEL - tl. 300 mm, výztuž 2x $\varnothing$ 8 á 150 mm	69
Tab. 38 Výsledky posouzení primárního ostění	70
Tab. 39 Geologie – dobrotivské břidlice (model Blanka)	79
Tab. 40 Hodnoty konvergenčních měření	80
Tab. 41 Hodnoty extenzometrických měření	81
Tab. 42 Plocha výrubu štol a kaloty tunelu – model Blanka	85
Tab. 43 Hodnoty extenzometru JTT	85
Tab. 44 Hodnoty extenzometru STT	85





## Seznam grafů

Graf 1 Ohybový moment (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)	52
Graf 2 Normálová síla (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)	52
Graf 3 Deformace ostění (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)	53
Graf 4 Pokles terénu (geologie 1, mělký tunel, KALOTA)	53
Graf 5 Ohybový moment (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)	54
Graf 6 Normálová síla (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)	54
Graf 7 Deformace ostění – kalota (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)	55
Graf 8 Deformace ostění – dno (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)	55
Graf 9 Pokles terénu (geologie 1, mělký tunel, TUNEL)	56
Graf 10 Interakční diagram – kalota	63
Graf 11 Interakční diagram - tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	65
Graf 12 Interakční diagram – tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ8 á 100 mm	67
Graf 13 Interakční diagram - tunel, tl. 250 mm, výztuž 2xØ10 á 100 mm	68
Graf 14 Interakční diagram – tunel, tl. 300 mm, výztuž 2xØ8 á 150 mm	69
Graf 15 Ohybový moment (KALOTA JTT)	87
Graf 16 Normálová síla (KALOTA JTT)	87
Graf 17 Deformace ostění (KALOTA JTT)	88
Graf 18 Pokles terénu (KALOTA JTT)	88
Graf 19 Ohybový moment (DOKONČENÁ JTT)	89
Graf 20 Normálová síla (DOKONČENÁ JTT)	89
Graf 21 Deformace ostění – kalota (DOKONČENÁ JTT)	90
Graf 22 Deformace ostění - dno (DOKONČENÁ JTT)	90
Graf 23 Pokles terénu (DOKONČENÁ JTT)	91

## Seznam příloh

Příloha 1 Grafy vnitřních sil a deformací
Příloha 2 Statický výpočet – varianta 111
Příloha 3 Statický výpočet – varianta 211
Příloha 4 Statický výpočet – varianta 311
Příloha 5 Statický výpočet – varianta 411
Příloha 6 Statický výpočet – varianta 511
Příloha 7 Extenzometr JTT
Příloha 8 Extenzometr STT
Příloha 9 Konvergenční měření svislého poklesu primárního ostění štoly
Příloha 10 Konvergenční měření svislého poklesu primárního ostění tunelu