VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Únikové cesty v silničních a železničních tunelech při použití technologie TBM vs. NRTM

Escape Routes in Road and Railway Tunnels Using TBM technology vs. NATM

Student: Bc. Blanka Kramarová
Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Blanka Kramarová**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: Únikové cesty v silničních a železničních tunelech při použití technologie TBM vs. NRTM
Escape Routes in Road and Railway Tunnels Using TBM technology vs. NATM

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popis technologie TBM, popis technologie NRTM
3. Rozdíly pozitiva/negativa
4. Popis projektu tunelu Ejpovice
5. Popis konstrukčních řešení přechodu traťový tunel/úniková cesta
6. Numerický model problematiky na vybraném úseku tunelu
7. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.
Aldorf, J.: *Mechanika podzemních konstrukcí*. VŠB-TU Ostrava: 1999. ISBN 80-7078-695-7
Bielecki, R. *Mechanized tunnelling and segmental lining*. WSDTI. Hamburg 2009. ISBN: 978-3-00-025435-2.
R. R. Tatiya. Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment. A.A. BALKEMA PUBLISHERS LEIDEN. ISBN 90 5809 627 0
Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling* . Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015
Datum odevzdání: 30.11.2015

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukáši Ďurišovi, Ph.D. za svědomité vedení a rady při tvorbě matematického modelu. Mé díky patří i panu Ing. Ladislavu Teršovi z firmy Metrostav za ochotné jednání a poskytnutí informací k dané problematice a za uskutečnění prohlídky stavby tunelu Ejpovice.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KRAMAROVÁ, B. *Únikové cesty v silničních a železničních tunelech při použití technologie TBM vs. NRTM: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2015, 69 s. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Moje diplomová práce se zabývá problematikou technologie TBM a NRTM – únikové cesty v silničních a železničních tunelech. V úvodu je popsána technologie plnoprofilového razícího stroje (TBM – Tunnel Boring Machines) a nové rakouské tunelovací metodě (NRTM), jejich pozitiva a negativa. Následně je řešen projekt tunelu Ejpovice a metody konstrukčních řešení napojení tunelové propojky na traťový tunel. Dále je řešen matematický model na tunelu v Ejpovicích v softwaru Midas.

KLÍČOVÁ SLOVA: TBM, propojka, Midas GTS NX

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KRAMAROVÁ, B. *Escape Routes in Road and Railway Tunnels Using TBM technology vs. NATM: master thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Geotechnical and Underground Engineering, 2015, 69 s. Thesis head: Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

My master thesis deals with escape routes in road and railway tunnels using TBM technology vs. NATM. In the introduction describes the technology Tunnel Boring Machines (TBM) and New Austrian tunnelling method (NATM), they advantages and disadvantages. Subsequently, the project focused on the tunnel Ejpovice methods and design solutions connecting cross passage on track tunnel. Also describe mathematical model on the tunnel in Ejpovice in software Midas.

KEY NOTES: TBM, cross passage, Midas GTS NX

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

Seznam použitého značení 9

1 **Úvod** 10

2 **Popis technologie TBM, popis technologie NRTM** 11

2.1 Technologie TBM 11

2.2 Technologie NRTM 19

3 **Rozdíly pozitiva/negativa** 21

3.1 Pozitiva a negativa TBM při ražení tunelů 21

3.2 Pozitiva a negativa TBM při ražení tunelů 21

4 **Popis projektu tunelu Ejpovice** 22

4.1 Popis stavby 22

4.2 Určující podmínky pro výstavbu tunelu 23

4.3 Postup výstavby 23

4.4 Tunelové ostění 24

4.5 Výběr a popis stroje SM - V5 (EPBS) 27

5 **Popis konstrukčních řešení přechodu traťový tunel/úniková cesta** 29

5.1 Návrh konstrukčního řešení přechodu traťový tunel/úniková cesta 29

5.1.1 Metoda ocelových rozpěr (pomocná ocelová konstrukce) 29

5.1.2 Metoda pomocí dočasného podepření betonového ostění 30

5.1.3 Metoda příhradových segmentů 32

5.1.4 Metoda pomocí spojovacích trnů 33

5.1.5 Metoda pomocí ocelových kazet 34

5.1.6 Metoda zmrazování 36

6 **Numerický model problematiky na vybraném úseku tunelu** 38

6.1 Lokalita a geometrie 38

6.2 Geologická a hydrogeologická charakteristika území v trase tunelu 38

6.2.1 Geomorfologie 38

6.2.2 Geologická stavba území 39

6.2.3 Kvartérní pokryvy 39
6.2.4 Hydrogeologické poměry 40
6.3 Matematický model tunelové propojky v programu Midas GTS NX 41
6.3.1 Vyhodnocení výsledků modelu č.1 44
6.3.2 Vyhodnocení výsledků modelu č.2 56
7 **Zhodnocení a závěr** 61
8 **Seznam obrázků** 63
9 **Seznam tabulek** 66
10 **Seznam použité literatury a podkladů** 67

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

TBM	Tunnel Boring Machines – plnoprofilový razící stroj	[-]
NRTM, NATM, NÖTM	Nová rakouská tunelovací metoda	[-]
EPBS	Earth Pressure Balance Shield – zeminový štít	[-]
APB	Air Pressure Ballance – pneumatický štít	[-]
SPB	Slurry Pressure Ballance – bentonitový štít	[-]
EPB	Earth Pressure Ballance – zeminováý štít	[-]
RQD	Rock Quality Designation – redukovaný výnos jádra	[-]
m	metry	[-]
s	sekundy	[-]
l	litr	[-]
m.n.m.	metr nad mořem	[-]
mm	milimetry	[-]
km	kilometry	[-]
t	tuna	[-]
m^2	čtvereční metr	[-]
m^3	krychlový metr	[-]
ºC	stupeň Celsia	[-]
^{0}	stupeň	[-]
h	hodina	[-]
ν	Poissonovo číslo	[-]
kN	kilonewton	[-]
kPa	kilopascaly	[-]
MPa	megapascaly	[-]
c_{min}	minimální krytí výztuže	[mm]
γ	objemová tíha	[kN/m^3]
E_{def}	deformační modul	[MPa]
E_b	deformační modul betonu	[MPa]
c_{ef}	soudržnost efektivní	[kPa]
ϕ	úhel vnitřního tření	[^{0}]

1 ÚVOD

V dnešní době jsou tunely začleňovány do silniční a železniční dopravy, jelikož technologie ražby je mnohem vyspělejší a ekonomicky dostupnější než před lety. Díky této technologie se doprava stává rychlejší a bezpečnější i v hornatých oblastech.

Železniční koridory pro začlenění České republiky do evropské dopravní infrastruktury jsou nedílnou součástí dopravních staveb, a jak je dnes již každému známo, není třeba jej zvláště zdůrazňovat. Výstavba tunelů je nezbytná z důvodu zrychlování železniční dopravy, tak z důvodu energetické náročnosti. Na rychlý rozvoj silničních a železničních tunelů musíme klást velký důraz na bezpečnost. Dvoutubusové silniční a železniční tunely vyžadují tunelové propojky mezi sebou nebo jednotubusový dopravní tunel a částí vymezenou pro bezpečný únik cestujících v případě nouze. Návrh a konstrukce tunelových prostupů může být technicky náročným elementem celého projektu stavby a je nedílnou součástí celkových stavebních nákladů a harmonogramu stavebních prací. Projektování a realizace tunelů v současné době již neznamená jen přesné zvládnutí geotechnické problematiky nebo technologických postupů výstavby. Nad bezpečností silničních a dálničních tunelů dohlížejí sofistikované řídicí systémy a při návrhu technického řešení je nezbytné zohlednit nejen bezpečnost provozu či výši investičních nebo provozních nákladů, ale i vliv na životní prostředí. Tunel je vnímán jako speciální dopravní stavba nejen kvůli vyšším investičním a provozním nákladům, ale hlavně z hlediska množství a různorodosti speciálních technologií. Tyto technologie zajišťují bezpečný a plynulý provoz. Tunely patří mezi inteligentní dopravní systémy, které se opírají o jednotnou architekturu i komunikační možnosti.

Tato diplomová práce popisuje různé konstrukční metody propojení dopravních tunelů a tunelů určených pro bezpečný východ osob. Dále pak jejich výhody a nevýhody při realizaci.

2 POPIS TECHNOLOGIE TBM, POPIS TECHNOLOGIE NRTM

2.1 Technologie TBM

TBM je zkratka z anglického výrazu Tunnel Boring Machines, po případně z německého výrazu Tunnel bohr maschine. Jedná se o velký stroj, který doslova vrtá do horniny tunel. Základ celého razícího stroje je vrtná hlava, která je kruhového tvaru na výšku celého tunelu. Jelikož se vrtná hlava točí, připadá pouze kruhový tvar tunelu. Běžně má průměr vrtné hlavy i přes deset metrů.

Tato metoda je přibližně stará 30 let a v posledních letech se hojně rozšířila. Plnoprofilový razící stroj je výkonný mechanismus, který umožňuje kontinuálně rozpojit horninu v celé čelbě tunelu plným profilem bez použití trhacích prací a současně budovat segmentové ostění. V současné době se realizuje definitivní ostění, tvořeno prefabrikovanými železobetonovými tybinky, které jsou skládány do tzv. prstence. [1]

Podle velikosti průřezu rozlišujeme:

- *TBM malého průřezu* - s výrubem < 5 m, pro ražbu průzkumných, energetických a vodohospodářských štol

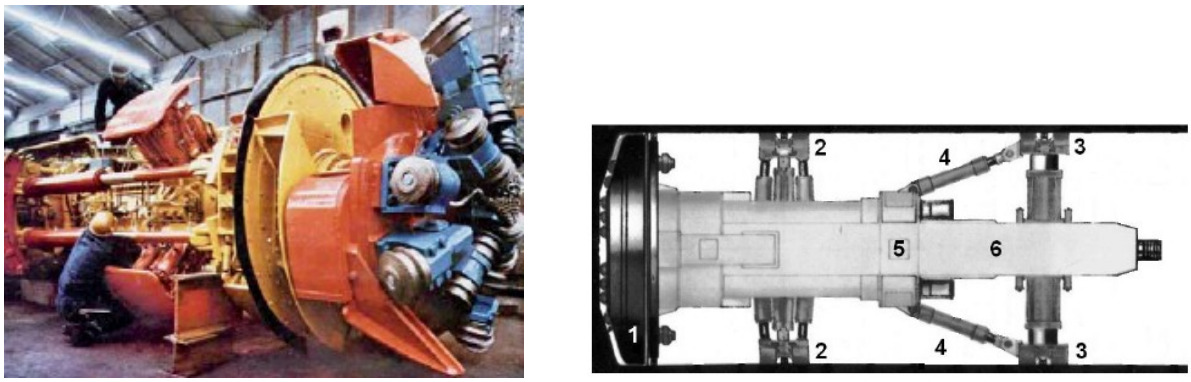
- *TBM středního průřezu* - s výrubem 5 – 10 m, pro ražbu traťových tunelů metra a jednokolejných železničních tunelů

- *TBM velkého průřezu* - s výrubem > 10 m, pro ražbu silničních a dvoukolejných železničních tunel. [1]

Podle plnoprofilových tunelovacích strojů:

Razící stroje (TBM - Tunel Boring Machine)

- *TBM bez štítového pláště (otevřené)*
  Označovány též jako „gripper TBM“. Otevřené TBM určené pro pevné skalní horniny. [2]



Obr. 1 - Razící stroj bez štítu do pevných skalních hornin [3], [2]

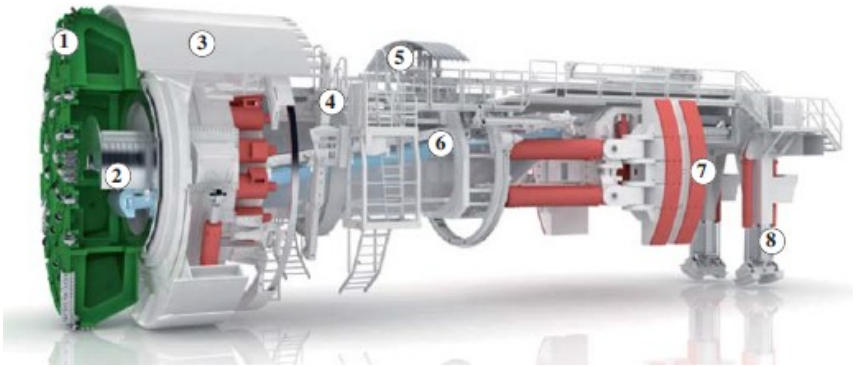
1 – razící hlava s pracovními nástroji; 2 – přední přítlačné desky; 3 – zadní přítlačné desky; 4 – axiální lisy; 5 – pohonná jednotka;6 – teleskopicky hřídel

- *TBM se štítovým pláštěm*

  Použití do geologických podmínek, kdy je nutno zajistit výrub za vrtací hlavou pod ochranou pláště. Podle štítového pláště rozlišujeme:

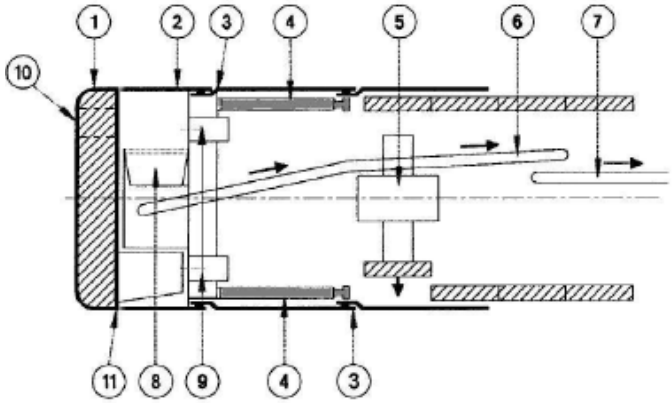
  - TBM s jednoduchým pláštěm

Určeno pro pevné horniny s poruchovými pásmy. Razící stroj s ocelovým pláštěm, pod jehož ochranou se montuje pomocí ukladače tybinků (erektoru) železobetonové ostění. Nemá vlastní přítlačné desky, proto je velice podobný mechanizovanému štítu. [2]



Obr. 2 - TBM bez štítu (s ochranným štítkem) [3]

1 – řezná hlava, 2 – sběrač rubaniny, 3 – ochranný štítek, 4 – vrtačka, 5 – erektor pro instalaci kari sítí / profilované výztuže, 6 – pásový dopravník, 7 – radiální rozpěrné desky, 8 – spodní výsuvné podpěry

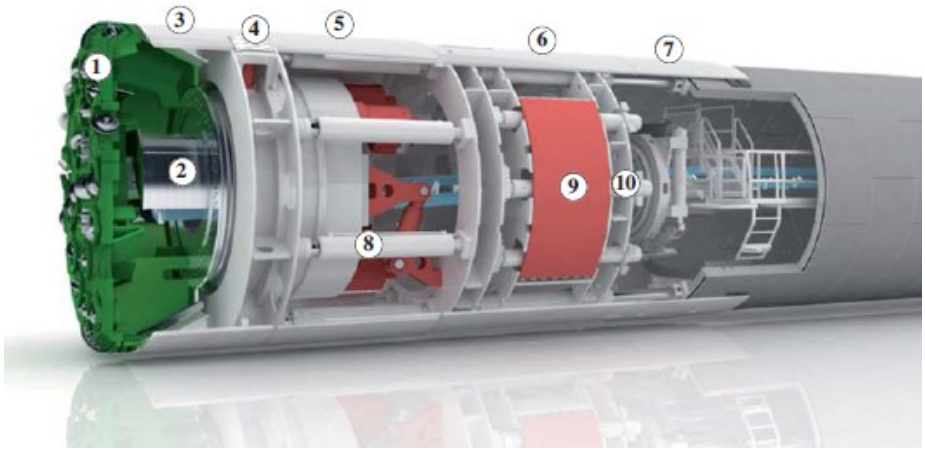


Obr. 3 - Schéma TBM s jednoduchým pláštěm [2]

1 – razící hlava; 2 – plášť; 3 – kloubový spoj; 4 – axiální lisy; 5 – erektor;6 – hrablový dopravník; 7 – pásový dopravník; 8 – násypka;9 – elektromotory; 10 – průlezný otvor; 11 – obvodové těsnění

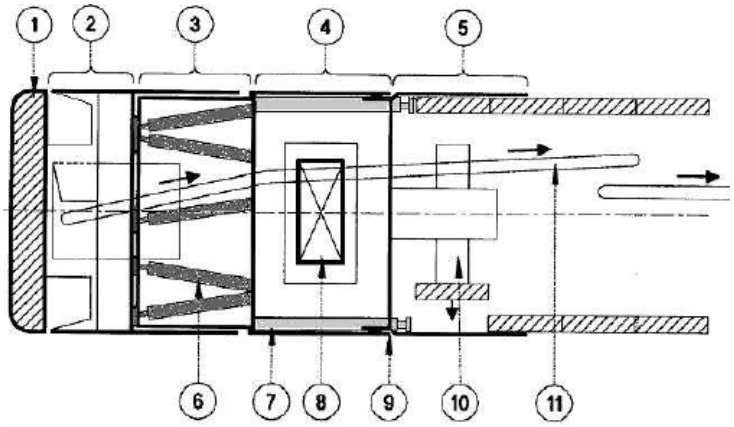
- TBM s dvojitým pláštěm

Plášť tvořen z pevné a pohyblivé (teleskopické) části. V TBM se nachází dvě soustavy lisů - přední slouží k samostatnému teleskopickému posuvu jeho přední části a zadní lis slouží k posuvu celého stroje. Pokud není hornina příliš stabilní pro opření přítlačných desek, tento stroj pracuje jako TBM s jednoduchým pláštěm. [2]



Obr. 4 – Razící stroj TBM s dvojitým štítem [3]

1 – řezná hlava, 2 – sběrač rubaniny, 3 – přední štít, 4 – stabilizátor, 5 – střední štít, 6 – část středního štítu s přítlačnými deskami, 7 – zadní štít, 8 – přední tlačné písty, 9 – přítlačná radiální deska, 10 – zadní tlačné písty

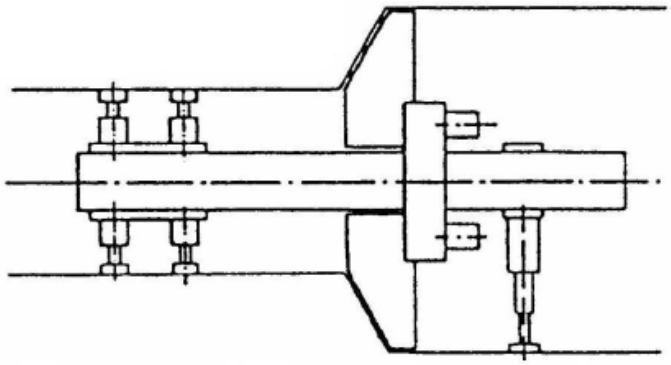


Obr. 5 - Schéma TBM s dvojitým pláštěm [2]

1 – razící hlava;2,3 – pevná část pláště; 3,4,5 – teleskopická část pláště; 4 – stabilizační část; 5 – koncová část; 6 – přední lisy; 7 – zadní axiální lisy; 8 – přítlačné desky; 9 – kloub; 10 – erektor; 11 – pásový dopravník

- *TBM s rozšiřováním průřezu*

  Tento princip se uplatňuje pouze u TBM velkých průřezů, kde se nachází proměnné geologické prostředí. Standardně se používá jednostupňový razící stroj s rozšiřováním výrubu.



Obr. 6 - Schéma TBM s rozšiřováním průřezu [1]

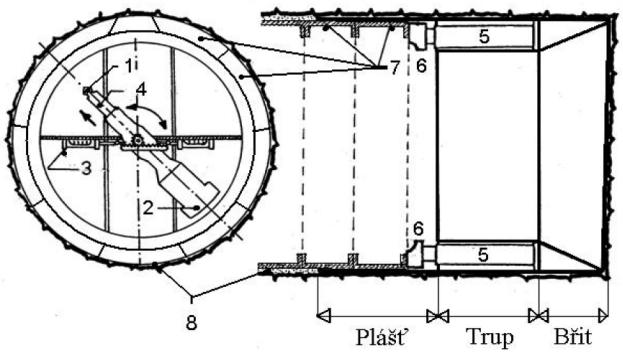
Štíty

- *Nemechanizovaný tunelovací štít*

  Štít se vyznačuje ocelovým válcem s břitem, který je protlačován zeminou, popřípadě poloskalní horninou. Pod ochranou válce probíhali veškeré práce s rozpojováním horniny i výstavba definitivního ostění v koncové části štítu – plášti. Klasické nemechanizované tunelové štíty neměly původně v čelbě žádný rozpojovací orgán ani automatizované nakládání rubaniny.

Nemechanizovaný štít tvoří tři základní části:

- břitový prstenec (břit), ve kterém se rozpojuje hornina a nakládá rubanina.
- trupový prstenec (trup), který je sestavený z ocelových svařovaných dílců a tvoří nosnou část štítu. V trupu jsou umístěny štítové lisy a erektor.
- plášť ze silného ocelového plechu, který chrání prostor, ve kterém se provádí ostění z tybinku. [2]



Obr. 7 – Schéma nemechanizovaného tunelovacího štítu [2]

1 – čelisti erektoru pro uchopení tybinku; 2 – protizávaží; 3 – hydraulické lisy pro pohyb erektoru; 4 – hydraulicky výsuvné rameno erektoru; 5 – štítové lisy; 6 – opěrná patka; 7 – tybinky; 8 – výplňová injektáž za ostění

- *Mechanizované štíty*
  - Štíty s postupným pobíráním v čelbě

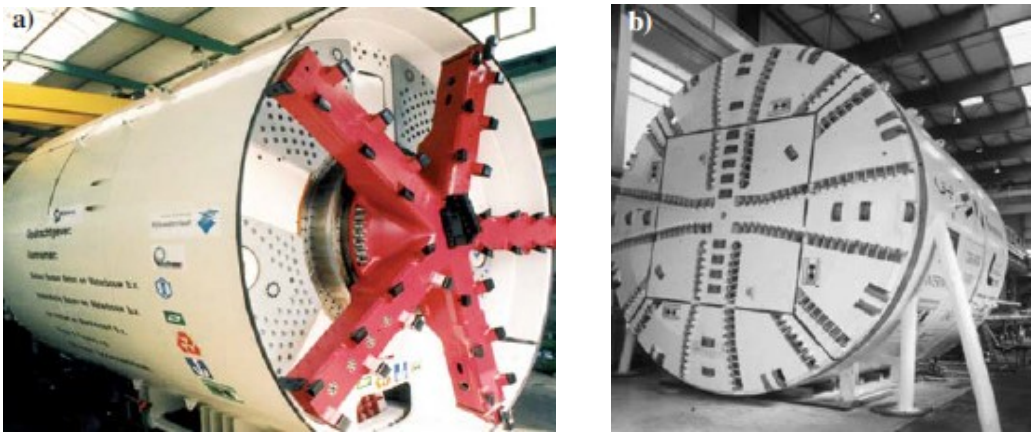
Zemina se obvykle v otevřené čelbě rozpojuje mechanismy s dílčím záběrem, které jsou upevněny v přední části štítu na hydraulicky výsuvném a současně otočném výložníku. Štíty rozpojuji horninu v čelbě postupně buď výložníkovou frézou, případně tunelbagrem. [2]

Obr. 8 – Štíty s postupným pobíráním v čelbě [2]

a) s výložníkovou frézou; b) s tunelbagrem

- Štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě

Štíty byly technicky upraveny pro tunelování v nejrůznějších typech zemin a poloskalních hornin, výrazně se uplatňují zejména v obtížnějších geologických podmínkách, například v zeminách nestabilních, silně propustných a zvodnělých. V zeminách pevné až tvrdé konzistence, v nichž nehrozí nebezpečí závalu, je *čelba bez podepření* a razící hlava má tvar paprskového kola (obr. a), jeho ramena jsou opatřena řeznými nástroji (řeznými dláty či valivými řeznými disky). V měkkých plastických až kašovitých zeminách je razící hlava uzavřena, protože čelba musí být *celoplošně podepřená*, aby nedošlo ke ztrátě její stability. V razící hlavě s vystupujícími noži jsou jen štěrbinové otvory, které dovolí jen velmi omezené vtlačování zeminy do vnitřku štítu (obr. b). [2]



Obr. 9 – Štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě [2]
a) štít bez podepření čelby; b) štít s mechanicky podepřenou čelbou

- *Štíty s tlakovou kontrolou čelby*

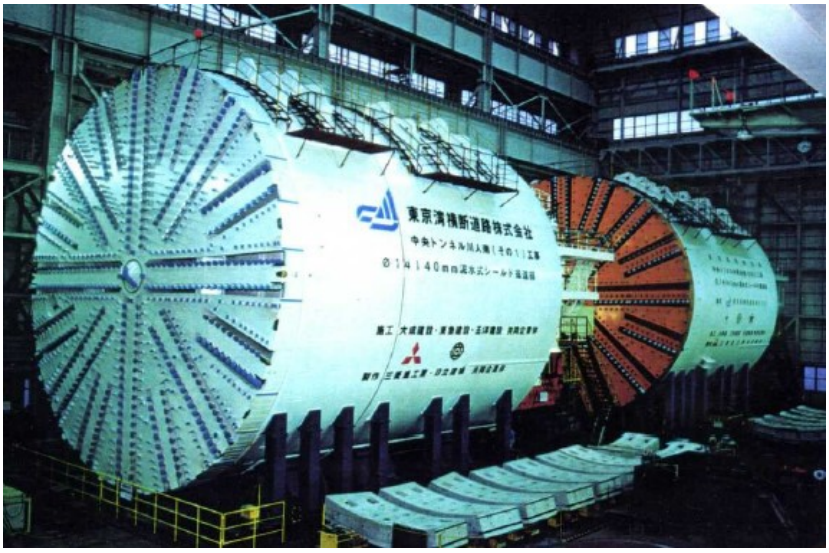
  V nestabilních, zvodnělých zeminách a poloskalních horninách se používají typy štítů, které účinně natlakovaným médiem stabilizují čelo výrubu a zabraňují vniknutí vody do prostoru štítu. [2]

- Pneumatický štít (APB – Air Pressure Ballance)

Štíty jsou navrženy tak, že jejich vzduchotěsná přepážka je součásti břitové části štítu, tak pod přetlakem vzduchu je jen omezený prostor razicí hlavy před tlakovou přepážkou, kdežto pracovní prostor řízení stroje a výstavby ostění je v prostředí s normálním atmosférickým tlakem, což je pro pracovní osádku z hlediska pracovního prostředí v podzemí ideální. Určeny do hrubozrnných zvodněných zemin typu kamenitých štěrků. [2]

- Bentonitový štít (SPB – Slurry Pressure Ballance)

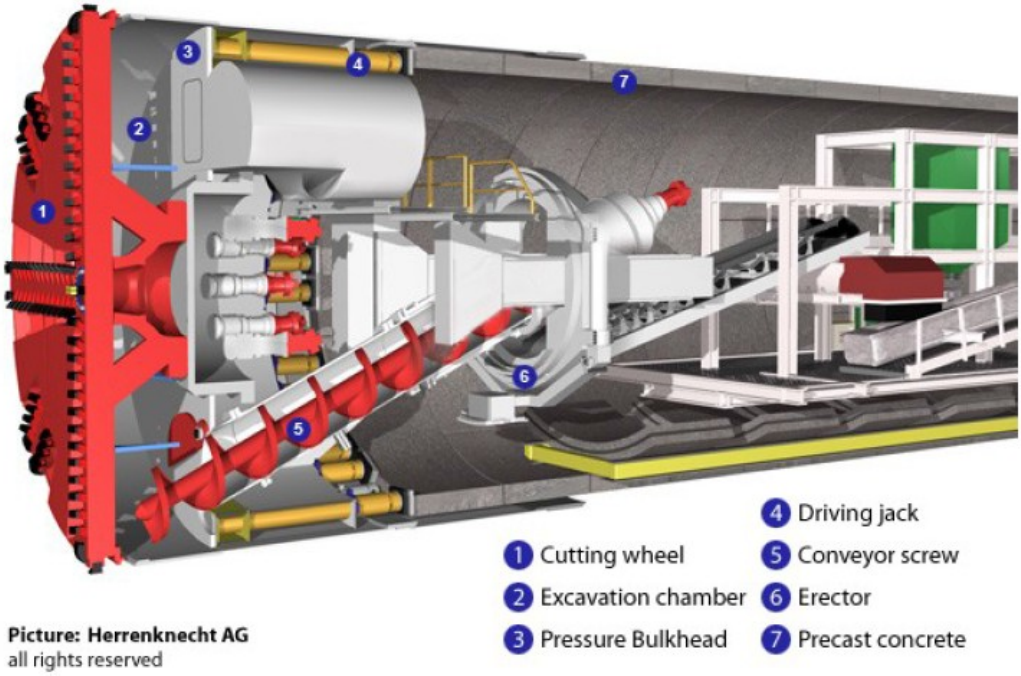
Mají podobné uspořádání jako bentonitové štíty s rozdílem, že v čele štítu, kde je tlakotěsnou přepážkou vytvořená komora, je místo stlačeného vzduchu bentonitová suspenze, která je natlakovaná. Vhodné do velmi propustných a nesoudržných zemin, např. písčité štěrky pod vodními toky, popřípadě pod dnem moře. [2]



Obr. 10 - Bentonitový štít [2]

- Zeminový štít (EPB – Earth Pressure Ballance)

Používá se v tlačivých nestabilních horninách, bez masivní přítomnosti vody. Stroj EPBS patří mezi technicky složitější typy mechanizovaných strojů. Jako pažící médium, které zajišťuje stabilitu čelby, působí u EPBS rozpojená zemina. Řezné nástroje (1), které jsou umístěné na vrtné hlavě stroje, rozrušují a vtlačují zeminu do pracovní komory (2), kde se dále mísí s plastickou zeminovou kaší, která je už v pracovní komoře připravena. Tato pracovní komora je od zbytku tunelu oddělena tlakovou stěnou (3). Přítlačná síla se pomocí uzavíratelné přepážky pracovní komory přenáší na zeminovou kaši a zabraňuje nekontrolovatelnému vtlačování rubaniny z čelby do pracovní komory, čímž vzniká rovnovážný stav. Šnekový dopravník (5) dopravuje zeminovou kaši z pracovní komory přes trubku do prostoru s atmosférickým tlakem.[2]



Obr. 11 – Průřezové schéma zeminovým štítem [7]

1 – řezná hlava; 2 – pracovní (přetlaková) komora; 3 – tlaková stěna oddělující pracovní komoru od zbytku štítu; 4 – posuvné lisy; 5 – šnekový přepravník; 6 – erektor; 7 – segmentové ostění

2.2 Technologie NRTM

Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM, v anglickém jazyce NATM, v německém jazyce NÖTM) byla v roce 1944 definována a shrnuta Leopoldem von Rabcewiczem a v roce 1948 si ji nechal patentovat. Díky vývoji technologie stříkaného betonu (patent A. Brunnera z roku 1951) a kotvení (z USA, v Rakousku od 1951) došlo k rozšíření této metody.

NRTM patří mezi konvenční tunelovací metody, tj. metody, které během technologického postupu nevyužívají plnoprofilové razící stroje (TBM) nebo štíty. Metoda je velmi universální a flexibilní, použitelná pro všechny typy podzemních staveb a pro různorodé geologické prostředí.

NRTM je rozšířená po celém světě, které při správném použití může výrazně snížit stavební náklady. Tato tunelovací metoda využívá *observační* přístup – vyžaduje se, aby průběh stavby byl monitorován, způsob ražby a zajištění výrubu je upravován podle skutečného chování horninového prostředí.

Hlavní myšlenkou podle Prof. Rabcewicze a Prof. Mülera je využití nosných vlastností horninového masivu s cílem zabezpečit výrub a minimalizovat ekonomické náklady. Při výstavbě tunelů NRTM je stabilita výrubu zajištěna primárním ostěním. Definitivní (sekundární) ostění je budováno až po ustálení napěťo-deformačního stavu okolní horniny.

Mezi hlavní konstrukční prvky primárního ostění patří stříkaný beton a kotevní systém. Metoda je navržena tak, aby mohla být upravována pro různé geologické podmínky, které se v dané trase tunelu vyskytnou. Snaha je co nejlépe udržet původní pevnost horniny a zabránit jejímu rozvolnění. Deformace plochy výrubu podzemního díla musí být usměrňovány tak, aby byla mobilizována horninová klenba co nejblíže líci výrubu. Primární ostění je třeba zřizovat a aktivovat v co možná nejkratším čase a jeho konstrukce musí vykazovat optimální míru tuhosti. Znamená to, že jeho konstrukce nesmí být ani příliš tuhá (ostění horninu nenese nebo jen minimálně – předimenzované a neekonomické ostění) ani příliš deformovatelná (ostění může vlivem nesení horniny zkolabovat). Jak bylo zmíněno již výše, nedílnou součástí této metody je geotechnický monitoring, která se opírá především o měření deformací tunelového výrubu. [6], [24], [25]

Podle Prof. Müllera a Prof. Rabcewicze bylo definováno v roce 1978 22 zásad NRTM. Uvedu jen několik hlavních bodů, které NRTM definuje:

- Hlavním nosným prvkem tunelu je horninový masiv, který jej obklopuje
- Při výstavbě je zapotřebí chránit únosnost horninového masivu, zabránit zvětrávání, uvolňováním a deformacím vlivem času a rychlosti ražení
- Výztuž musí být zabudována v optimálním čase a zároveň musí umožnit vnitřní dotvarování horniny. Pro stanovení časového faktoru zabudování výztuže jsou potřebná laboratorní a polní měření a především monitoring během výstavby
- Pro stabilitu horniny se nejčastěji používá stříkaný beton v kombinaci se svorníky, sítěmi a výztužnými ocelovými oblouky
- Stříkaný beton se provádí jako tenkostěnná skořepina, jelikož snižuje vliv ohybových momentů
- Aby se zabránilo lokálním koncentracím napětí, má mít výrub oblý nebo oválný tvar. Ze statického hlediska je hranatý, respektive členitý výrub nežádoucí
- Sekundární ostění má být také tenkostěnné, poddajné a má mít s primárním ostěním silový styk, aby byl mezi nimi přímý přenos sil
- Proti vnějšímu tlaku vody a hydrostatickému tlaku v hornině se skořepiny zajistí vhodně uspořádaným systémem drenáží
- Kontrola správného dimenzování spočívá především v měření napětí betonu, měření napětí na kontaktu hornina-výztuž a měření posunů hornin a výztuže v průběhu stavby [6], [24]

3 ROZDÍLY POZITIVA / NEGATIVA

3.1 Pozitiva a negativa TBM při ražení tunelů

TBM patří mezi jedno z nejmodernějších tunelářských způsobů práce. Mezi její velkou předností patří především rychlost, bezpečnost a pracovní podmínky. Díky této technologii je realizováno přibližně 80% nově realizovaných tunelů. Dále TBM vytváří hladký obrys a minimálně poškozuje okolí masívu ražbou. V důsledku toho se snižují náklady na zbudování tunelu a technologie je použitelná i pod hustou městskou zástavbou. Srovnáním s ražbou s trhavinami jsou výrazně lepší hygienické podmínky a pracovní bezpečnost. Pracovní postup je plně mechanizovaný, díky tomu se v příznivých geologických podmínkách dosahuje vysokých výkonů.

Razící stroje TBM mohou razit pouze výruby kruhového průřezu a změna velikosti průřezu lze měnit jen v omezené míře – konstantní průřez. Další nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na zbudování startovací komory a samotného stroje – čím je TBM universálnější a komplexnější, tím náklady rostou. TBM potřebuje také dobrou kvalitu horniny, jelikož se obtížně přizpůsobuje inženýrsko-geologickým poměrům v trase tunelu. Při změně podmínek dochází ke snížení rychlosti ražení. Stroje jsou obzvlášť náchylné na překonávání rozsáhlejších poruchových zón v trase tunelu, kde jsou často potřebná rozsáhlá a nákladná opatření i zdlouhavá přestavba razícího stroje. [1], [6], [25]

3.2 Pozitiva a negativa NRTM při ražení tunelů

Metoda je celosvětově rozšířená, jenž při správném použití výrazně snižuje stavební náklady při zajištění požadované bezpečnosti a kvality. Hlavní výhoda NRTM spočívá ve flexibilitě, jelikož může okamžitě reagovat na změnu prostředí díky monitoringu. Dále je tato metoda označována jako universální, protože je použitelná téměř pro všechny typy podzemních staveb a téměř pro všechny geologické prostředí. NRTM je vhodná pro širokou řadu tunelů a jejich geometrii, např. nekruhové tunely (podkova, tlama) a tunely různých tvarů. Negativa NRTM spočívá především v nevhodném zvodněném nesoudržném prostředí a vysoce propustných zeminách. Vhodnost NRTM se snižuje v měkčím zeminovém prostředí, který může ustupovat, když je vyhloubený. Nezbytné jsou vysoce kvalifikovaní pracovníci a odborní inženýři. [1], [6], [12]

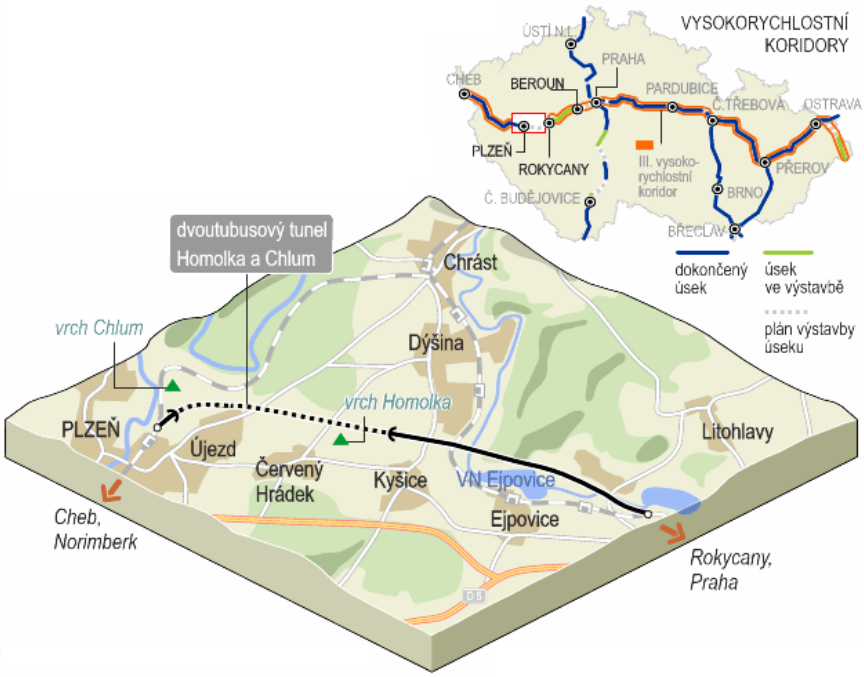
4 POPIS PROJEKTU TUNELU EJPOVICE

4.1 Popis stavby

Železniční stavba řešící modernizaci stávající dvoukolejné elektrizované trati Praha – Plzeň v úseku Rokycany – Plzeň, která je součástí vnitrostátního třetího tranzitního železničního koridoru. Cílem modernizace je ve vytvoření kvalitní železniční dopravy České republiky. Stavba modernizace trati obsahuje soubor činností, jejichž výsledkem bude především ve zvýšení výkonnosti, životnosti a pohodlí nové trati spolu se zvýšením bezpečnosti železničního provozu.

V podzemí masivu Homolky a Chlumu budou vedeny dva jednokolejné železniční tunely. Portálové části byly realizovány v jedné společné stavební jámě. Jižní tunel bude mít celkovou délku tunelu 4 150 m a jižní tunel bude o 26 m delší kvůli většímu poloměru oblouku. Tunely budou raženy pomocí metody TBM, počáteční úseky budou hloubené a to v délce 60 a 70 m. Celkem budou tunely propojeny osmi propojkami, z toho pět v části tunelu pod masivem Homolka, jedna v podzemí u silnice Újezd - Bukovec a dvě pod masivem Chlumu. Tyto propojky budou především sloužit k úniku cestujících požárem zasaženého tunelu do bezpečí druhého tunelu, dále pro přístup hasičské záchranné služby v době zásahu a také pro umístění technologických objektů (např. transformaci) sloužící železniční dopravě.

Ražba jižního (levého) tunelu začala počátkem roku 2015 ve směru na Plzeň a bude ukončena na západní straně Chlumu, a to v září 2015. Poté bude následovat demontáž stroje, který se přemístí vyraženým tunelem zpět k vjezdovému (východnímu) portálu, kde bude opět složen do původního stavu před severním (pravým) tunelem. Ražba severního tunelu je plánovaná na leden 2016 a bude ukončena v září 2016. [7]



Obr. 12 - Situace tunelu (ceskenoviny.cz [11])

4.2 Určující podmínky pro výstavbu tunelu

Výstavba železniční tratě splní podmínky požadavku na výrazné zkrácení železniční tratě mimo údolí Berounky, ve kterém je vedena stávající železniční trať. Modernizovaná trať poskytne cestujícím vyšší standart služeb, zejména dojde k výraznému zkrácení jízdní doby (až o 10 minut), vyšší bezpečnost dopravy a bezbariérový přístup na nástupiště uzpůsobený i pro osoby se sníženou schopností pohybu a orientace. Hlavním cílem stavby je především zvýšení maximální traťové rychlosti ze současných 80 – 100 km/h na 120-160 km/h a zkrácení úseku o 6,09 km. Do budoucna se plánuje napojení na vysokorychlostní železniční trať, s kterou se uvažuje od vjezdových portálů tunelu Homolka směrem na Ejpovice. Pro obyvatele, kteří žijí blízko trati, bude mít projekt pozitivní přínos v omezení hlukové zátěže železničního provozu díky novým protihlukovým opatřením. [9]

4.3 Postup výstavby

Návrh postupu výstavby dvou jednokolejných traťových tunelů technologií TBM předpokládá nasazení jednoho tunelovacího stroje v traťovém úseku mezi městy Rokycany a Plzeň. Zařízení staveniště umožňuje kapacitní zásobování segmentového ostění a zároveň

odtěžování vyrubané zeminy. Odtěžování rubaniny je prováděno pomocí pásového dopravníku.

Ražba pomocí EPBS je prováděna ve směru od Rokycan do Plzně. Po vyražení jižního (levého) tunelu v délce zhruba 4 120 m bude razící stroj rozebrán a převezena na vjezdový portál, kde se smontuje před budoucí severní tunel. Ražba probíhala od vjezdového portálu směrem k Plzni a vyrubaný materiál se skladuje na mezideponii staveniště. Výroba segmentového ostění se nachází v nedaleké Dýšině, přibližně 2 km od raženého tunelu. První tybinky se vyráběly v červenci 2014, aby se udělaly zásoby a později stačily tempu tunelovacího stroje. Tybinky obsahují volně rozptýlená 1 mm tenkých a 60 mm dlouhých drátků, také obsahují i polypropylenová vlákna, která zvyšují požární odolnost konstrukce a omezují vznik povrchových trhlin.[10], [13]

Obr. 13 - Forma na segmenty

4.4 Tunelové ostění

Pro návrh segmentového ostění neexistuje universální metoda. Návrh segmentové ostění vychází z dřívějších zkušeností projektantů, které získaly znalosti během předcházejících projektů. Vzhledem k tomu, že pro návrh segmentového ostění vstupuje mnoho faktorů, je velmi těžké stanovit univerzální metodu pro návrh. Nosná konstrukce tunelového ostění musí po dobu své životnosti splňovat funkce, které jsou požadovány investorem, a projektant je musí zohlednit ve svém návrhu:

- trvalá výztuž musí sloužit po celou dobu životnosti nosné konstrukce – nejčastěji požadovaná životnost konstrukce je 100 let,

- nesmí dojít ke změně vnitřního průřezu ostění během užívání,
- ostění musí být nepropustné, z důvodu zabránění průsakům podzemní vody do prostoru tunelu. Ostění musí zajistit nepropustnost pro podzemní vodu již v průběhu ražby.
- segmentové ostění musí poskytnout podporu pro další vybavení tunelu.

Jedno z nejdůležitějších funkcí segmentového ostění je poskytnutí opory pro zapření tunelovacího stroje během ražby. Dále je třeba zajistit, aby v již hotovém ostění bylo možno provádět konstrukční popřípadě i dopravní práce.

Segmentové ostění je charakteristické velmi vysokou přesností výroby prefabrikátů a systémovým osazováním těsnících pásků přímo na vyrobené prefabrikáty. Geometrické odchylky jsou minimální, a proto těsnící pásky vložené do obvodových drážek pak ve spárách ostění zatěsňují podzemní dílo proti účinkům podzemní vody. Segmentové ostění podzemního díla se skládá z jednotlivých prstenců kruhového tvaru. Kruhové ostění je navrženo jako jednoplášťové s uzavřeným systémem izolace.Ostěnítvoří prefabrikované železobetonové segmenty, s vnitřním průměrem 4,35 m, tloušťka segmentu je 0,40 m, šířka nosného prstence 2,0 m, beton ostění C45/55. V místech napojení na spojovací chodby budou segmenty vyztuženy rozptýlenou výztuží. [10]

Obr. 14 – Segmentové ostění

- Materiál segmentového ostění

Základní materiál tybinků je beton. Segmentové ostění je vyztuženo ocelovou rozptýlenou výztuží a její kombinací s klasickou betonářskou výztuží. Výhodou železobetonových dílů je především vysoká ohybová tuhost spojená s rozvojem trhlin, zatímco výhodou betonu s rozptýlenou ocelovou výztuží (drátkobeton, vláknobeton) je

omezení šířky trhlin. Betonová směs obsahuje volně rozptýlené 1 mm tenkých a 60 mm dlouhých drátků a současně obsahuje polypropylenová vlákna na zvýšení požární odolnosti konstrukce. Doba trvanlivosti ocelových sítí, jež jsou v segmentech použity, závisí na propustnosti segmentů. Minimální krytí požadované z hlediska trvanlivosti ocelové výztuže je navrženo c_{min}= 60 mm. [10]

Obr. 15 - Ocelová vlákna (drátky) používaná pro drátkobeton (délka 60 mm)

- Izolace a těsnění segmentů

Nepropustnost segmentového ostění je možné dvěma způsoby. Segmenty samotnými, jejichž propustnost je omezena a nepropustnou izolací, která je uložena mezi segmenty (pryžové těsnící pásky). Segmenty jsou opatřeny žlábkem pro umístění těsnění a nesmí dojít k deformacím této těsnící drážky. Pryžové pásky jsou vkládány do formy, aby se ukotvily do betonu. U železobetonových segmentů je potřeba těsnění chránit proti poškození při ukládání armokoše. Izolace v segmentovém ostění je stlačitelná, jedná se o elastomerové izolace, které jsou speciálně vyráběny pro ostění. Nepropustnost proti vodě je zajištěna stlačením izolace mezi jednotlivé segmenty během jejich instalace. [10]

Obr. 16 - Těsnící pásky na segmentovém ostění

- Systém pro spojování segmentů

Spojování segmentů jsou jak v příčném, tak i v podélném směru z důvodů udržení přípustných tolerancí při ukládání jednotlivých segmentů a zajištění stability během usazení prstence. Šroubové spoje jsou připevněny z kapes, které jsou na vnitřní straně ostění. Šrouby jsou šroubovány do nátrubku skrz druhý segment. Další možností spojování segmentů je pomocí kolíků a trnů, které nabízí mnoho výhod – vyztužování a instalace segmentů je jednodušší, přesnější určení polohy segmentu a vyšší bezpečnost personálu. [10]

4.5 Výběr a popis stroje SM – V5 (EPBS)

Na základě geotechnických vlastností horninového masivu vyplívajících z podrobného IGP byl proveden návrh a posouzení vhodnosti tunelovacího stroje a vyhodnocení efektivnosti jeho nasazení. Do výběru stroje vstupuje mnoho geotechnických parametrů, např.: pevnost v prostém tlaku, výskyt diskontinuit, abrazivita minerálů, RQD a přítok podzemních vod. Nejvhodnější varianta byla nasazení štítu typu EPBS (Earth Pressure Balance Shield), který je vyrobený ve firmě Herrenknecht v německém Schwanau.

Tento typ štítu, zvaný Viktorie, patří mezi složitější tunelovací mechanizované stroje. Pažící médium, které zajišťuje stabilitu čelby, působí u štítu typu EPBS rozpojená zemina. Řezné nástroje, které jsou umístěny na vrtné hlavě stroje, rozrušují a vtlačují zeminu do pracovní komory, kde se dále mísí se zeminovou kaší, která je už v pracovní komoře připravená. Tato pracovní komora je od zbytku tunelu oddělena pomocí tlakové stěny.

Rozpojená zemina se transportuje pomocí šnekového přepravníku z pracovní komory do prostoru s atmosférickým tlakem.

Pro tunel Ejpovice je použit razící štít S 799 o průměru řezné hlavy 9,89 m a rychlosti otáčení 0 – 0,45 otáčkami za minutu. Stroj se skládá ze čtyř částí, a to z řezné hlavy, tubusu štítu, mostovky a 5 vozů závěsu. Celková délka razícího stroje činí 110 m o hmotnosti 1 800 t (řezná hlava 900 t / závěs 900 t). Betonové segmenty o šířce 2 m jsou vkládány pomocí erektoru o celkovém počtu 7+1 (klenák), kde vnější průměr tybinků je 9,5 m a vnitřní 8,7 m s celková hmotností jednoho celého prstence (7+1) je 60 tun a spotřebuje se na něj 23 m^3 betonové směsi. [4]

Obr. 17 - Razící štít S 799 pro tunel Ejpovice (koridory.cz [21])

5 POPIS KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ PŘECHODU TRAŤOVÝ TUNEL/ÚNIKOVÁ CESTA

5.1 Návrh konstrukčního řešení přechodu traťový tunel/úniková cesta

Návrh konstrukčního řešení přechodu traťový tunel – úniková cesta lze provést několika způsoby, mezi které patří např. metoda ocelových rozpěr, metoda pomocí ocelových trnů, popř. ocelových kazet, metoda dočasného podepření betonového ostění a metoda zmrazování.

5.1.1 Metoda ocelových rozpěr (pomocná ocelová konstrukce)

Před započetím výstavby propojky se v místech budoucích prostupů v obou traťových tunelech nainstaluje dočasná rozpěrná ocelová konstrukce. Konstrukce sestává ze dvou výztužných kruhových rámů umístěných v tunelu před a za prostupem. Na tyto rámy jsou uchyceny podpěrné podélné nosníky, jež zajišťují podepření dílců montovaného ostění v místech budovaného prostupu. Po montáži se rozpěrné rámy i podpěrné nosníky aktivují vůči prstencům montovaného ostění např. vyklínováním pomocí dřevěných klínů. Po instalaci a vyklínování podpěrných konstrukcí vůči montovanému ostění v obou tunelech se začne s vybouráním prostupu a následnou ražbou.

Výhodou této metody je především v rychlé instalaci a odstranění konstrukce a také v běžně dostupném materiálu, který je potřebný pro konstrukci. Mezi hlavní nevýhodu této konstrukce patří zmenšení průřezu tunelu, tím pádem je nutná úprava průjezdného profilu pro plynulou dodávku materiálu a pracovních sil. Dále je nutno přemostit výškový profil ocelové obruče v místě propojek (např. zeminou). [8]

Obr. 18 – Pomocná rozpěrná konstrukce (technet.idnes.cz [14])

Obr. 19 – Detail zajištění tybinkového ostění v místě propojky (technet.idnes.cz [14])

5.1.2 Metoda pomocí dočasného podepření betonového ostění

Nejdříve se realizuje celý tunel pomocí TBM a v místech budoucích prostupů se montuje běžné železobetonové ostění. Před a za propojkou tunelu se vloží ocelová konstrukce sloupů, které se nahoře a dole opřou o betonové segmenty. Ocelové sloupy mají dvě části, horní a dolní, které jsou naprosto shodné a rozprostírají velký tlak do betonových pásů u podlahy a u stropu. Tento systém dočasného podepření se namontuje z obou sousedních tunelů a sešroubuje se dohromady. Proto je nutná velice přesná montáž ostění na milimetry. Po dokončení sloupů se jednoduše pomocí řezného kotouče vyřízne ostění nebo pomocí

tunelbagru rozbije ostění mezi konstrukcí sloupů a vznikne tak průchod mezi tunely. Ocelové sloupy jsou umístěny tak, aby co nejméně zasahovaly do stavebního provozu v tunelu.
Výhoda spočívá v běžně dostupném materiálu a není nutná potřeba speciálních přípravků. Nevýhodou tohoto řešení je, že tyto ocelové sloupy částečně zasahují do prostoru tunelu, tak, že mohou narušit stavební provoz uvnitř tunelu. Dále čas potřebný na instalaci a odstranění konstrukce jsou také nevýhodné. [16]

Obr. 20 – Ukázka použití řezného kotouče (portofmiamitunnel.com [15])

Obr. 21 – Použití tunelbagru v místě propojky (portofmiamitunnel.com [15])

5.1.3 Metoda příhradových segmentů

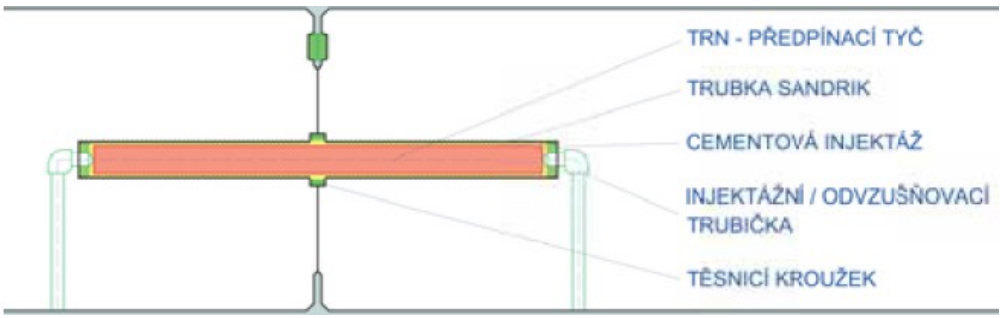
Během realizace tunelu se pomocí stroje ukládá nejdříve železobetonové ostění, pouze v místech budoucích tunelových propojek se umístí pomocí erektoru speciální ocelové segmenty. Ty jsou navzájem spojeny šroubovým spojem, tak aby byly tuhé. Při realizaci propojky se speciální segmenty následně demontují a vytvoří se tak otvor pro budoucí únikový východ. Výhodou je jednoduchá montáž pomocí šroubového spoje příhradových segmentů a následné ražení prostupu. Hlavní nevýhodou je instalační tolerance příhradových segmentů v místech budoucí propojky a náročná příprava proveditelnosti.
Metoda může být použita s kombinací dočasného podepření ocelových sloupů (obr. 23), popřípadě s metodou zmrazování okolní zeminy (tzv. hybridní segmenty). [4], [18]

Obr. 22 – Příhradové segmenty v místě prostupu (crossrail.co.uk [17])

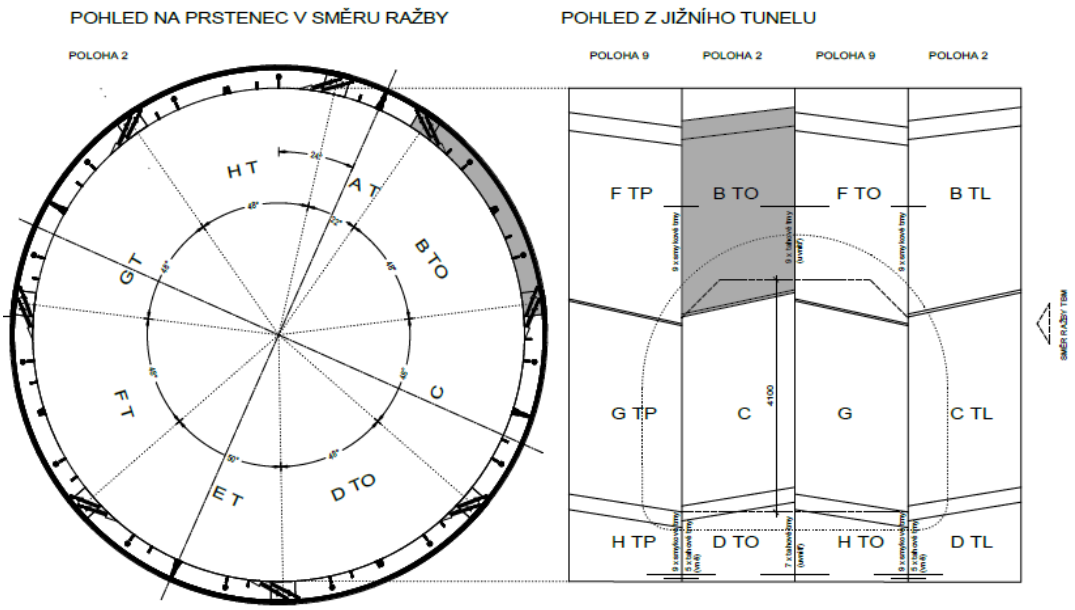
Obr. 23 – Kombinace dočasného podepření a litinových segmentů (powersystemservices.co.uk [18])

5.1.4 Metoda pomocí spojovacích trnů

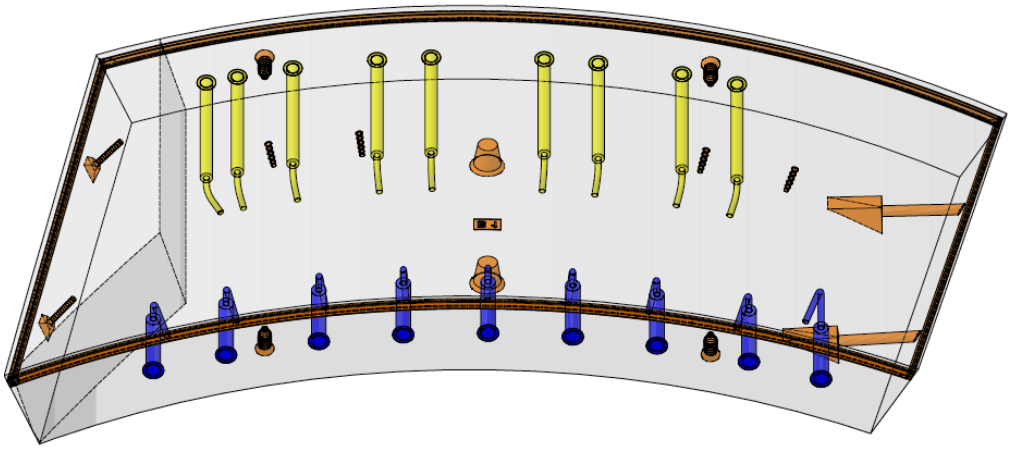
Zajištění prstenců je navrženo tak, aby nenarušovalo plynulost ražby, neovlivňovalo manipulaci s jednotlivými segmenty a nezpomalovalo výrobu segmentů. Navrhované řešení je založeno na jednoduchém principu. Do sousedních segmentů jsou vloženy kanálky vstřícně proti sobě. Během montáže ostění se do kanálků vloží ocelové trny. Po ukončení montáže se trny v kanálcích zainjektují. Po zatvrdnutí injektážní hmoty dojde k pevnému propojení sousedních segmentů. Kanálky jsou navrženy z tenkostěnných plechových trubek s profilovaným povrchem, čímž je zaručena soudržnost jak s betonem segmentu na vnější straně, tak s injektážní hmotou na straně vnitřní. Ocelové trny jsou navrženy z betonářské výztuže, případně z vysokopevnostních předpínacích tyčí. Trny jsou vybaveny přípravky pro centrální uložení v kanálku. Injektážní hmota se do kanálku přivádí trubkou umístěnou na konci trnu a trubkou na druhém konci trnu se odvádí vzduch (obr. 24). Složení injektážní hmoty je na cementové bázi. Injektáž je shodná s hmotou pro vyplňování kanálků předpínacích kabelů. Zajištění prstenců pomocí trnů je dočasné. Potom, co se výlom zajistí železobenovým rámem, tzv. límec, přenáší všechno zatížení tento rám. Jestli by se spojovací trny použily pro dlouhodobější zatížení, bylo by nutné trny zabezpečit proti korozi. Výhodou spojování segmentů pomocí trnů spočívá v jednoduchém a únosném systému i v těžkých geologických podmínkách pro zajištění tunelových prostupů. V místech prostupů je zachován průjezdný profil v tunelu a není nutné realizovat další přídavné konstrukce, které omezují stavební provoz. Další výhodou jsou nízké náklady, protože spojení segmentů lze provést materiálem, který je běžně dostupný na trhu. V porovnání se standardními železobetonovými segmenty, tyto segmenty jsou dražší na výrobu a vyžadují větší množství betonářské výztuže. V místě tunelové propojky je nutno mít segmenty s předem připravenými otvory pro vložení trnu. Trubky pro ocelové trny je potřeba injektovat, aby byla zajištěna protikorozní a protipožární ochrana. [5], [8]



Obr. 24 – Příčný řez segmentů s ocelovým trnem [5]



Obr. 25 – Pohled na prstenec ve směru ražby a pohled jižního tunelu při použití spojovacích trnů [8]



Obr. 26 – Axonometrie segmentu B TO [8]

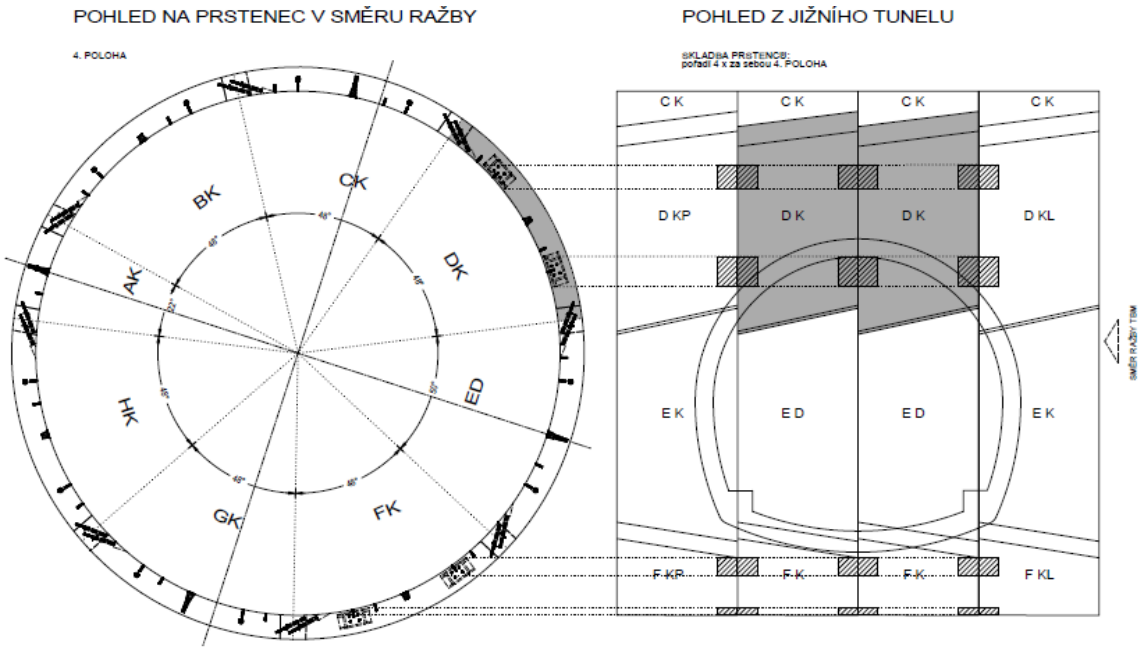
5.1.5 Metoda pomocí ocelových kazet

Spojení mezi ostěním tunelové propojky a ostěním tunelu je možné provést pomocí zvláštních betonových dílců, které jsou opatřeny ocelovými kazetami pro sešroubování a dvou výplňových dílců v prostupu. Ty jsou později odstraněny překrývajícími se jádrovými vrty. Tyto nově vyvinuté dílce nahradily obvykle litinové dílce, které byly běžně užívány pro prostupy propojek v tunelech s jednoplášťovým ostěním. Problém může nastat při osazování

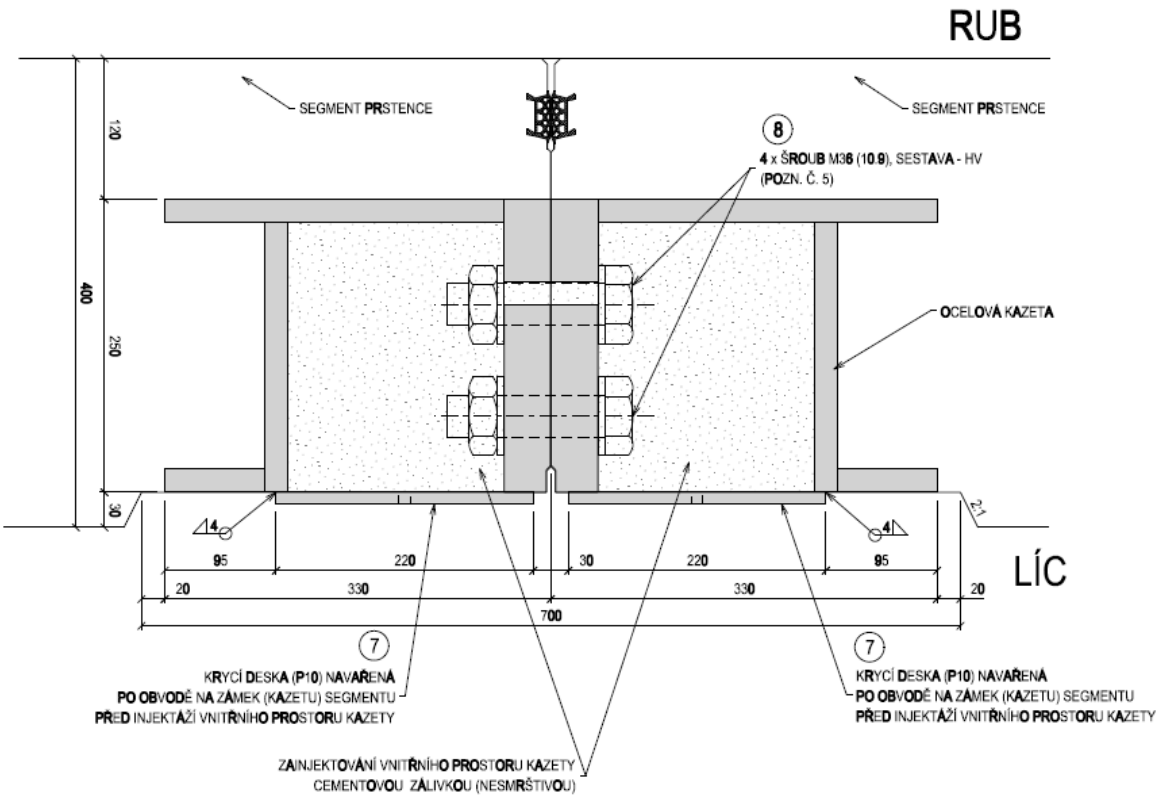
dílců, protože tolerance požadované pro šrouby se dá jen těžko dodržet. V prostupech do tunelové propojky je poloha prstence z dílců předem přesně určena, co se týče jeho dělení. Ve spojení s dalšími následujícími prstenci, které měly předem určenou polohu např. kvůli držákům pro trolejové vedení, se řízení stroje TBM stalo obtížným.

Výhodou spojování jednotlivých segmentů v místě propojky spočívá především v únosném systému. Dále je zachován průjezdný profil tunelu pro dopravu segmentového ostění, takže není nutno zřizovat další konstrukci, která omezuje stavební provoz.

Nevýhodou ocelových kazet spočívá v přesné toleranci ocelových kazet v průběhu betonáže jednotlivých segmentů a složitá technologie provádění. Segmenty, které jsou spojeny šroubem je nutno injektovat z důvodů koroze a protipožární ochrany. [8],[10]



Obr. 27 – Pohled na prstenec ve směru ražby a pohled jižního tunelu při použití ocelových kazet [8]



Obr. 28 – Styk segmentů při použití ocelových kazet [8]

5.1.6 Metoda zmrazování

Zmrazování hornin je jednou z technologií, která může být i v naší republice použita jako variantní řešení při překonávání složitých základových poměrů při výstavbě podzemního díla, zvláště zvodněných zemin. Metodu lze použít i v měkkých a nestabilních hornin, a v téměř neodvoditelných zeminách. Do zmrazované zeminy se podle požadovaných rozměrů zamraženého lože a dalších geologických podmínek zabudují mrazící trubky, které se instalují přes segmentové ostění, a naplní kapalným dusíkem. Kolem každé mrazící trubky se vytvoří zamražené lože. Zamražená lože sousedních mrazících trubek se pomalu spojí a vytvoří souvislou zamraženou stěnu, která poskytuje ochranu při ražbě. Chladící médium (kapalný dusík)může přivádět do horniny ochlazení až do -196 ºC. Horninu lze po zmrazení udržet ve stálé teplotě pomocí mrazícího zařízení. Potřebné chladící médium se dostává na staveniště speciálními cisternovými vozy. Výhoda zmrazování zemin spočívá v nenáročnosti a vysoké bezpečnosti práce. Nevýhoda ve zmrazování zemin spočívá především s vysokými pořizovacími náklady, vysokou energetickou náročností a zdlouhavou mrazící dobou, kterou ovšem lze zkrátit aplikací vhodného mrazícího média. [19]

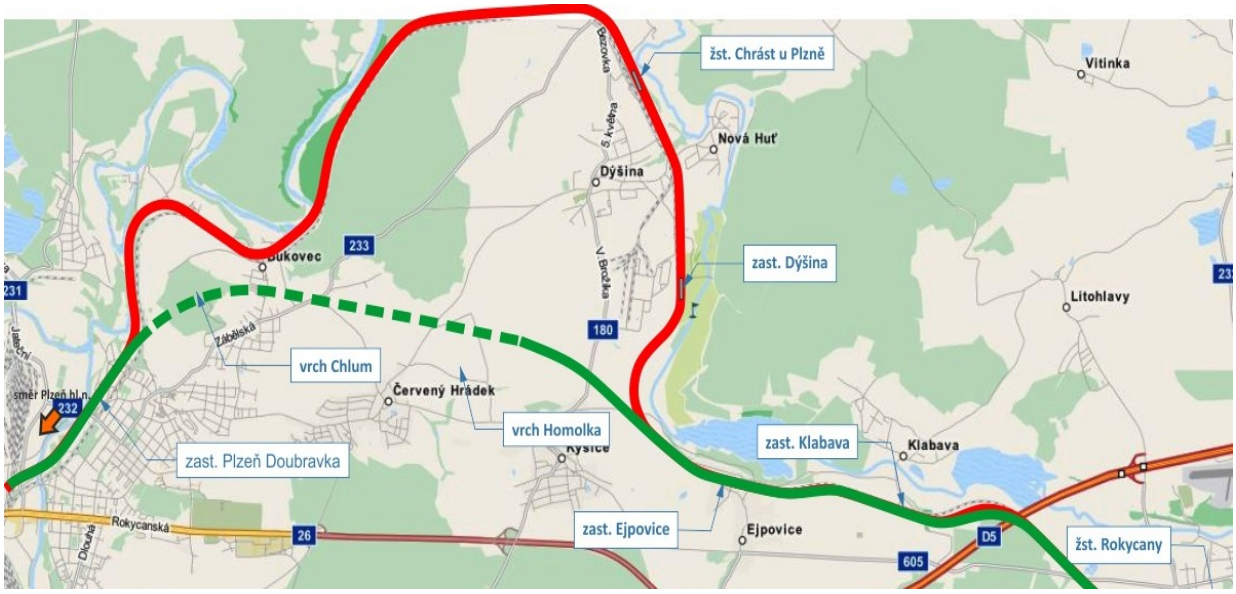
Obr. 29 – Zmrazování zemin v místě tunelové propojky (tunnelingonline.com [22])

Obr. 30 – Detail zmrazování zemin (roadtraffic-technology.com [23])

6 NUMERICKÝ MODEL PROBLEMATIKY NA VYBRANÉM ÚSEKU TUNELU

6.1 Lokalita a geometrie

Tunel Ejpovice je situován v Plzeňském kraji, mezi městy Plzeň a Rokycany. Na obr. 31 je znázorněno červenou čárou současný stav železniční tratě a zelenou přerušovanou čárou budoucí železniční trať, která povede přes masiv Homolka a Chlum.



Obr. 31 – Lokalita tunelu Ejpovice (koridory.cz [20])

6.2 Geologická a hydrogeologická charakteristika území v trase tunelu

6.2.1 Geomorfologie

Trasa tunelů je vedena ve směru přibližně VJV - ZSZ a v západní části přechází do mírného oblouku směrem k jihozápadu. Nadmořská výška na východním okraji je cca 371 m, na západním okraji cca 332 m. Terén nad tunelem Homolka se zvedá až na 417 m n.m. Mezi staničením km cca 98,4 až 98,8 klesá terén až na hodnoty mezi 349 - 355 m n.m. Nad tunelem Chlum stoupá výška terénu až na 408 m n.m. Většina území je využívána zemědělskou výrobou, pouze v západním konci trasy je lesní porost. [7]

6.2.2 Geologická stavba území

Geologická stavba zájmového území je poměrně komplikovaná. K nejstarší jednotce zde patří horniny svrchního proterozoika zastoupené převážně tmavými břidlicemi a méně pak světlými prachovci. Směr vrstevnatosti je přibližně kolmý k ose projektovaného tunelu a sklon vrstevních ploch je 30 – 550^{o} k západu. Rozpukání je podle hloubkové úrovně od velmi velké hustoty diskontinuit (D5) ve svrchních partiích masívu až po střední až malou hustotu diskontinuit (D3 - D2) v zóně zvětralých až zdravých hornin. V místě tektonických zón jsou však i horniny s extrémně velkou hustotou diskontinuit (D6) a vyskytují se i polohy podrcených, vodonosných hornin. Proterozoické břidlice se budou vyskytovat v rozmezí staničení cca km 96,250 –98,850.

Tyto sedimenty jsou prostoupeny vulkanity, které tvoří významnou terénní elevaci - kopec Chlum. Jedná se o jemnozrnné masivní horniny převážně zelenošedé barvy - spility, které mají kromě svrchních partií obvykle střední až malou hustotou diskontinuit. Pro obě proterozoické horniny jsou charakteristické pyritové impregnace.

Mladší jednotkou jsou paleozoické horniny stáří ordovik. Petrograficky je lze charakterizovat jako prachovité břidlice s extrémně velkou až velkou hustotou diskontinuit (D6-D4). Prachovité břidlice se vyskytují ve staničení od vjezdového portálu, tj. km 95,850 – 96,250.

S další geologickou jednotkou se setkáme při hloubení stavební jámy mezi tunely Homolka a Chlum. Jedná se o výběžek terciérní pánve stáří neogén. Neogénní souvrství je tvořeno písky až písky s jemnozrnnou příměsí, při bázi pak štěrky. Nevylučujeme i výskyt jílů s vysokou plasticitou, které však vrtnými pracemi nebyly zastiženy, ale v terciérních pánvích se běžně vyskytují ve formě nepravidelně mocných vrstviček nebo vložek. Zastižené zeminy byly lokálně velmi ulehlé až stmelené, tzn. charakteru hornin. Největší ověřená hloubka výskytu byla ve vrtu J110a činila cca 11 m pod stávající terén. V předchozím stupni byly tyto vrstvy chybně interpretovány jako relikty karbonských sedimentů. Staničení výskytu neogenních sedimentů je km cca 98,230 – 98,800. [7]

6.2.3 Kvartérní pokryvy

Kvartérní pokryv je v trase tunelu zastoupen třemi genetickými typy zemin: sedimenty deluviálními, eolickými a fluviálními. Mocnost kvartérního pokryvu se pohybuje od 0,5 do cca 5 m. Eolické uloženiny jsou prezentovány sprašemi a sprašovými hlínami (F6/CI) rezavě hnědé barvy o mocnosti cca 0,5 až 4,0 m. Sprašová závěj se vyskytuje ve staničení km cca

98,800 - 99,400. Fluviální sedimenty jsou zastoupeny několika morfologicky nevýraznými terasovými stupni Berounky. Jedná se převážně o jílovité a hlinité písky s proměnlivým obsahem valounů až do velikosti 8 cm. Nejvýznamnější akumulace těchto zemin (cca 5 m) je v oblasti západního (výjezdového) portálu tunelu Chlum (km cca 100,050). Někdy je těmto sedimentům přisuzováno i terciérní stáří. Svahové uloženiny jsou zastoupeny převážně soudržnými zeminami charakteru písčitých hlín (F3/MS) až hlín se střední plasticitou tuhé konzistence (F5/MI) s nepravidelnou příměsí úlomků hornin a vyskytují se prakticky v celé trase. Mocnost těchto uloženin je obvykle do 1 m. K deluviálním sedimentům zde přiřazujeme také sedimenty deluviofluviální, které jsou v oblasti východního (vjezdového) portálu tunelu Homolka. Jedná se o přeplavený materiál vyššího terasového stupně, resp. Výplň splachové deprese. Střídají se zde polohy písčitých jílů (F4/CS), hlinitých písků (S4/SM), jílovitých písků (S5/SC) a hlín se střední plasticitou (F5/MI). Ve vrtu J1 byly v zeminách zastiženy i organické rostlinné zbytky. Mocnost tohoto souvrství dosahuje až téměř 8 m. [7]

6.2.4 Hydrogeologické poměry

Zájmové území je součástí hydrogeologického rajonu 623 – Krystalinikum, proterozoikum a paleozoikum v povodí Berounky. Průměrný roční úhrn srážek za období 1936 – 1986 je kolem 610 mm, převážná většina srážek připadá však na povrchový odtok. Z pohledu hydrogeologie představuje barrandienské proterozoikuma paleozoikum hydrogeologický masiv s výhradně puklinovou propustností a s výraznějšími možnostmi proudění podzemní vody jen v přípovrchové zóně rozpukaní a rozvolnění hornin, v ojedinělých případech s hlubším prouděním podzemní vody puklinovými a puklinožilnými systémy. Na základě archivních údajů lze přisoudit přípovrchové zóně rozpukaných a rozpojených proterozoických břidlic a drob slabou až dosti slabou propustnost (řádově 10^{-7} až 10^{-5} m/s) a velmi nízkou až nízkou transmisivitu (řadově 10^{-6} až 10^{-4} m^2/s). Řádově shodné parametry byly zjištěny též v území budovaném metabazity (spility).

Proudění podzemních vod horninami charakteru hydrogeologických masivů (proterozoické břidlice, ordovické břidlice) je vázáno na přípovrchové pásmo rozpukaných a druhotně rozpojených hornin. Toto pásmo, různě mocné v závislosti na stupni porušení hornin, má regionální význam. Představuje filtračně nehomogenní prostředí. V důsledku toho se v něm vytváří nejednotná zvodeň s volnou nebo polonapjatou hladinou podzemní vody. Na tvorbu přírodních zdrojů, podzemních vod, pohyb a odvodnění podzemních vod mají vedle

klimatických a morfologických ukazatelů významný vliv strukturně geologické faktory. Nehomogenitu přípovrchové zóny hornin dokládají značně variabilní hodnoty transmisivit, které v průměru vyznačují nízký až velmi nízký stupeň transmisivity. Přípovrchová zvodeň je drénována v úrovni místních erozních bází, generelně do údolí hlavních toků puklinovými, kontaktními a suťovými prameny s vydatností setin a desetin l/s. Významnější hlubší oběh podzemní vody puklinovými systémy nebyl zaznamenán. [7]

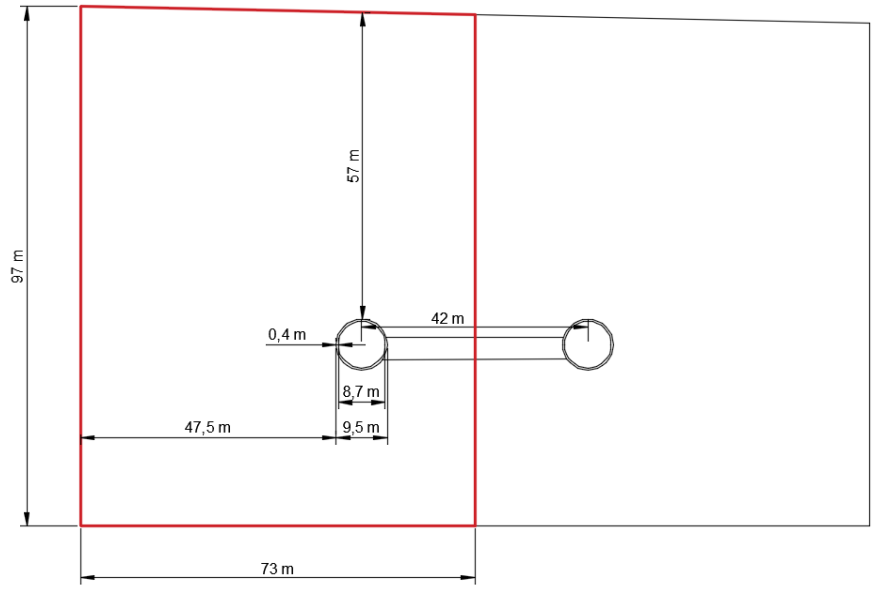
6.3 Matematický model tunelové propojky v programu Midas GTS NX

Během modelování se uživatel pohybuje ve třech až čtyřech krocích budování modelu. První krok je vytvoření samotného modelu, druhou je nastavení parametrů analýzy, třetím krokem je samotný výpočet a popřípadě čtvrtý krok jsou případné úpravy v již vypočteném modelu.

Numerický model č. 1

- **Vytvoření modelu**

Při vytváření nového modelu je nutné si nastavit jednotky síly a délky, se kterými bude matematický program pracovat, běžně používané kN a m. Jestli máme k dispozici data pro rozhraní modelu (např. v programu Autocad), lze tento soubor importovat a předejít tak zdlouhavému ručnímu vytváření samotného modelu. V prvním kroku bylo vytvoření geometrie modelu konstrukce a prostředí v programu AutoCad ve formátu .dxf s homogenní vrstvou zeminy a bez hladiny podzemní vody. Byla modelována ½ plochy prostředí, tzv. využít symetrii modelu. Červený rámeček značí model, který byl použit v programu Midas.



Obr. 32 - Geometrie modelu

Vzdálenost hranic modelu a obrysu tunelu by neměly být menší než pětinásobek výšky tunelu, což je doporučení pro výpočetní systémy pracující na principu MKP. Výška nadloží je 57 m a je volena jako skutečná mocnost nadloží tunelu Ejpovice. Celková délka modelu tunelu je 50 m. Dále je potřeba zadat parametry materiálů v příkazu *property – materiál*, kde se zvolí typ modelu Mohr - Coulomb.

Materiál - označení	γ[kN/m^3]	E_{def}[MPa]	c_{ef}[kPa]	ϕ_{ef}[^{0}]	ν[-]
R6/G2 – Břidlice tektonicky porušená	25	200	18	36	0,25

Tab. 1 – Parametry zeminy

Materiál - označení	γ[kN/m^3]	E_bMPa]	ν[-]
Beton C 45/55	23,3	34 200	0,3

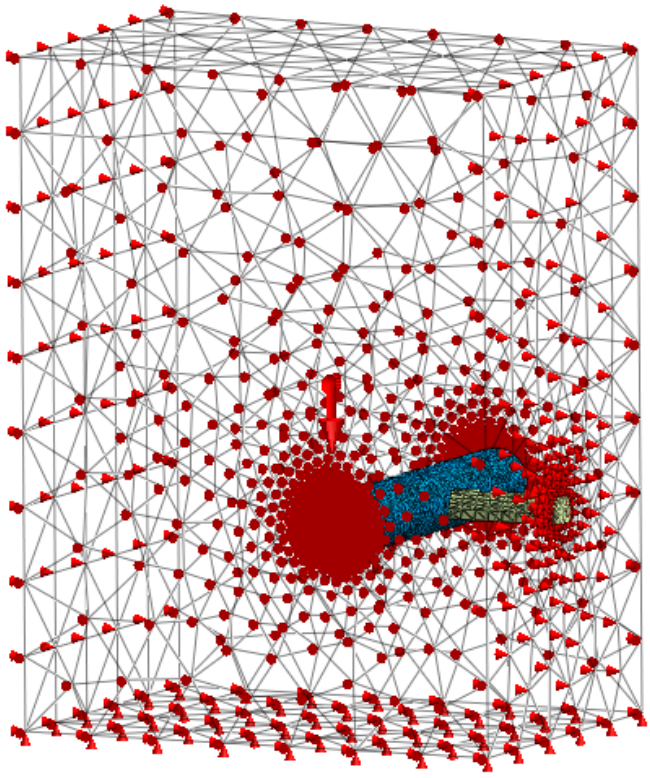
Tab. 2 - Parametry segmentového ostění

Materiál - označení	γ[kN/m^3]	E_b[MPa]	ν[-]
Beton	24	35 000	0,25

Tab. 3 – Parametry stříkaného betonu

- **Kalkulační příprava pro výpočet**

Analýza modelu představuje vygenerování sítě a dále je nutné přiřadit okrajové podmínky (*Boundary condition*) a definovat možné zatížení (*Load*). Obr. zobrazuje vygenerování sítě včetně okrajových podmínek a vlastní tíhy (*Self weight*) ve směru osy z.



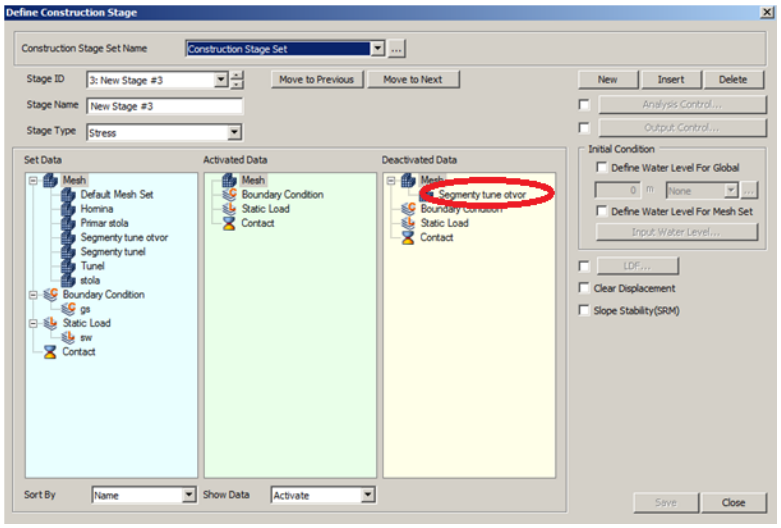
Obr. 33 - Okrajové podmínky se zatížením

Výpočet provedený na vytvořeném numerickém modelu se skládá z následujících fází:

1. fáze: primární (geostatický) výpočet napjatosti horninového masivu
2. fáze: výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce tunelu
3. fáze: vybrání segmentů v místě budoucí propojky
4. fáze: výrub propojky a instalace ostění po celé délce propojky

Program rovněž umožňuje simulovat průběh jednotlivých operací určité geotechnické konstrukce pomocí aktivování popř. deaktivování skupin elementů. V prvním sloupci (modrý) představuje všechna tělesa, pro která byla vygenerována síť prvků a kterým byl přiřazen atribut (*Element*), okrajové podmínky (*Boundary*) a zatížení (*Load*) – pouze vlastní tíha. Druhý sloupec (zelený) je tzv. aktivní sloupec do kterého přiřazujeme všechny parametry,

které chceme akceptovat. Třetí sloupec (žlutý) je tzv. neaktivní sloupec do kterého přiřadíme jen ty parametry, které chceme zanedbat.



Obr. 34 – Označení výrubu propojky v místě budoucí propojky jako „neaktivní“

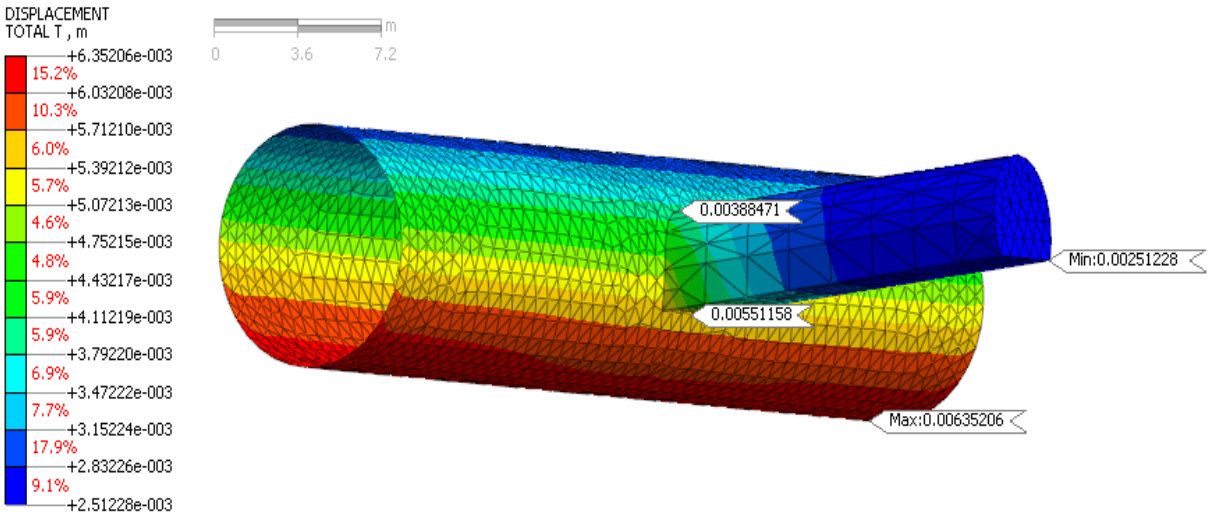
Výpočet se spustí pomocí funkce *Solve.*

6.3.1 Vyhodnocení výsledků modelu č. 1

Hlavní předmětem výpočtů provedených v softwaru Midas GTS NX bylo vyhodnocení deformací, vnitřních sil a celkového napětí v místě budoucí tunelové propojky.

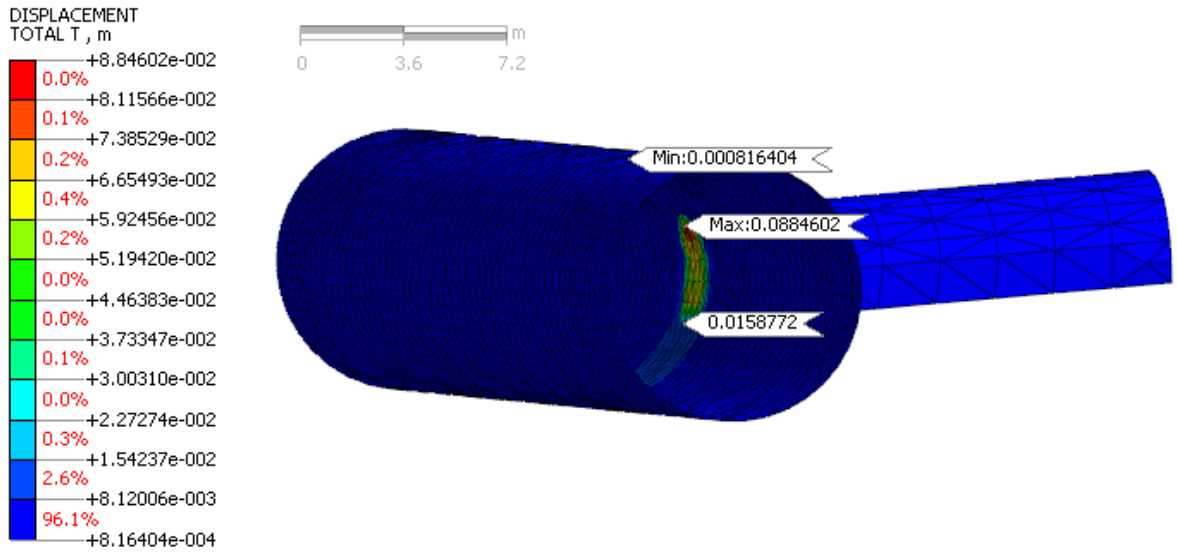
Celkové posuny

V první fázi jsou nulové posuny, jelikož je tato fáze iniciační. Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce je minimální celkový posun u dna propojky s hodnotou 2.51 mm a maximální celkový posun u dna tunelu s hodnotou 6.35 mm. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota 3.88 mm ve stropě a u dna tunelové propojky 5.51 mm.



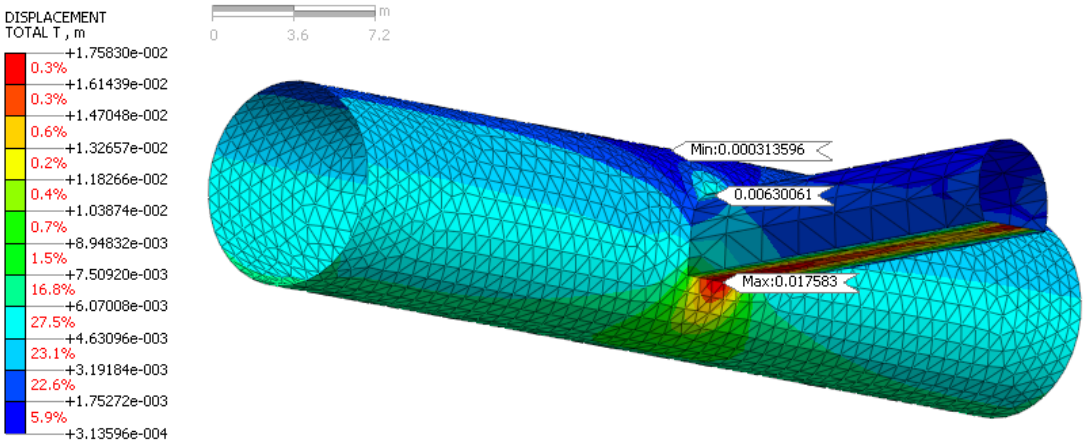
Obr. 35 – Celkové posuny fáze č. 2

Vybrání segmentů v místě budoucí propojky představuje 3. fázi, kde minimální celkový posun je ve stropě tunelu s hodnotou 0.81 mm a maximální celkový posun v horní části vyrubaného tunelu v místě budoucí propojky s hodnotou 88.46 mm a u dna tunelu v místě budoucí propojky je hodnota 15.87 mm.



Obr. 36 – Celkové posuny fáze č. 3

Ve čtvrté fázi, která popisu výrub propojky a instalace ostění je minimální posun ve stropě tunelu s hodnotou 0.31 mm a maximální celkový posun u dna propojky s hodnotou 17.58 mm a ve stropě tunelové propojky je hodnota 6.30 mm.



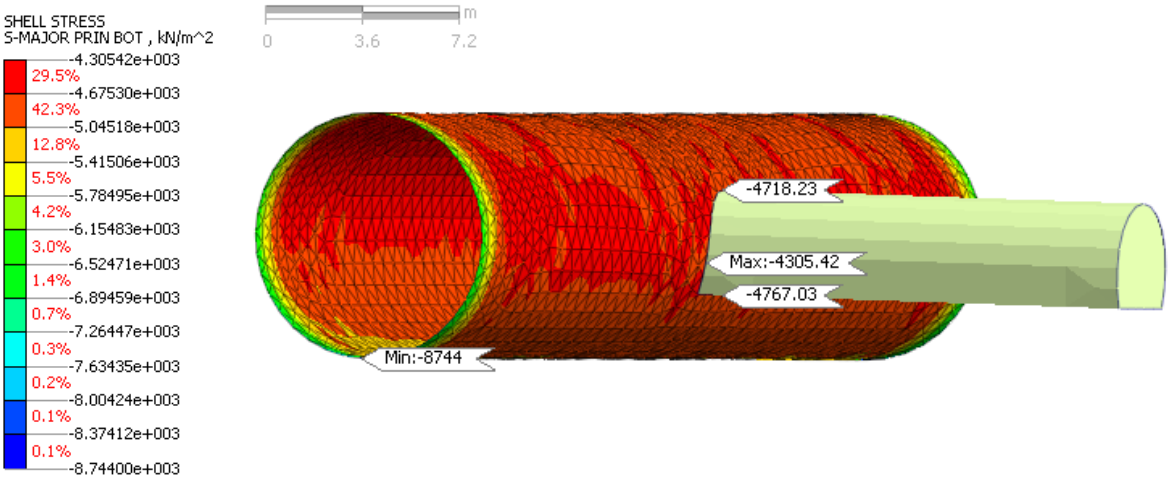
Obr. 37 – Celkové posuny fáze č. 4

	1. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze
Min.	0 mm	2.51 mm	0.81 mm	0.31 mm
Max.	0 mm	6.35 mm	88.46 mm	17.58 mm

Tab. 4 – Celkové maximální a minimální posuny

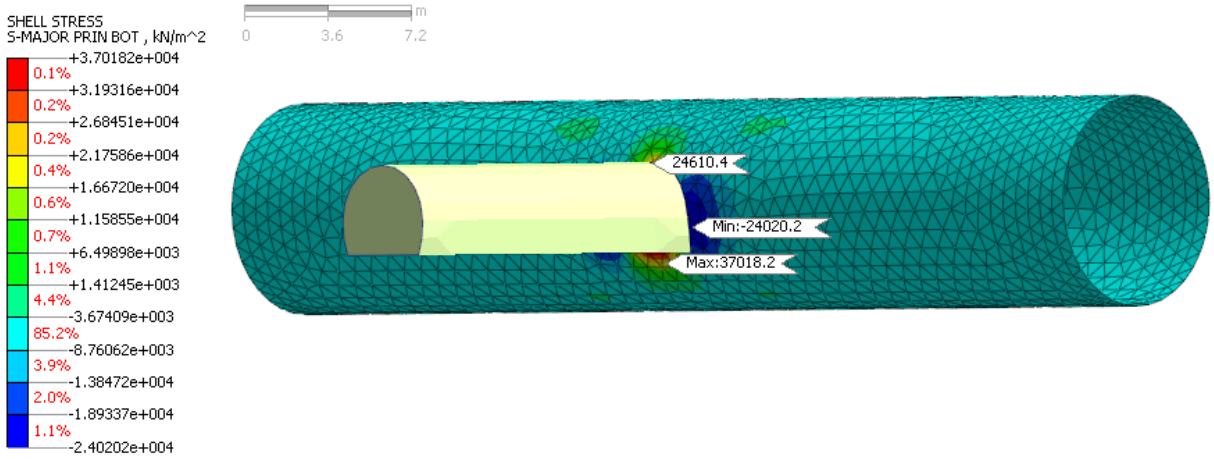
Napětí na ostění tunelu

V první fázi nejsou žádné napětí ve výztuži – výztuž není aktivní, jelikož tato fáze je iniciační. Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce je minimální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech u dna tunelové trouby s hodnotou -8 744 kN/m^2 a maximální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech na boku tunelu s hodnotou -4 305.42 kN/m^2. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota napětí při spodních vláknech -4 718.23 kN/m^2 ve stropě a u dna tunelové propojky -4 767.03 kN/m^2.



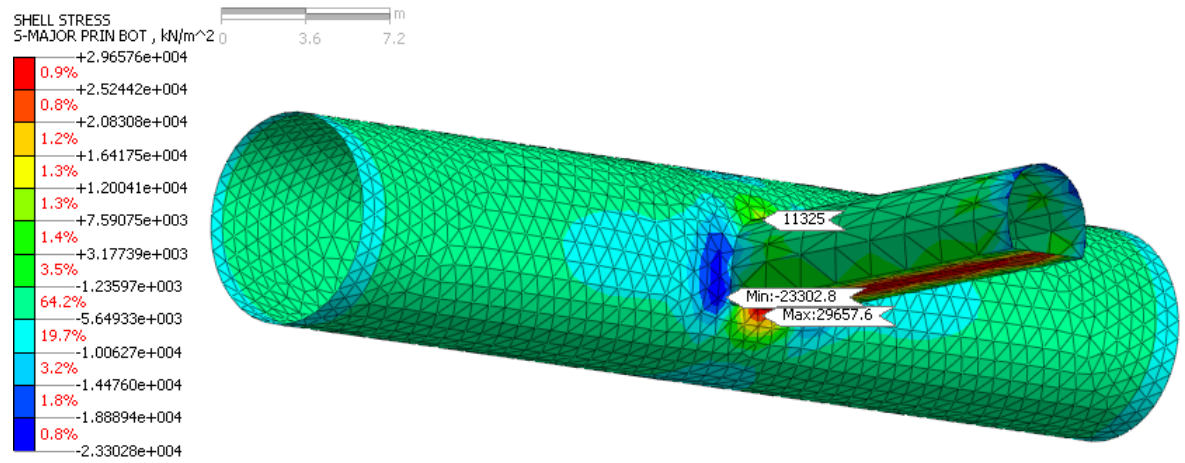
Obr. 38 – Napětí na ostění tunelu při fázi č. 2

Vybrání segmentů v místě budoucí propojky představuje 3. fázi, kde minimální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech je na boku tunelu s hodnotou -24 020.2 kN/m^2 a maximální napětí při spodních vláknech ve spodní části tunelu, kde dochází k napojení tunelové propojky s hodnotou 37 018.2 kN/m^2. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota tlaku při spodních vláknech ve stropě tunelové propojky 24 610.4 kN/m^2.



Obr. 39 – Napětí na ostění tunelu při fázi č. 3

Ve čtvrté fázi, která popisu výrub propojky a instalace ostění je minimální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech na boku tunelu s hodnotou - 23 302.8 kN/m^2 a maximální napětí při spodních vláknech ve spodní části tunelu, kde dochází k napojení tunelové propojky s hodnotou 29 657.6 kN/m^2. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota napětí na ostění tunelu při spodních vláknech ve stropě tunelové propojky 11 325 kN/m^2.



Obr. 40 – Napětí na ostění tunelu při fázi č. 4

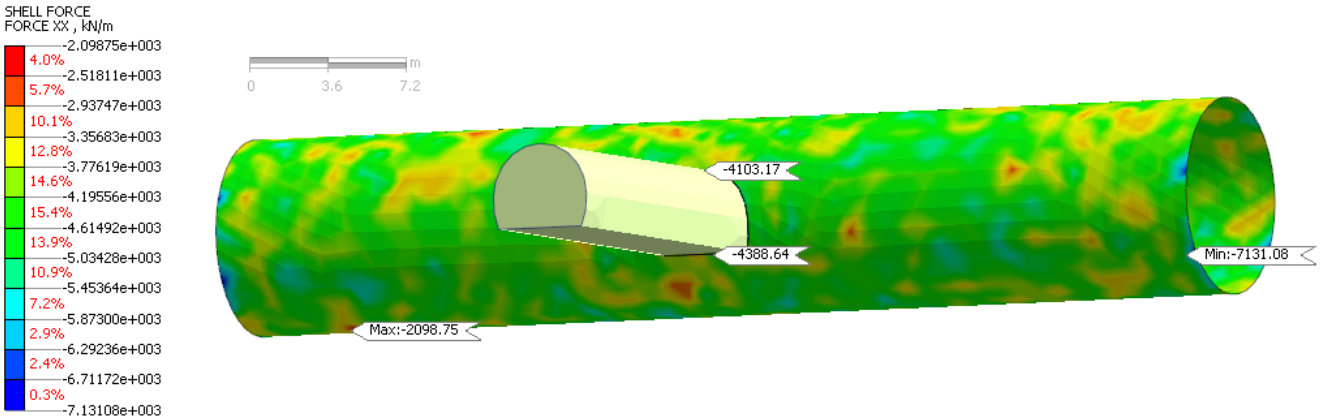
	1. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze
Min.	0 kN/m^2	-8 744 kN/m^2	-24 020.2 kN/m^2	-23 302.8 kN/m^2
Max.	0 kN/m^2	-4 305.42 kN/m^2	37 018.2 kN/m^2	29 657.6 kN/m^2

Tab. 5 – Celkové maximální a minimální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech

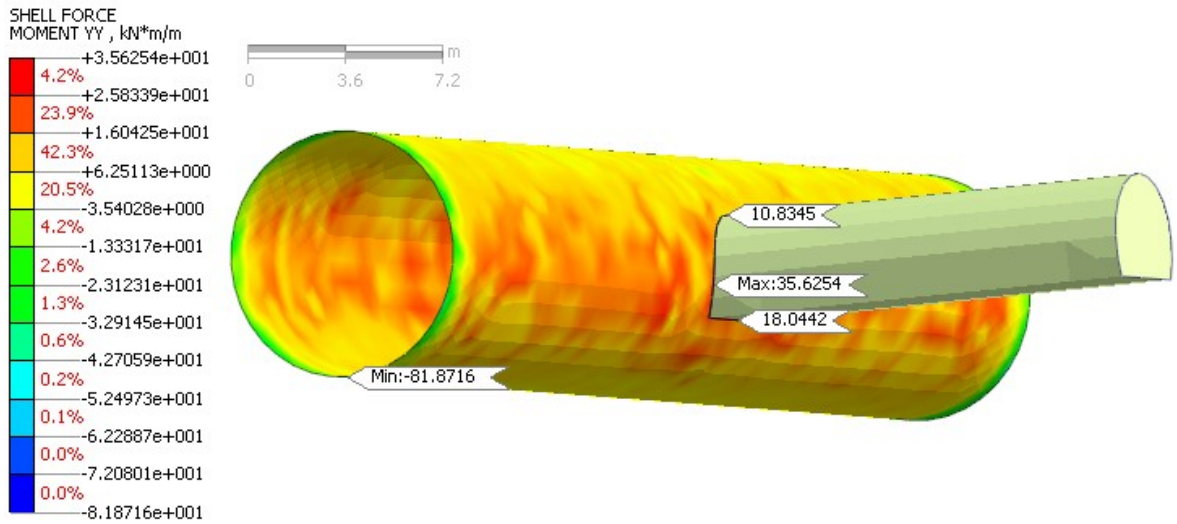
Vnitřní síly na ostění tunelu

V první fázi nejsou síly na ostění tunelu, jelikož tato fáze je iniciační. Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce je maximální síla u dna tunelové trouby ve směru XX (obr. 42) a to -2 098.75 kN/m a minimální síla na líci tunelové trouby s hodnotou -7 131.08 kN/m. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota síly ve směru XX -4103.17 kN/m ve stropě tunelové propojky a u dna propojky -4388.64 kN/m.

Maximální momenty jsou na líci tunelové propojky ve směru YY (obr. 43) s hodnotou 35.63 kNm/m a minimální hodnota -81.87 kNm/m u dna tunelové trouby. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota momentu ve směru YY 10.83 kNm/m ve stropě tunelové propojky a u dna tunelové propojky 18.04 kNm/m.



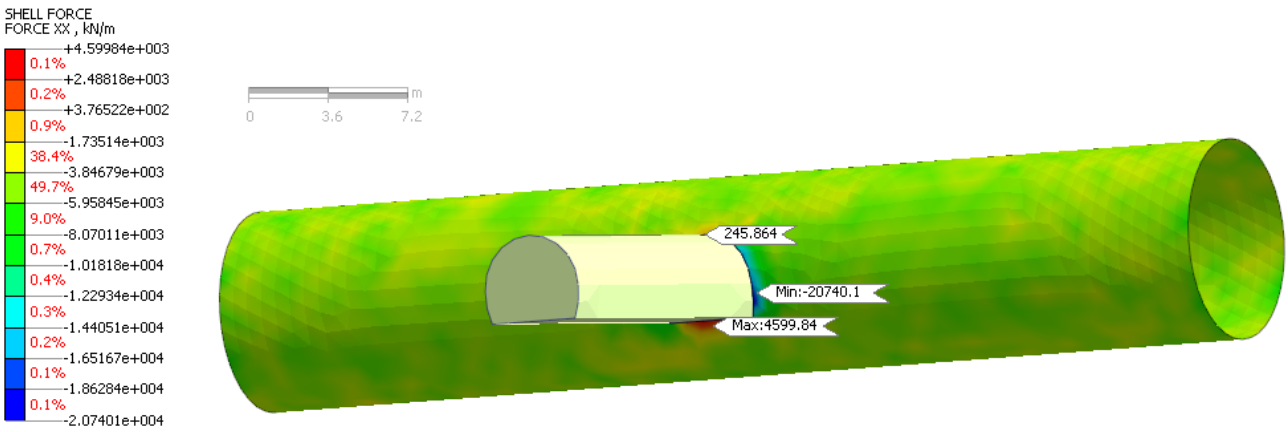
Obr. 41 - Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 2



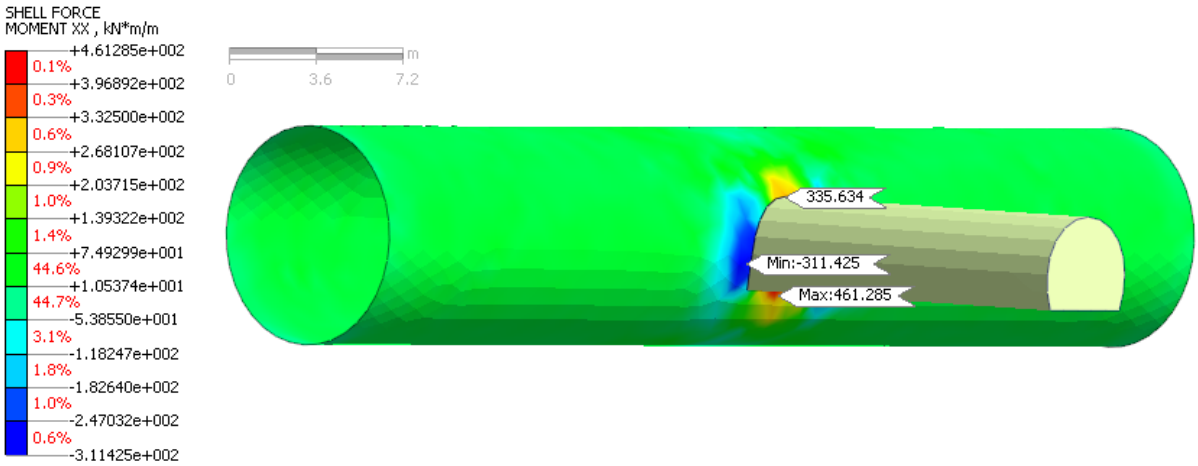
Obr. 42 - Momenty na ostění tunelu ve směru YY při fázi č. 2

Vybrání segmentů v místě budoucí propojky představuje 3. fázi, kde maximální síla na ostění tunelu ve směru XX je u dna budoucí propojky s hodnotou -4 599.84 kN/m a minimální síla na ostění tunelu ve směru XX na boku budoucí propojky s hodnotou -20 740.1 kN/m. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota síly ve směru XX 245.86 kN/m ve stropě tunelové propojky.

Maximální momenty jsou ve směru XX s hodnotou 461.28 kNm/m u dna tunelové propojky a minimální hodnota -311.43 kNm/m na líci tunelové propojky. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota momentu ve směru XX 335.63 kNm/m ve stropě tunelové propojky.



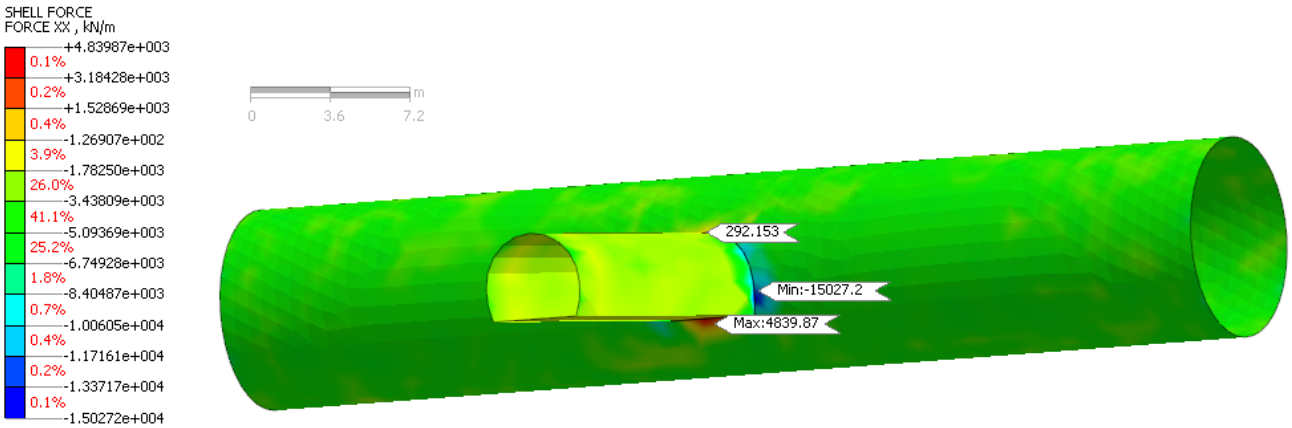
Obr. 43 - Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 3



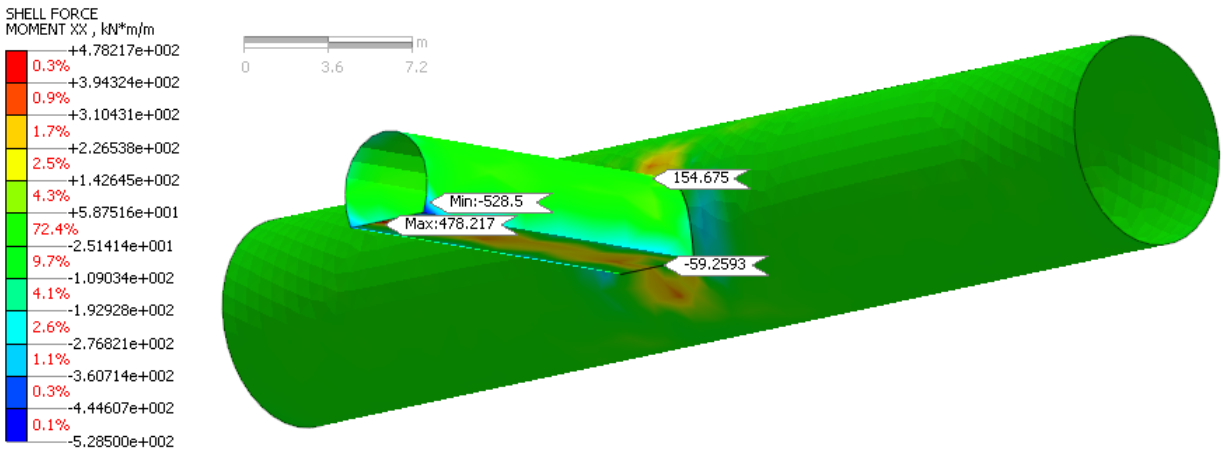
Obr. 44 - Momenty na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 3

Ve čtvrté fázi, která popisu výrub propojky a instalace ostění je maximální síla na ostění tunelu ve směru XX a to 4 839.87 kN/m u dna tunelové propojky a minimální síla na líci tunelové propojky s hodnotou -15 027.2 kN/m. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota síly ve směru XX 292.15 kN/m ve stropě tunelové propojky.

Maximální momenty jsou ve směru XX s hodnotou 478.22 kNm/m u dna tunelové propojky a minimální hodnota -528.5 kNm/m na boku tunelové propojky. V místě napojení tunelu na propojku je hodnota momentu ve směru XX 154.67 kNm/m ve stropě tunelové propojky a na dnu tunelové propojky v místě napojení je hodnota momentu -59.26 kNm/m.



Obr. 45 - Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 4



Obr. 46 - Momenty na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 4

	1. fáze	**2. fáze**	**3. fáze**	**4. fáze**
Min.	0 kN/m	-7 131.08 kN/m	-20 740.1 kN/m	4 839.87 kN/m
Max.	0 kN/m	-2 098.75 kN/m	-4 599.84 kN/m	-15 027.2 kN/m

Tab. 6 – Celkové minimální a maximální síly na ostění tunelu

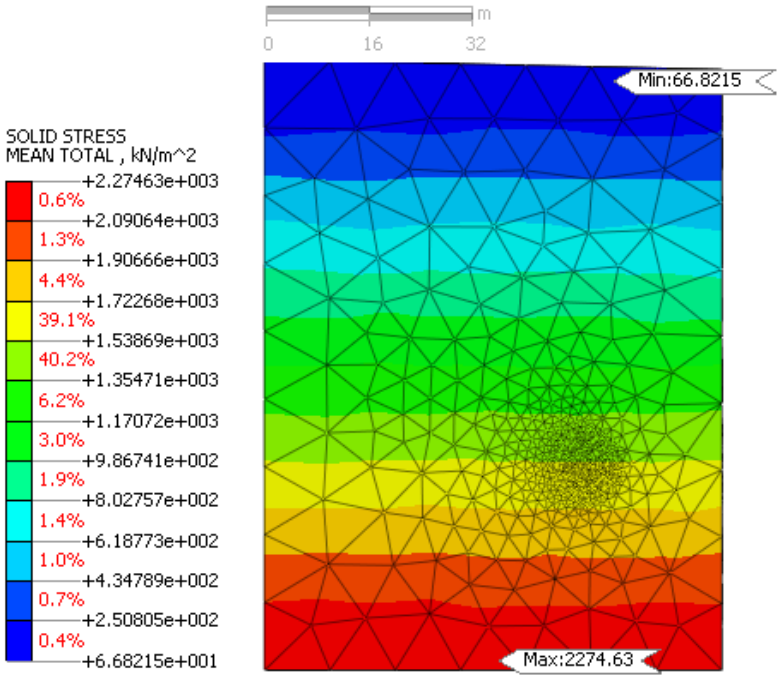
	1. fáze	**2. fáze**	**3. fáze**	**4. fáze**
Min.	0 kNm/m	-81.87 kNm/m	-311.43 kNm/m	-528.5 kNm/m
Max.	0 kNm/m	35.63 kNm/m	461.28 kNm/m	478.22 kNm/m

Tab. 7 – Celkové minimální a maximální momenty na ostění tunelu

Napětí horninového masivu

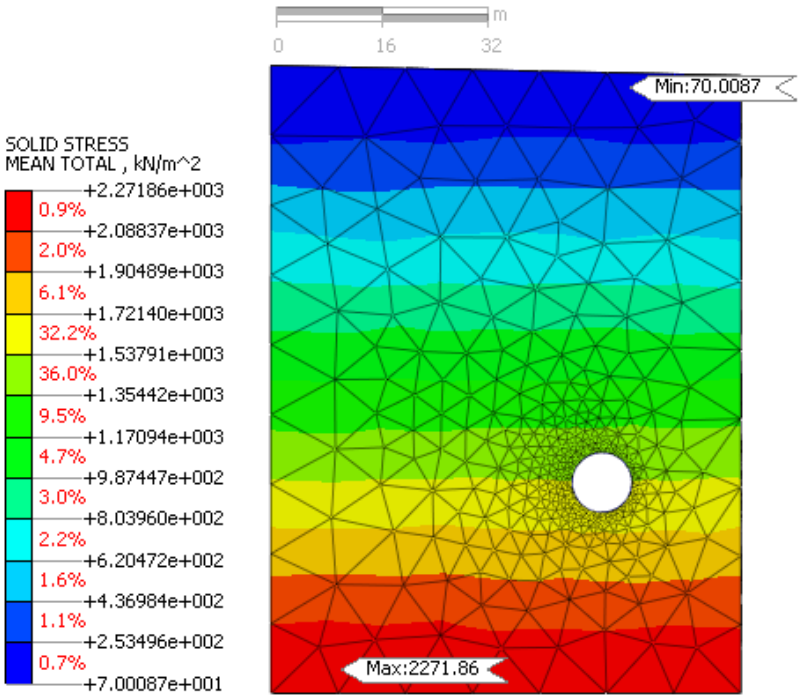
Neutrální napětí se nevyskytuje v tomto modelu, jelikož je model zjednodušený a tudíž neuvažuje s hladinou podzemní vody. Můžeme tedy říci, že efektivní napětí se rovná totálnímu napětí.

Primární napětí horniny, jež představuje první fází modelu je minimální totálního napětí při povrchu terénu s hodnotou 66.82 kN/m^2 a maximální totálního napětí je v hloubce 93 m s hodnotou 2 274.63 kN/m^2.



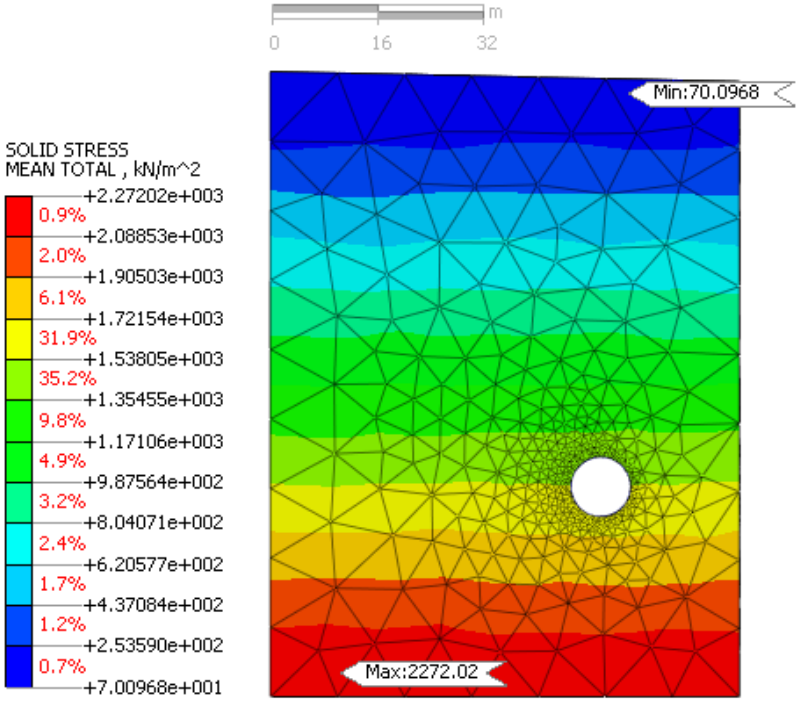
Obr. 47 – Napětí horninového masivu při fázi č. 1

Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu po celé délce je minimální totálního napětí při povrchu terénu s hodnotou 70.01 kN/m^2 a maximální totálního napětí je v hloubce 93 m s hodnotou 2 271.86 kN/m^2.



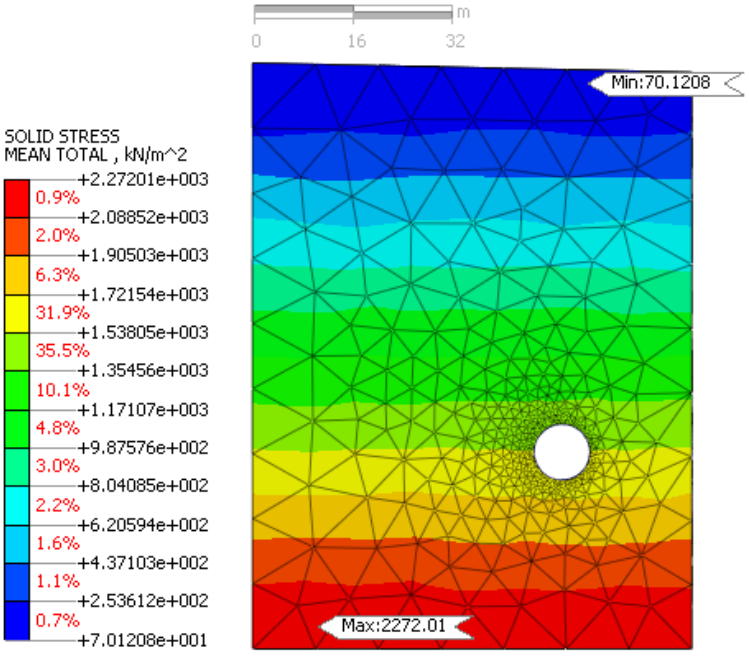
Obr. 48 – Napětí horninového masivu při fázi č. 2

Vybrání segmentů v místě budoucí propojky představuje fázi č. 3, kde minimální a maximální totální posun je téměř shodný s fází č. 2, a to s min. hodnotou 70.09 kN/m^2 a max. hodnotou 2 272.02 kN/m^2.



Obr. 49 – Napětí horninového masivu při fázi č. 3

Čtvrtá fáze, která představuje výrub propojky se opět minimální a maximální totální posuny neliší od fáze č. 2, kde min. hodnota činí 70.12 kN/m^2 a max. hodnota činí 2 272.01 kN/m^2.

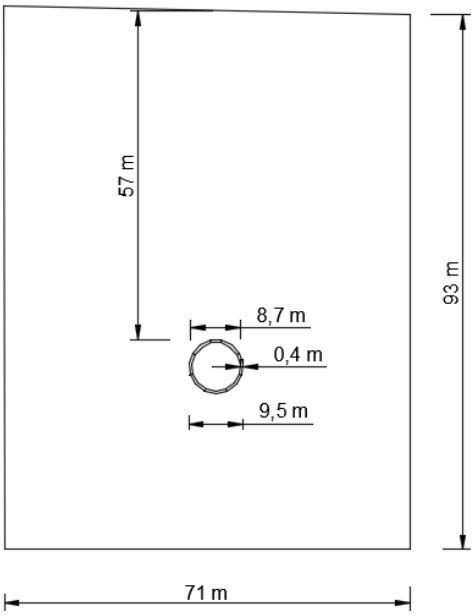


Obr. 50 – Napětí horninového masivu při fázi č. 4

Numerický model č. 2

- **Vytvoření modelu**

V prvním kroku bylo vytvoření příčného řezu segmentového ostění dle podkladů firmy a zjednodušeného homogenního prostředí bez hladiny podzemní vody v programu AutoCad ve formátu .dxf. Segmentové ostění se skládá ze 7 segmentů + 1 klenáku s tloušťkou 400 mm.



Obr. 51 – Geometrie modelu

Vzdálenost hranic modelu a obrysu tunelu by neměly být menší než pětinásobek výšky tunelu, což je doporučení pro výpočetní systémy pracující na principu MKP. Výška nadloží je 57 m a je volena jako skutečná mocnost nadloží tunelu Ejpovice. Délka jednotlivých segmentů je zvolena po 2 m a celková délka modelu tunelu je 50 m.

Materiál - označení	γ[kN/m^3]	E_{def}[MPa]	c_{ef}[kPa]	ϕ_{ef}[^{0}]	ν[-]
R6/G2 – Břidlice tektonicky porušená	25	200	18	36	0,25

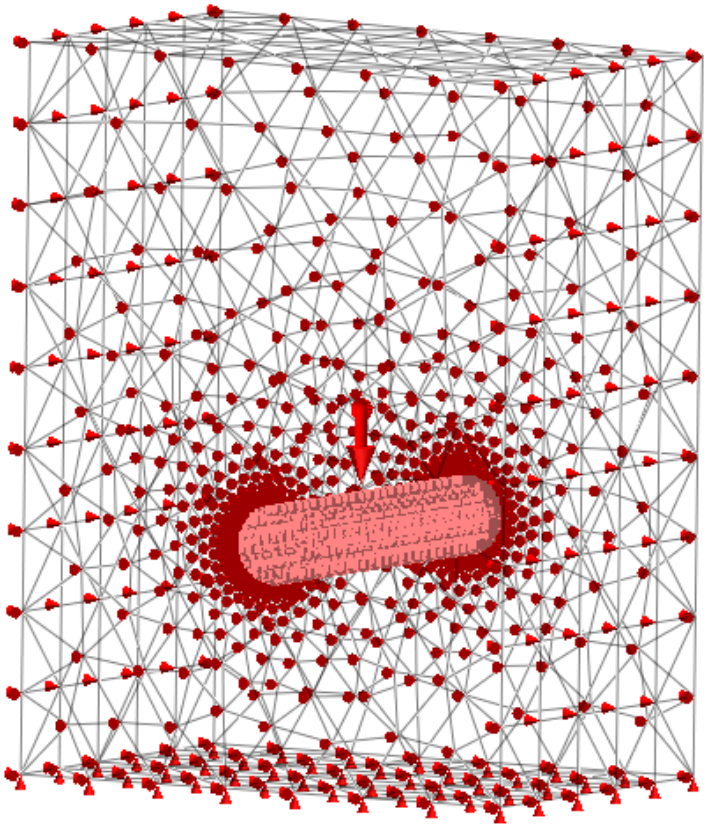
Tab. 8 – Parametry zeminy

Materiál - označení	γ[kN/m^3]	E_bMPa]	ν[-]
Beton C 45/55	23,3	34 200	0,3

Tab. 9 - Parametry segmentového ostění

- **Kalkulační příprava pro výpočet**

Je nutno vygenerovat síť, přiřadit okrajové podmínky (*Boundary condition*) a definovat možné zatížení (*Load*). Obr. zobrazuje vygenerování sítě včetně okrajových podmínek u zeminy a betonu včetně vlastní tíhy (*Self weight*) ve směru osy z.



Obr. 52 - Okrajové podmínky se zatížením

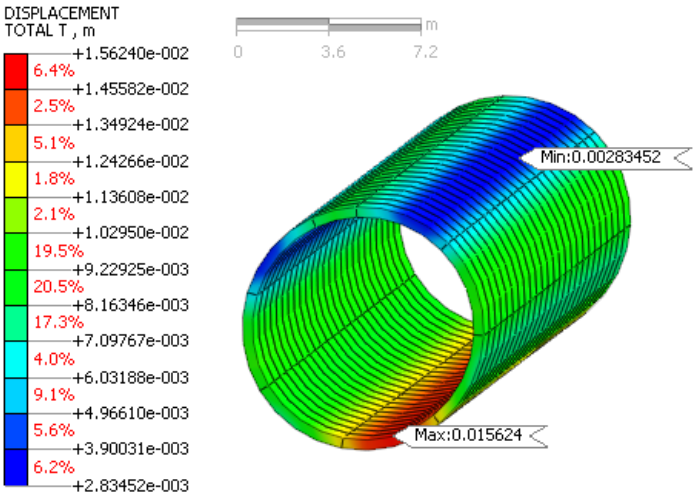
Výpočet provedený na vytvořeném numerickém modelu se skládá z následujících fází:

1. fáze: primární (geostatický) výpočet napjatosti horninového masivu
2. fáze: výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce tunelu
3. fáze: odebrání třech horních segmentů
4. fáze: odebrání třech prostředních segmentů
5. fáze: odebrání třech spodních segmentů

6.3.2 Vyhodnocení výsledků modelu č. 2

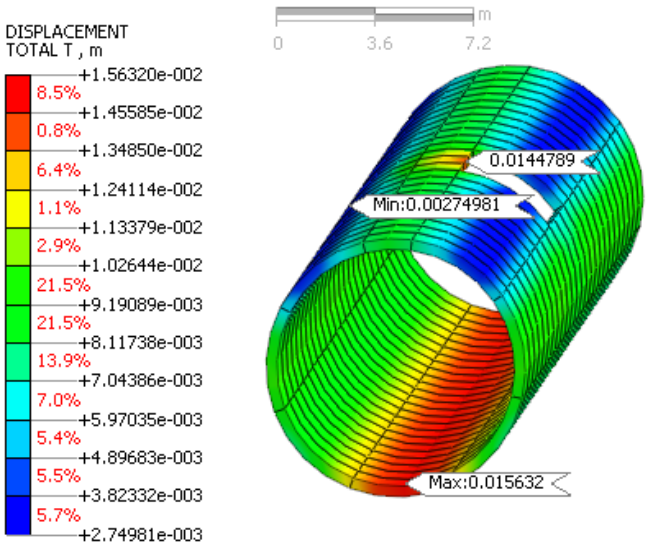
Celkové posuny

V první fázi jsou nulové posuny, jelikož je tato fáze iniciační. Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce je minimální celkový posun na ve stropě tunelu s hodnotou 2.83 mm a maximální celkový posun u dna tunelu s hodnotou 15.62 mm.



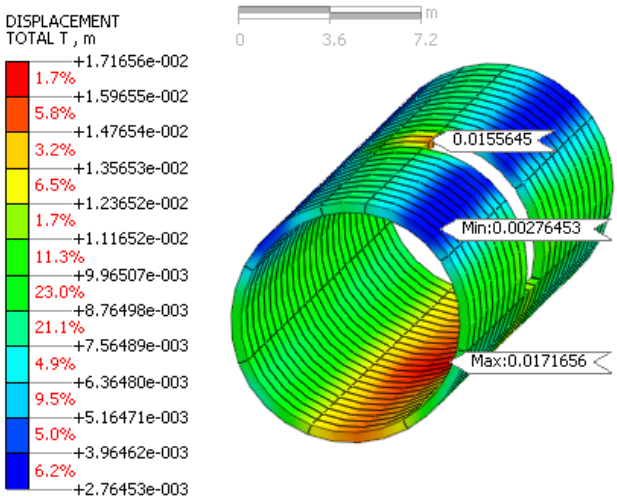
Obr. 53 – Celkové posuny fáze č. 2

Ve třetí fázi, která odebírá tři horní segmenty, je minimální celkový posun ve stropě tunelu s hodnotou 2.74 mm a maximální celkový posun u dna tunelu s hodnotou 15.63 mm a při horním okraji odebraných prvních třech segmentů je hodnota 14.47 mm.



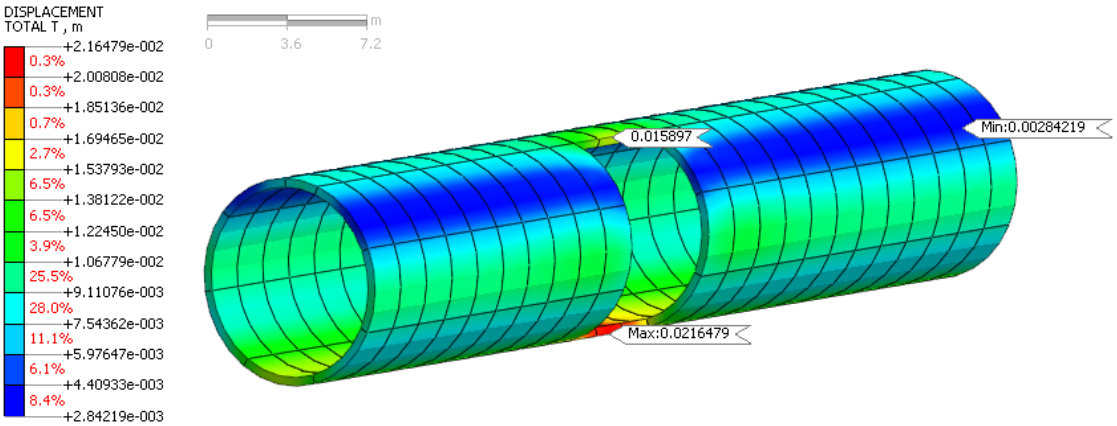
Obr. 54 - Celkové posuny fáze č. 3

Odebrání prostředních třech segmentů představuje fázi č. 4, kde je minimální celkový posun ve stropě tunelu s hodnotou 2.76 mm a maximální celkový posun u dna tunelu s hodnotou 17.16 mm a při horním okraji odebranými celkovými šesti segmentů s hodnotou 15.56 mm.



Obr. 55 – Celkové posuny fáze č. 4

Poslední fáze představuje odebrání spodních třech segmentů, kde minimální celkový posun je ve stropě tunelu s hodnotou 2.84 mm a maximální celkový posun odebranými posledními devíti segmenty u spodního okraje s hodnotou 21.64 mm a horního okraje s hodnotou posunu 15.89 mm.



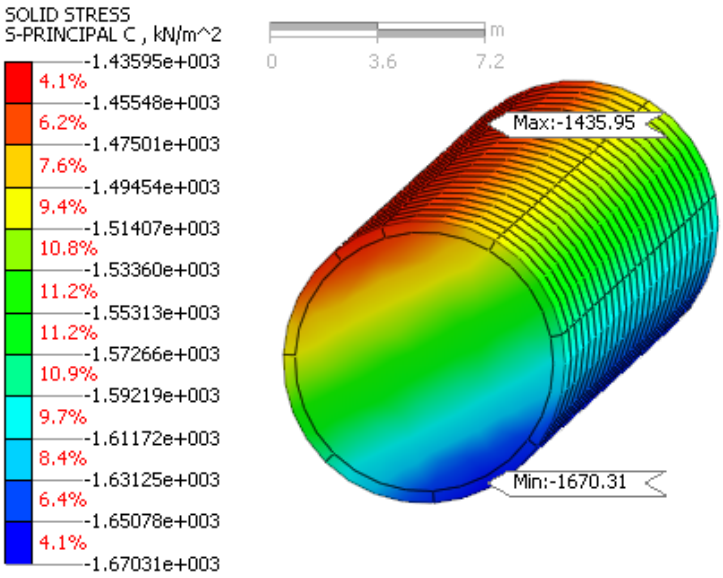
Obr. 56 – Celkové posuny fáze č. 5

	1. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze	5. fáze
Min.	0 mm	2.83 mm	2.74 mm	2.76 mm	2.84 mm
Max.	0 mm	15.62 mm	15.63 mm	17.16 mm	21.64 mm

Tab. 10 – Celkové minimální a maximální posuny

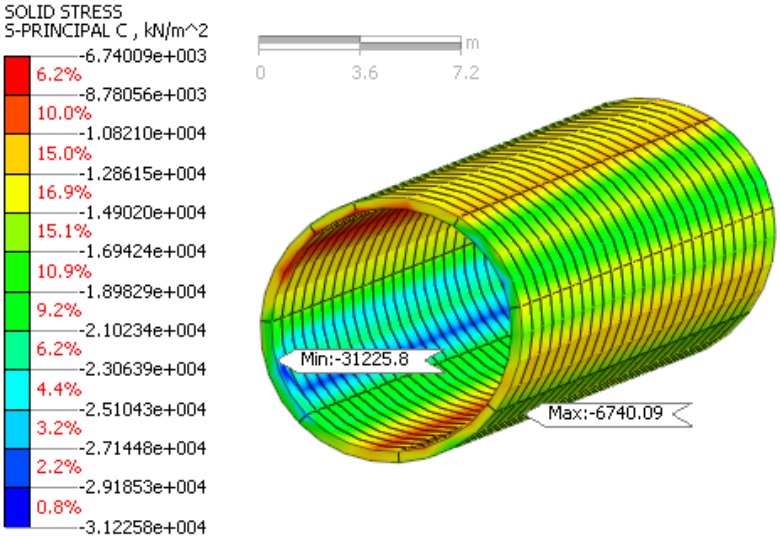
Napětí na ostění tunelu

V první fázi, která představuje iniciační fázi je minimální hlavní napětí s hodnotou –1 670.31 kN/m^2 na dně tunelu a maximální hlavní napětí s hodnotou –1 435.95 kN/m^2 ve stropě tunelu.



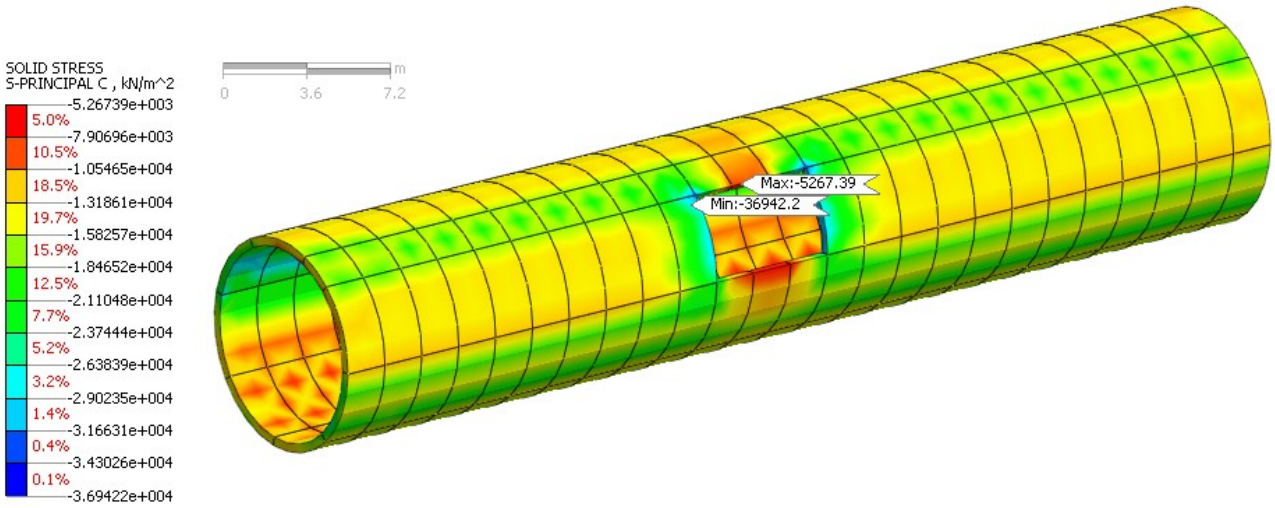
Obr. 57 – Hlavní napětí na ostění při fázi č. 1

Ve druhé fázi, která popisuje výrub jádra tunelu a instalace segmentů po celé délce tunelu je minimální hlavní napětí s hodnotou -31 225.8 kN/m^2 na levém boku tunelu a maximální hlavní napětí s hodnotou – 6 740.09 kN/m^2 na pravém boku tunelu.



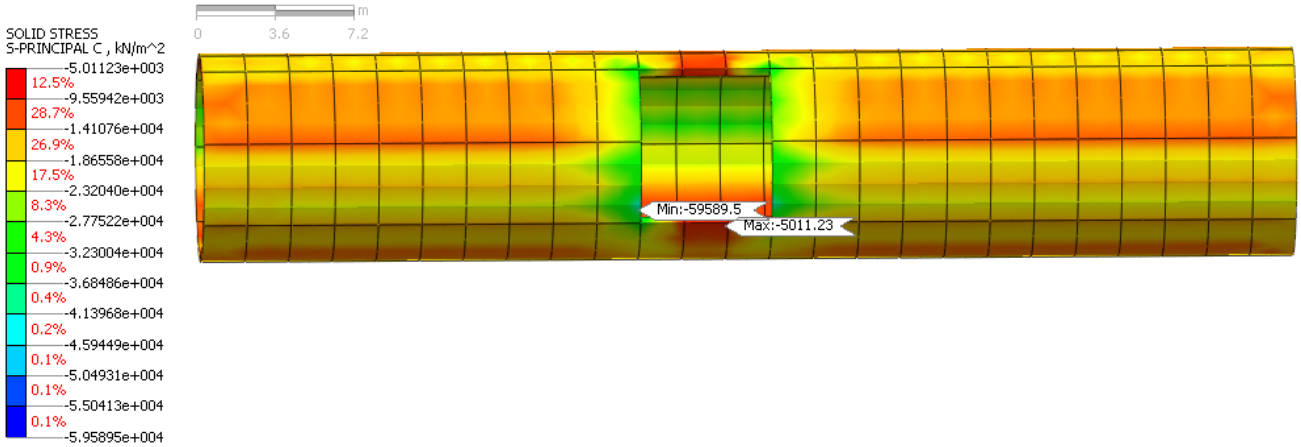
Obr. 58 – Hlavní napětí na ostění při fázi č. 2

Ve třetí fázi, která odebírá tři horní segmenty, je minimální hlavní napětí s hodnotou –36 942.2 kN/m^2 na lícní straně tunelové propojky maximální hlavní napětí s hodnotou –5 267.39 kN/m^2 ve stropě tunelové propojky.



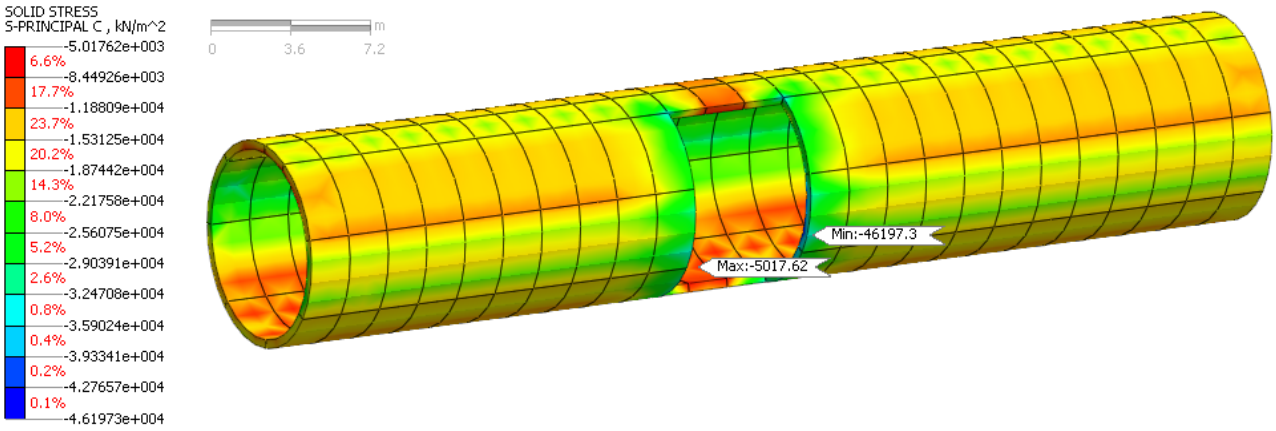
Obr. 59 – Hlavní napětí na ostění při fázi č. 3

Odebrání prostředních třech segmentů představuje fázi č. 4, kde je minimální hlavní napětí je na líci tunelové propojky při odebrání šesti segmentů s hodnotou –59 589.5 kN/m^2 a maximální hlavní napětí s hodnotou –5 011.23 kN/m^2 ve spodní části tunelové propojky při odebrání šesti segmentů.



Obr. 60 – Hlavní napětí na ostění při fázi č. 4

Poslední fáze představuje odebrání spodních třech segmentů, kde minimální hlavní napětí je na líci tunelové propojky při odebrání devíti segmenty s hodnotou –46 197.3 kN/m^2 a maximální hlavní napětí s hodnotou –5 017.62 kN/m^2 na dně tunelové trouby při odebrání devíti segmentů.



Obr. 61 – Hlavní napětí na ostění při fázi č. 5

	1. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze	5. fáze
Min.	–1670.31 kN/m^2	–31225.8 kN/m^2	–36942.2 kN/m	–59589.5 kN/m^2	-46197.3 kN/m^2
Max.	–1435.95 kN/m^2	–6740.09 kN/m^2	–5267.39 kN/m^2	–5011.23 kN/m^2	-5017.62 kN/m^2

Tab. 11 – Celkové minimální a maximální hlavní napětí na ostění tunelu

7 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zpracování problematiky technologie TBM a NRTM s jejich klady a zápory. Další část diplomové práce se zabývá konstrukčním řešením napojení tunelového tubusu na propojku železničního tunelu Ejpovice. Konstrukční řešení lze provést několika způsoby, mezi které patří např. metoda ocelových rozpěr, metoda pomocí ocelových trnů, popř. ocelových kazet, metoda dočasného podepření betonového ostění a metoda zmrazování.

Posouzení tunelové propojky bylo provedeno modelováním situace softwarem Midas GTS NX. Výpočty byly především zaměřeny na zhodnocení deformací, vnitřních sil a napětí.

První model je rozdělen na čtyři fáze, kde jednotlivé fáze jsou popsány v kapitole 6.4. Ve druhé fázi byly zaznamenány deformace 6.35 mm. Největší deformace byly zaznamenány ve 3. fázi výpočtu, která představuje vybrání segmentů v místě budoucí tunelové propojky, s maximální hodnotou 88.46 mm, což na nárůst o 82.11 mm. Jakmile se vyrubala tunelová propojka a instalovalo betonové ostění tak deformace klesly na 17.58 mm, což je pokles o 80.13 %.

Výrub tunelové trouby byl proveden ve druhé fázi výpočtu, kde byla zjištěna pomocí softwaru maximální hodnota momentu 35.63 kNm/m. Při třetí fázi, kde byly vyjmuty potřebné segmenty, byla vypočtena maximální hodnota momentu 461.28 kNm/m, což je navýšení oproti druhé fázi o 425.66 kNm/m. V konečné fázi (výrub tunelové propojky) byla naměřena hodnota 478.22 kNm/m. Vnitřní síly ve čtvrté fázi byly navýšeny oproti třetí fázi přibližně o 3.60 %.

Druhý model je rozdělen na pět fází, kde jednotlivé fáze jsou popsány v kapitole 6.5. Ve fázi, kde probíhá výrub jádra tunelu a následná fáze odebrání prvních třech horních segmentů jsou téměř podobné deformace a to 15.62 mm. Při odebrání třech prostředních segmentů v místě tunelové propojky je vypočtena hodnota deformace 17.16 mm, což je navýšení o 9.86 %. Největší deformace byly vypočteny v poslední fázi s hodnotou 21.64 mm, což je nárůst oproti čtvrté fázi o 26.11 %.

Největší hlavní napětí bylo vypočteno při výrubu tunelové trouby a to -6 740.09 kN/m^2. Při odebrání třech horních segmentů bylo vypočteno hlavní napětí -5 267.39 kN/m^2, což je pokles o 21.85 %, při dalším zásahu do segmentových prstenců kleslo napětí na – 5 011.23 kN/m^2. Oproti předchozí fázi kleslo napětí o 4.86 %. Při odebrání posledních spodních třech segmentů se napětí zvýšilo o 0.13 %.

Nejvhodnější konstrukční řešení přechodu traťový tunel – úniková cesta bych doporučila metodu pomocí spojovacích trnů, jelikož tato metoda je založena na jednoduchém systému, který lze aplikovat i ve velmi obtížném geologickém prostředí. Díky této metodě není nutno zřizovat další přídavné konstrukce, které by omezovaly stavební provoz. V místě tunelové propojky se jednotlivé segmenty spojí s materiálem, který je běžně dostupný na trhu. V porovnání se standardními železobetonovými segmenty, tyto segmenty jsou dražší na výrobu a vyžadují větší množství betonářské výztuže. V místě tunelové propojky je nutno mít segmenty s předem připravenými otvory pro vložení trnu.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Razící stroj bez štítu do pevných skalních hornin 12
Obr. 2 TBM bez štítu (s ochranným štítkem) 12
Obr. 3 Schéma TBM s jednoduchým pláštěm 13
Obr. 4 Razící stroj TBM s dvojitým štítem 13
Obr. 5 Schéma TBM s dvojitým pláštěm 14
Obr. 6 Schéma TBM s rozšiřováním průřezu 14
Obr. 7 Schéma nemechanizovaného tunelovacího štítu 15
Obr. 8 Štíty s postupným pobíráním v čelbě 15
Obr. 9 Štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě 16
Obr. 10 Bentonitový štít 17
Obr. 11 Průřezové schéma zeminovým štítem 18
Obr. 12 Situace tunelu 23
Obr. 13 Forma na segmenty 24
Obr. 14 Segmentové ostění 25
Obr. 15 Ocelová vlákna (drátky) používaná pro drátkobeton (délka 60 mm) 26
Obr. 16 Těsnící pásky na segmentovém ostění 27
Obr. 17 Razící štít S 799 pro tunel Ejpovice 28
Obr. 18 Pomocná rozpěrná konstrukce 30
Obr. 19 Detail zajištění tybinkového ostění v místě propojky 30
Obr. 20 Ukázka použití řezného kotouče 31
Obr. 21 Použití tunelbagru v místě propojky 31
Obr. 22 Příhradové segmenty v místě prostupu 32
Obr. 23 Kombinace dočasného podepření a litinových segmentů 32
Obr. 24 Příčný řez segmentů s ocelovým trnem 33

Obr. 25 Pohled na prstenec ve směru ražby a pohled jižního tunelu při použití spojovacích trnů 34

Obr. 26 Axonometrie segmentu B TO 34

Obr. 27 Pohled na prstenec ve směru ražby a pohled jižního tunelu při použití ocelových kazet. 35

Obr. 28 Styk segmentů při použití ocelových kazet..... 36

Obr. 29 Zmrazování zemin v místě tunelové propojky..... 37

Obr. 30 Detail zmrazování zemin 37

Obr. 31 Lokalita tunelu Ejpovice 38

Obr. 32 Geometrie modelu..... 42

Obr. 33 Okrajové podmínky se zatížením..... 43

Obr. 34 Označení výrubu propojky v místě budoucí propojky jako „neaktivní“ 44

Obr. 35 Celkové posuny fáze č. 2 45

Obr. 36 Celkové posuny fáze č. 3 45

Obr. 37 Celkové posuny fáze č. 4 46

Obr. 38 Napětí na ostění tunelu při fázi č. 2 46

Obr. 39 Napětí na ostění tunelu při fázi č. 3 47

Obr. 40 Napětí na ostění tunelu při fázi č. 4 47

Obr. 41 Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 2 48

Obr. 42 Momenty na ostění tunelu ve směru YY při fázi č. 2 49

Obr. 43 Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 3 49

Obr. 44 Momenty na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 3 50

Obr. 45 Síly na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 4 50

Obr. 46 Momenty na ostění tunelu ve směru XX při fázi č. 4 51

Obr. 47 Napětí horninového masivu při fázi č. 1 52

Obr. 48 Napětí horninového masivu při fázi č. 2 52

Obr. 49 Napětí horninového masivu při fázi č. 3 53

Obr. 50 Napětí horninového masivu při fázi č. 4 53

Obr. 51 Geometrie modelu 54

Obr. 52 Okrajové podmínky se zatížením 55

Obr. 53 Celkové posuny fáze č. 2 56

Obr. 54 Celkové posuny fáze č. 3 56

Obr. 55 Celkové posuny fáze č. 4 57

Obr. 56 Celkové posuny fáze č. 5 57

Obr. 57 Hlavní napětí na ostění při fázi č. 1 58

Obr. 58 Hlavní napětí na ostění při fázi č. 2 58

Obr. 59 Hlavní napětí na ostění při fázi č. 3 59

Obr. 60 Hlavní napětí na ostění při fázi č. 4 59

Obr. 61 Hlavní napětí na ostění při fázi č. 5 60

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry zeminy 42

Tab. 2 Parametry segmentového ostění..... 42

Tab. 3 Parametry stříkaného betonu..... 42

Tab. 4 Celkové maximální a minimální posuny 46

Tab. 5 Celkové maximální a minimální napětí na ostění tunelu při spodních vláknech..... 48

Tab. 6 Celkové minimální a maximální síly na ostění tunelu 51

Tab. 7 Celkové minimální a maximální momenty na ostění tunelu..... 51

Tab. 8 Parametry zeminy 54

Tab. 9 Parametry segmentového ostění..... 54

Tab. 10 Celkové minimální a maximální posuny 57

Tab. 11 Celkové minimální a maximální hlavní napětí na ostění tunelu 60

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PODKLADŮ

Literatura

[1] KLEPSATEL, František, Pavol KUSÝ a Libor MAŘÍK. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 8088905435.

[2] BARTÁK, Jiří a Jan PRUŠKA. *Podzemní stavby*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 170 s. ISBN 978-80-01-04789-7.

[3] BARTÁK, Jiří. *Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR*. Vyd. 1. Praha: Česká tunelářská asociace ITA-AITES, Pracovní skupina pro mechanizované tunelování, 2014, 100 s. Dokumenty České tunelářské asociace ITA-AITES. ISBN 978-80-260-5957-8.

[4] MAYER, Peter-Michael, Stephan FRODL, Wolf FRIEDEMANN a Rainer JOUAUX. Innovative solutions for driving cross passages in bored tunnels with segmental lining /. Innovative Lösungen zum Auffahren von Querschlägen maschinell hergestellter Tunnel mit Tübbingauskleidung. *Geomechanics and Tunnelling* [online]. 2010, 2015-11-18, 3(3): 295-307 [cit. 2015-11-18]. DOI: 10.1002/geot.201000021. ISSN 18657362

[5] Časopis Beton: technologie - konstrukce - sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2001-, sv. ISSN 1213-3116. 6x ročně

[6] ALDORF, Josef. *Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR*. Vyd. 1. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2006, 43 s. Dokumenty Českého tunelářského komitétu ITA/AITES, sv. 2.

Podklady firmy Metrostav

[7] Zatížení ostění horninovým tlakem

[8] Statické posouzení ostění v místě propojek

[9] Technická zpráva

[10] TBM koncept

Internetové podklady

[11] URL: <http://www.ceskenoviny.cz/regiony/regiony/index_img.php?id=321412> [online]. [citováno 15. května 2015]

[12] URL: <http://www.railsystem.net/natm> [online]. [citováno 19. května 2015]

[13] URL: <http://metrostav.cz/pdf/noviny/15-162014.pdf> [online]. [citováno 19. května 2015]

[14] URL: <http://technet.idnes.cz/metro-petriny-nejvetsi-jeskyne-v-praze-fc2-/tec_reportaze.aspx?c=A121010_221752_tec_reportaze_rja> [online]. [citováno 5. června 2015]

[15] URL: <http://www.portofmiamitunnel.com/press-room/image-gallery/construction-of-tunnel-cross-passage-5/> [online]. [citováno 8. srpna 2015]

[16] URL: <https://www.metroweb.cz/metro/stanice/linka_b/1B.htm> [online]. [citováno 21. srpna 2015]

[17] URL: <http://www.crossrail.co.uk/news/articles/crossrail-awards-remaining-tunnelling-contracts-as-crossrails-momentum-becomes-unstoppable-1> [online]. [citováno 1. října 2015]

[18] URL: <http://www.powersystemservices.co.uk/case-studies/crossrail-temporary-propping-system-manufacture/> [online]. [citováno 5. října 2015]

[19] URL: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAAahUKEwiQrsDf4ZrJAhUC9HIKHYmQD1U&url=http%3A%2F%2Fwww.messergroup.com%2Fcz%2FTisk%2FZmrazov__n___zeminy_kapaln__m_du__kem%2FZmrazovani_zeminy.pdf&usg=AFQjCNHWEQvD0fajKhyDkfBNarf8QFgvjw&sig2=EMD4K-TCu6glTOBChdHawQ> [online]. [citováno 19. října 2015]

[20] URL: <http://www.koridory.cz/archives/19389/#> [online]. [citováno 7. října 2015]

[21] URL: <http://www.koridory.cz/archives/19056/> [online]. [citováno 22. října 2015]

[22] URL: <http://tunnelingonline.com/innovations-ground-improvement-award-moretrench/> [online]. [citováno 28. října 2015]

[23] URL: <http://www.roadtraffic-technology.com/projects/westerschelde tunnel/westerschelde-tunnel5.html> [online]. [citováno 28. října 2015]

[24] URL: <fast10.vsb.cz/duris/nrtm.pdf> [online]. [citováno 1. listopad 2015]

[25] URL:<metrostav.cz> [online]. [citováno 5. března 2015]