

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Konstrukce a dopravní stavby



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rozevírání segmentového ostění tunelů městské podzemní dráhy

Vyhotovil: Bc. Štěpán Weiss
Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Weiss Jméno: Štěpán Osobní číslo: 396571
Zadávací katedra: Katedra geotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Rozevírání segmentového ostění tunelů městské podzemní dráhy

Název diplomové práce anglicky: Openings of Segmental Tunnel Lining of Municipal Underground Railway

Pokyny pro vypracování:

Vypracovat rešeršní práci o historii vývoje budování propojek mezi tubusy ze segmentovým ostěním, možné příčiny rozevírání prstenců ostění a spar mezi jednotlivými segmenty, popis v současnosti používaných metod zabezpečujících rozevírání segmentů v propojení tubusů a propojek (s ohledem na chování segmentového ostění), výpočet propojení zabezpečeného rámy

Seznam doporučené literatury:

odborné články z časopisů (např. Tunel) a konferencí - využití EIZ,

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Datum zadání diplomové práce: 5. 10. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8. 1. 2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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 nutně 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“.

5. 10. 2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Rozevírání segmentového ostění tunelů městské podzemní dráhy“ zpracoval samostatně pod vedením doc. Dr. Ing. Jana Prušky a za použití uvedené literatury.

V Praze dne.....

.....

Bc. Štěpán Weiss

Poděkování:

Rád bych touto cestou vyjádřil své poděkování společnosti Mott MacDonald CZ za poskytnuté materiály a zejména bych chtěl poděkovat Ing. Barnabáši Polákovi za odborné konzultace a věcné připomínky. Nemalý dík patří také doc. Dr. Ing. Janu Pruškovi za poskytnuté rady, doporučené materiály a čas strávený konzultacemi.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je přiblížit problematiku otevírání tunelového segmentového ostění a jeho zajištění v místě tunelové propojky. V úvodu práce jsou shrnuty principy výstavby tratových tunelů městské podzemní dráhy a následně jsou popsány používané typy segmentového ostění. V následující části jsou popsány jak historické, tak dnes používané principy zajištění segmentového ostění, aby bylo možné realizovat tunelovou propojku, či jiný stavební objekt, který je potřeba spojit s traťovým tunelem. Na závěr je proveden a popsán alternativní výpočet a následný posudek nosníku navrženého ocelového rámu, který byl navržen při výstavbě metra v městě Baku.

Klíčová slova

dočasný ocelový rám, tunelová propojka, segmentové ostění, zajištění ostění, podzemní dráha, mechanizované tunelování, numerické modelování, MKP, PLAXIS 2D, SCIA Engineer

Summary

The aim of this diploma thesis is bringing the issue of an opening the tunnel segmental lining and his support in a place of the cross passages. Introduction summarizes the principles of tunnel construction trackside city underground system and describes subsequently used types of segmental lining. The following part describes both historically and currently used principles to ensure segmental lining in order to realize cross passages or other construction, which need to be coupled with a track tunnel. At the end, an alternative calculation and subsequent checks of a beam designed steel frame are performed, which has been designed during the construction of the metro in Baku.

Key words

Temporary steel frame, tunnel cross passage, segmental lining, ensuring lining, underground railway, mechanised tunnelling, numerical modeling, FEM, PLAXIS 2D, SCIA Engineer

Obsah

1	Úvod	8
2	Ražba traťových tunelů	9
2.1	Prstencová metoda	9
2.2	Plnoprofilové tunelovací stroje	10
3	Segmentové ostění	13
3.1	Typy segmentového ostění dle materiálu.....	13
3.2	Typy prstenců segmentového ostění	14
3.3	Geometrie prstenců	20
3.4	Izolace a těsnění mezi segmenty	21
4	Historická řešení prostupů v segmentovém ostění	23
4.1	Výstavba prostupů	23
4.2	Prostupy v litinovém ostění \varnothing 5,1/5,5 m.....	24
4.3	Prostupy v litinovém ostění \varnothing 5,6/6,0 m.....	25
4.4	Prostupy v litinovém ostění \varnothing 7,8/8,5 m.....	25
4.5	Prostupy v litinovém ostění \varnothing 8,8/9,5 m.....	28
4.6	Prostupy v železobetonovém ostění \varnothing 5,1/5,5 m.....	28
4.7	Prostupy v železobetonovém ostění \varnothing 7,8/8,8 m.....	29
5	Současné systémy zajištění prostupů	31
5.1	Ocelové rámy.....	31
5.1.1	Kruhový rám	31
5.2	Speciální segmenty	34
5.2.1	Segmenty spojované trny	34
5.2.2	Segmenty spojované ocelovými kapsami	37
5.2.3	Výhody a nevýhody	40
6	Navržený dočasný ocelový rám	42
6.1	Úvod	42
6.2	Popis návrhu a posouzení ocelového rámu.....	45
6.3	Použité materiály a jejich parametry	52
7	Alternativní posouzení navrženého rámu	55

7.1	Rozvoj 2D modelů	55
7.2	Grafické znázornění vnitřních sil jednotlivých modelů	59
7.3	Nastavení 3D skořepinovo pružinového modelu	65
7.4	Model traťového tunelu včetně ocelového rámu a prostupu	71
7.5	Výsledné vnitřní síly a chování konstrukce	72
7.6	Posouzení ocelových nosníků	80
8	Závěr	84
9	Seznam použité literatury	85
10	Seznam příloh	87

1 Úvod

V této diplomové práci se zabývám problematikou rozevírání segmentů městské podzemní dráhy, čímž je myšleno cílené otvírání segmentového ostění a budování prostupů za účelem výstavby tunelové propojky či jiného stavebního objektu, který je nutné propojit s traťovým tunelem.

V první části diplomové práce nastiňuji používané metody ražeb traťových tunelů městské podzemní dráhy a to jak v minulosti, tak v dnes. Zmiňuji se například o Prstencové metodě, která byla použita při výstavbě pražského metra. Dále se zmiňuji o tunelových strojích a jejich základním rozdělení.

V následující kapitole popisuji druhy používaného segmentového ostění, především jaké druhy materiálů se používají a jak se skládají do jednotlivých prstenců.

Poté se zmiňuji o základních metodách, které se používají k zajištění segmentového ostění, aby bylo možné vybourat požadovaný počet segmentů a začít realizovat propojku.

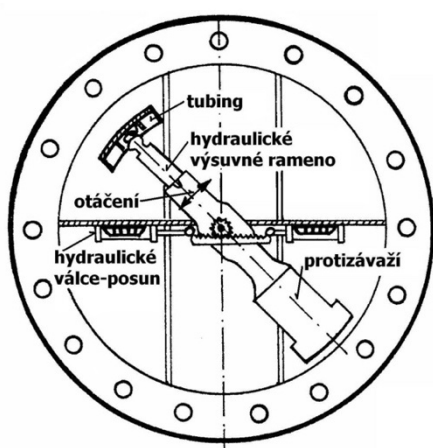
Na závěr popisuji mnou provedený zjednodušený posudek hlavních ocelových prvků navrženého dočasného ocelového rámu, který byl realizován ve městě Baku.

2 Ražba traťových tunelů

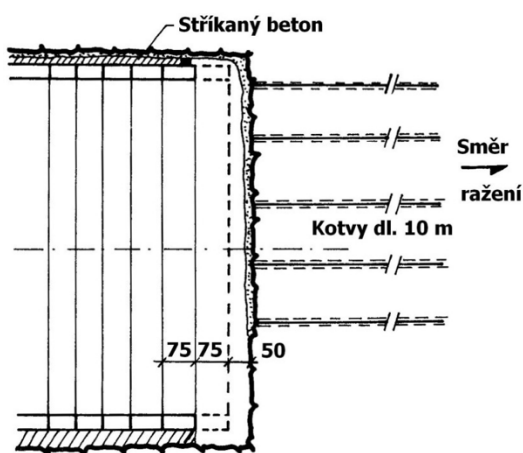
Ražba traťových tunelů městské podzemní dráhy se nejčastěji provádí a prováděla na plný profil tunelu. Čelba není členěna na jednotlivé části výrubu, ale provádí se naráz v celém požadovaném profilu. V minulosti se ražba realizovala například prstencovou metodou, nemechanizovanými štíty a postupně se začaly objevovat mechanizované štíty a jiné plnoprofilové tunelovací stroje v různých variantách, které se nejčastěji používají i dnes.

2.1 Prstencová metoda

Při této metodě se razí po jednotlivých záběrech a ražba se provádí nečleněným porubem. Délka jednoho záběru je závislá na geologických podmínkách v okolí podzemního díla. Pokud se ražba provádí v tvrdých skalních horninách je délka záběru na 1 až 2 prstence a není nutné žádné dočasné vystrojení. V méně kvalitních horninách s častějším výskytem poruch nesmí být délka záběru větší než je potřebná délka pro montáž jednoho prstence. Prstenec se skládá z jednotlivých tubingů. V nepříznivých geologických podmínkách je potřeba v každém záběru provést pažení nebo dočasné vystrojení stěn výrubu. Čelba i strop výrubu se musí zajistit proti vypadávání kamenů. Čelba se zajistí například vrstvou stříkaného betonu, napnutím ochranné sítě nebo zapažením za příčné nosníky. Ve špatných geologických podmínkách je nutné zvolit zesílené zajištění čelby pomocí kotev nebo předrážet pilot tunel. Montáž prstenců se může provádět ručně pomocí vrátku nebo strojně pomocí erektoru.



Obrázek 2.1 - schéma erektoru [1]



Obrázek 2.2 - ražba prstencovou metodou [1]

Pracovní postup:

1. rozpojení horniny a případné pažení čelby a dočasné vystrojení,
2. odvoz rubaniny,
3. montáž prstence pomocí erektoru,
4. aktivace ostění pomocí výplňové injektáže.

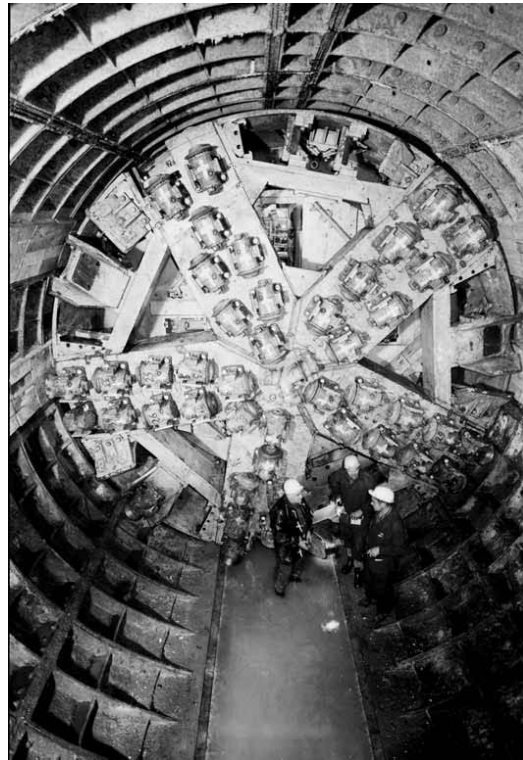
V odstupu za čelbou se provádí:

1. těsnící injektáž,
2. těsnění spár a otvorů v ostění,
3. úprava dna,
4. eventuální kontrolní injektáž.

Některé práce v cyklu se mohou provádět zároveň, aby bylo dosaženo optimálního pracovního výkonu [1].



Obrázek 2.3 - erektor při ukládání segmentu [2]



Obrázek 2.4 - mechanizovaný štít TŠČB-3 [2]

2.2 Plnoprofilové tunelovací stroje

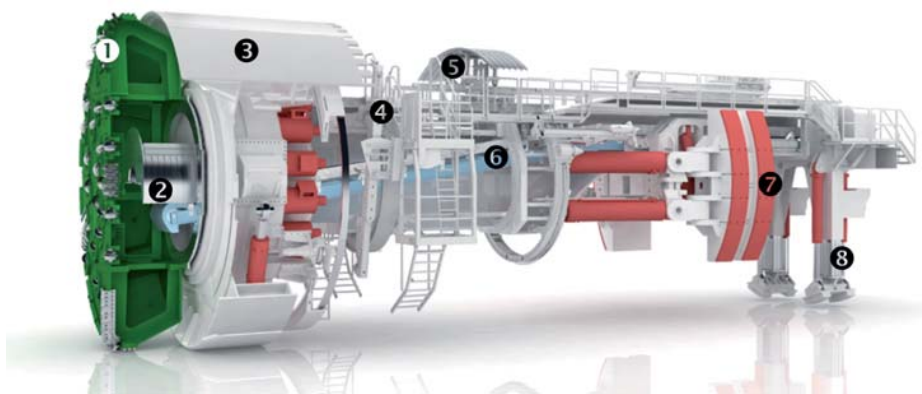
Modernější technologií oproti prstencové metodě, je použití plnoprofilových tunelovacích strojů. Jedná se o výkonné mechanismy, pomocí kterých je možné kontinuálně rozpojovat horninu v celém profilu výrubu bez použití trhacích prací a

zároveň téměř současně budovat tunelové segmentové ostění. Tunelovací stroje však také horninu rozpojují po záběrech, které jsou dány maximálním možným výsuvem přítlačných axiálních lisů. Po vyčerpání vysunutých lisů je třeba stroj přemístit a v této fázi je rozpojování horniny v čelbě přerušeno.

Tunelovacích strojů je velké množství. Prvními předchůdci tunelových strojů jsou nemechanizované štíty, kde štít v nestabilní geologii zajišťuje čelbu a strop výrubu. Pod ochranou štítu je možné budovat ostění, které bylo v minulosti zděné a později segmentové (litinové, železobetonové). Štít se posouvá pomocí hydraulických lisů, které se opírají do již postaveného ostění. Při ražbě pražského metra v úseku pod Vltavou a pod Starým Městem až do stanice Můstek byl z bezpečnostních důvodů nasazen sovětský mechanizovaný štít TŠČB-3 [3].

Pracovní postup mechanizovaného štítu TŠČB-3:

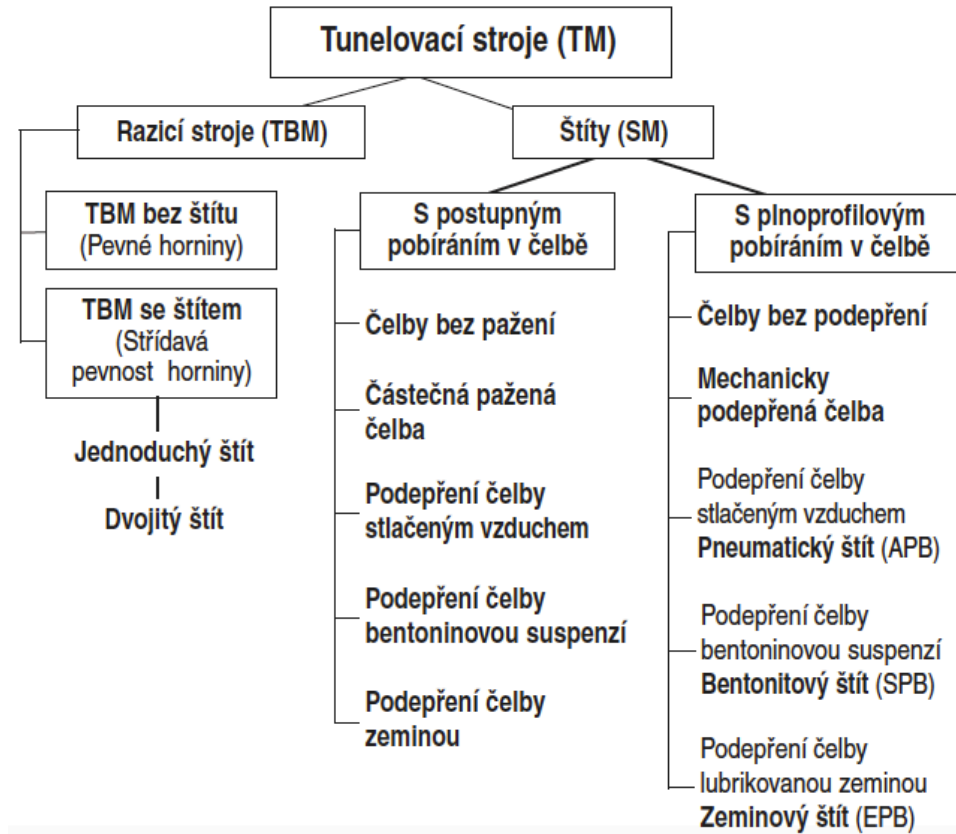
- 1) mechanizované rozpojování valivými dláty, nakládání rubaniny na dopravní pás,
- 2) nakládání rubaniny do vozíků, které odváží rubaniny ven z tunelu,
- 3) posun štítu pomocí lisů opřených do rozpěrného prstence,
- 4) budování ostění pomocí lisovaného betonu pomocí přesného bednění a lisovacího prstence postupným zaplňováním obedněného prostoru betonovou směsí a lisováním betonu.



Obrázek 2.5– otevřený tunelovací stroj TBM, 1 - řezná hlava; 2 - sběrač rubaniny; 3 - ochranný štítek; 4 - vrtačka; 5 - erektor pro instalaci ocelových sítí; 6 - pásový dopravník; 7 - radiální rozpěrné desky; 8 - spodní výsuvné podpěry [3]

Zároveň se v odstupu za čelbou bylo nutné provést těsnicí injektáž v místě průsaků, sanace horniny za ostění v místě mimořádných poruch a nadvýlomů.

Štíty se používají v případě, že se ražbě provádí v málo pevných, poruchových, poloskalních horninách či zemninách. V pevných a celistvých skalních horninách se používají otevřené tunelovací stroje TBM s přitlačnými deskami (gripry), které slouží ke stabilizaci stroje a poskytují oporu pro přitlak stroje do čelby pomocí, který je zajištěn pomocí axiálních lisů. Některé razicí stroje tohoto typu jsou opatřeny dílčím pláštěm pro ochranu stroje. V případě nutnosti se výrub zajišťuje pomocí svorníků v kombinaci se stříkaným betonem.



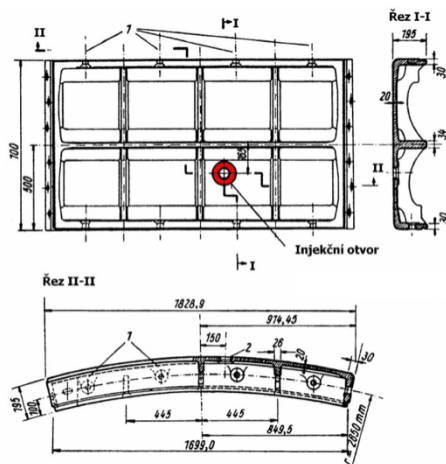
Obrázek 2.6 - v ČR používané rozdělení tunelovacích strojů [3]

3 Segmentové ostění

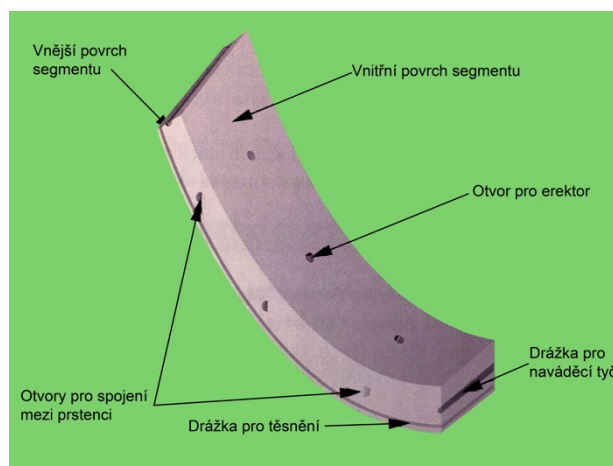
Při ražbě tunelů podzemní dráhy pomocí tunelovacích strojů a v minulosti prstencovou metodou tvoří definitivní ostění jednotlivé prstence kruhového tvaru, které se skládají z několika segmentů tzv. tubingů. Počet tubinků závisí na požadovaném průřezném profilu a typu segmentového ostění.

3.1 Typy segmentového ostění dle materiálu

V minulosti se nejdříve používaly litinové tubingy, které byly standardně vylehčeny a vyztuženy žebry. Jednotlivé segmenty byly přes příruby sešroubovány. Každý segment měl injekční otvor, přes který se prováděla vyplňující a těsnící injektáž. Litinové segmenty byly velmi drahé, a tak se začaly vyrábět prefabrikované železobetonové dílce, které byly podstatně levnější. Vyráběla se celá řada typů a systémů, jejichž tvar byl často odvozen od litinových tubingů. Spojování se taktéž provádělo pomocí šroubení a dále pomocí trnů, systém péro drážka či zaobleným spojem. Aby byla mezi segmenty zajištěna nepropustnost, vkládalo se mezi ně těsnění například z pryskyřice, syntetické pěny či cementové směsi. V segmentech se opět nachází otvor, který sloužil k uchycení segmentu pomocí erektoru a jeho následnému uložení do prstence a poté k injektáži [1].



Obrázek 3.1 - schéma litinového segmentu [1]



Obrázek 3.2 - schéma v dnešní době používaných betonového segmentu [4]

V současnosti se nejčastěji používají železobetonové segmenty vyztužené klasickou betonářskou výztuží. Dále se stále častěji začíná rozmáhat použití segmentů z prefabrikovaného drátkobetonu. Namísto tradiční prutové výztuže je segment vyztužen pomocí rozptýlené výztuže, kterou nejčastěji tvoří ocelové drátky, nebo se

případně využívá kombinace obou druhů vyztužení. Každý z typů vyztužení má své výhody i nevýhody. Zjednodušeně lze říci, že výhodou železobetonových segmentů je jejich vysoká únosnost v ohybu spojená s rozvojem trhlin. Oproti tomu výhodou drátkobetonových segmentů je omezení šířky trhlin při středních úrovních ohybových namáhání.

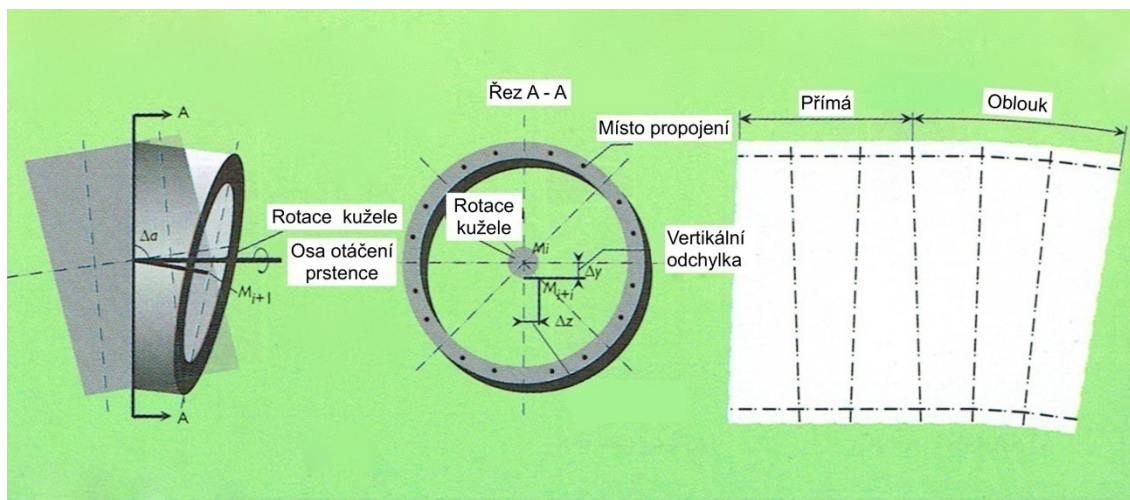
Při návrhu železobetonové segmentu je třeba uvažovat, že se segment bude vyskytovat v agresivním prostředí a tomu musí být návrh uzpůsoben. Obvyklá hodnota krytí je 20 – 30 mm, ocelová výztuž může být rovněž chráněna nátěrem, pokovením, epoxy obalem nebo katodicky ochráněna. Segmenty jsou navrženy převážně z betonů třídy C30/37 až C50/60. Jednou z přísad, která se do segmentů přidává jsou plastová vlákna. A to z důvodu lepší odolnosti při vzniku požáru. Plastová vlákna se při požáru roztaví a v segmentu vznikne soustava pórů, kudy může pronikat vodní pára, což zamezí odprýskávání betonu. Přidávají se 1 až 3 kg polypropylenových vláken na jeden metr kubický betonu. Vlákna mají obvykle tyto rozměry: průměr vlákna 18 μ m, délka vlákna v rozmezí 6-12 mm [3].

3.2 Typy prstenců segmentového ostění

Jak již bylo zmíněno výše, segmentové ostění se skládá z jednotlivých prstenců kruhového tvarů a ty je možné rozlišovat do několika skupin. Niveleta tunelu je tvořena pomocí jednotlivých prstenců ostění následujících za sebou a jejich podélného uspořádání. Podle podélného uspořádání je možné segmentové ostění rozdělit do následujících skupin:

- **s univerzálním prstencem** – celá trasa je navržena pomocí jednoho univerzálního prstence, přičemž požadovaného výškové a směrové řešení je dosaženo natáčením prstenců okolo své osy, prstenec je na obou stranách zkosený,
- **s pravostranným a levostranným prstencem** – trasa tunelu se skládá ze dvou typů prstenců, které se vzájemně liší opačným zkosením, směrové a výškové oblouky se realizují vzájemnou posloupností a natáčením pravostranného či levostranného prstence, zkosená je pouze vzdálenější strana prstence od čelby,

- **s neskoseným prstencem** – tento typ je určen pouze pro tunely bez změny výškového a směrového vedení, kvůli své omezenosti se dnes již prakticky nenavrhuje.

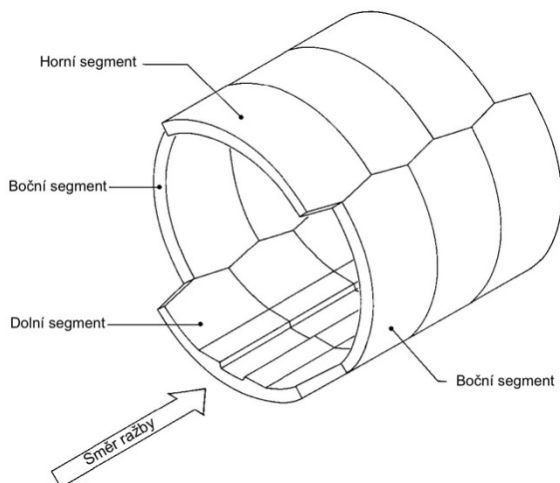


Obrázek 3.3 - schéma natáčení univerzálního prstence [4]

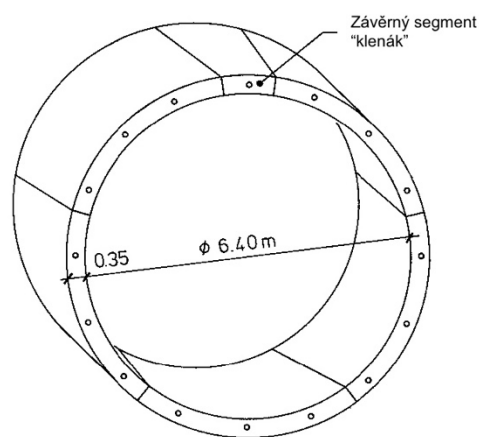
V rámci jednoho prstence lze hovořit o příčném uspořádání, které je definováno rozložením a počtem segmentů. Počet segmentů jednoho prstence především vychází z průměru navrhovaného tunelu. Velikost jednoho segmentu se volí tak, aby byla zajištěna pohodlná manipulace a bylo možné segment v tunelu otočit. Tunely malých průměrů od 2 m do 5 m jsou tvořeny pomocí 4 až 5+1 nebo 5 až 6+0 segmentů, střední tunely o průměru 5-8 m jsou standardně tvořeny 5 až 6+1 nebo 6 až 7+0 segmenty a tunely průměrů větších než 8 m se skládají 6 až 8+1 nebo 7 až 9+0 segmentů. Počet segmentů se liší tunel od tunelu, a proto neplatí, že tunel stejného průměru musí mít stejný počet segmentů. Obvykle je snaha, aby se prstence skládaly z co nejmenšího počtu segmentů a to z důvodu menšího počtu spár mezi segmenty a s nimi spojené problémy s utěsněním. Nejčastěji výsledný počet segmentů vychází z logistických a konstrukčních kritérií, jako je maximální možná délka či u tunelů velkých průměrů hmotnost jednoho segmentu. Výhodou menšího počtu segmentů je vyšší výsledná tuhost ostění a menší deformace ostění, nadruhou stranu v rámci jednoho segment vznikají větší ohybové momenty.

Dále je možné segmenty rozdělit z hlediska jejich geometrie, kdy se používají dva základní tvary:

- obdélníkové segmenty (mezi něž spadají i segmenty se skosenými hranami) - v současnosti se jedná o nejpoužívanější typy při stavbě dopravních tunelů,
- hexagonální segmenty (honeycomb) - tento typ segmentů se v současnosti používá při výstavbě hydrotechnických tunelů, výhodou je menší počet segmentů a zároveň možnost provádění ražby během instalace ostění, nevýhodou jsou menší přítláčné síly.



Obrázek 3.4 - konstrukční schéma tunelu z hexagonálních segmentů [5]

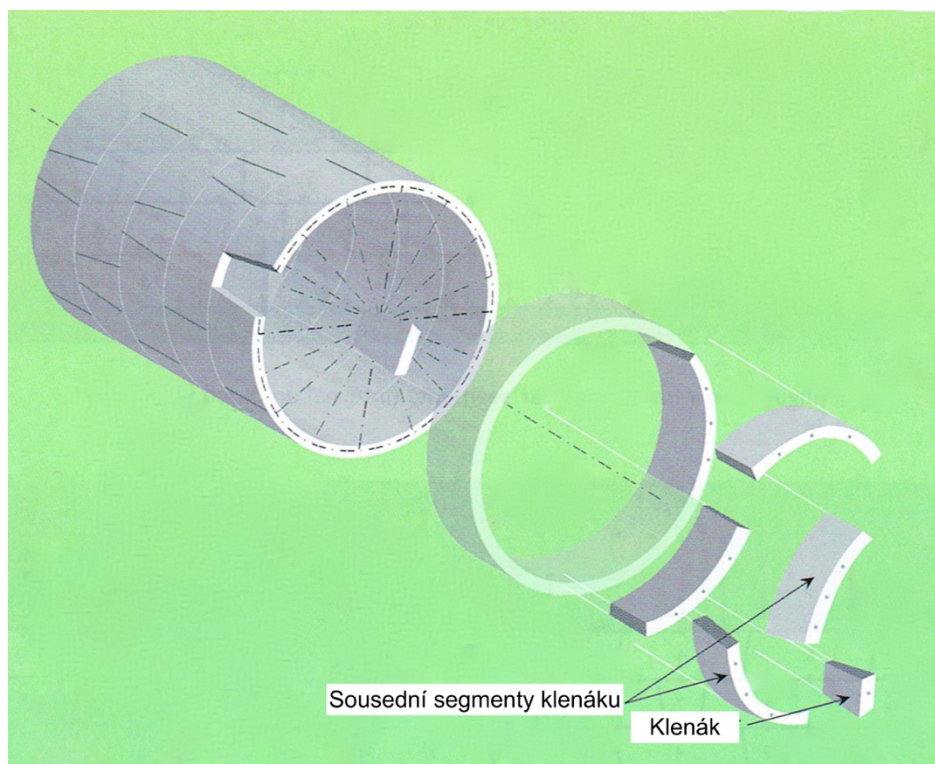


Obrázek 3.5 - konstrukční schéma tunelu z obdélníkových segmentů 5+1 [5]

V případě obdélníkových segmentů se prstenec uzavírá pomocí závěrného segmentu tzv. klenáku. Klenák se osazuje v zásadě dvěma způsoby. První možností je klenák zasunout do ostění kolmo na směr tunelu. V tomto případě musí být sklon ložných spár upraven tak, aby bylo možné klenák zasunout. Okolní segmenty mají sešikmené hrany směrem do tunelu. Nevýhodou tohoto osazení je, že klenák je fixován pouze pomocí spojovacích prvků. Druhou a častější variantou ukládání klenáku je zasouvání ve směru podélné osy tunelu. Tento klenák má sklon ložných ploch ve směru normály, ale v podélném směru jsou šikmo ukloněny. Takto uložený klenák je v prstenci z obou stran zaklíněn a je staticky stabilní. V prstenci se buď vyskytují všechny segmenty stejně dlouhé, tudíž i klenák má stejnou teoretickou obvodovou délku a stejný počet propojovacích prvků jako základní segmenty.

V tomto případě se prstenec označuje například 6+0, což znamená, že se skládá ze šesti stejně dlouhých segmentů včetně klenáku. Druhou variantou je systém s menším klenákem, a to většinou poloviční či třetinové teoretické obvodové délky základního segmentu. Uklonění spár klenáku se volí v závislosti na průměru tunelu,

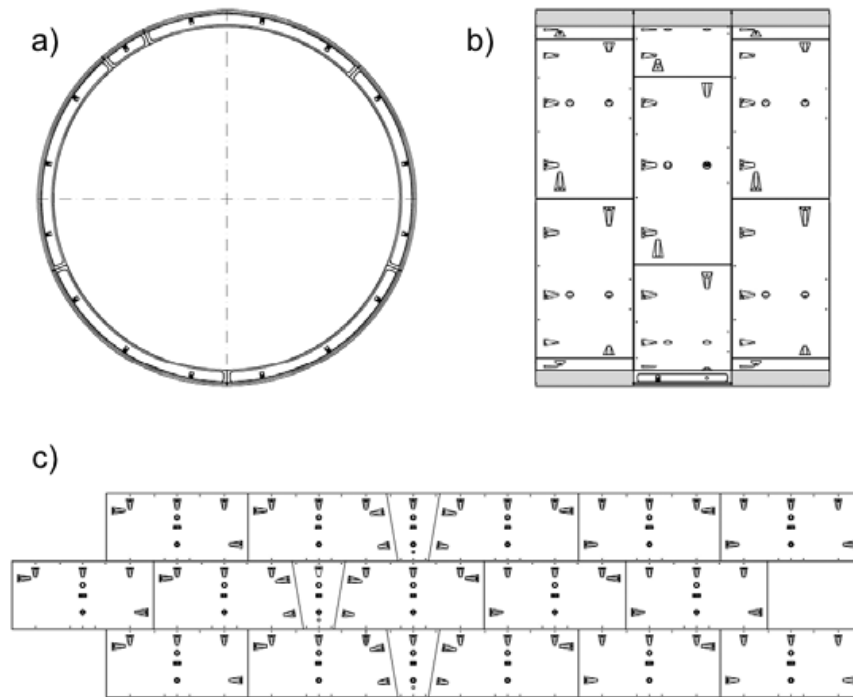
tloušťce ostění, délce segmentů, počtu segmentů v prstenci, velikosti klenáku a možnosti jeho předsunutí k čelbě. Dále je potřeba myslet na dostatečnou vůli v uložení. Co se montáže ostění týká, tak je zapotřebí, aby na klenák vždy působil minimálně jeden tlačný lis razícího stroje. Pozice klenáku není pevně stanovená a závisí na natočení prstence, tudíž je možné uzavírat prstenec například ve dně tunelu nebo kdekoliv jinde po obvodu. Jak již bylo zmíněno výše, v případě použití jednoho typu prstence se jedná o tzv. univerzální prstenec. Pokud se použijí dva typy prstenců, liší se prstence pozicí klenáku vůči zkosení, a to tím způsobem, že klenáky jsou na protilehlých stranách prstenců. Přímých úseků se dosáhne střídáním prstenců tak, že klenák prvního i druhého prstence je vždy ve stejné poloze např. v horní části. Oblouku se dosáhne natočením prstence o určitý úhel vůči poleze prvního prstence. Systém dvou typů prstenců klade větší nároky na správnou logistiku segmentů ke stroji.



Obrázek 3.6 - schéma postupu montáže prstence [4]

Jednotlivé prstence je nutné natáčet nejen kvůli směrovému a výškovému řešení tunelu, ale také proto, aby spáry mezi segmenty nebyly uspořádány do kříže, ale do tvaru „T“ a nevznikaly tak průběžné podélné spáry. Tím je zajištěno lepší těsnosti ostění, neboť těsnění je v rohové části tužší a obtížně deformovatelné. Křížové spáry

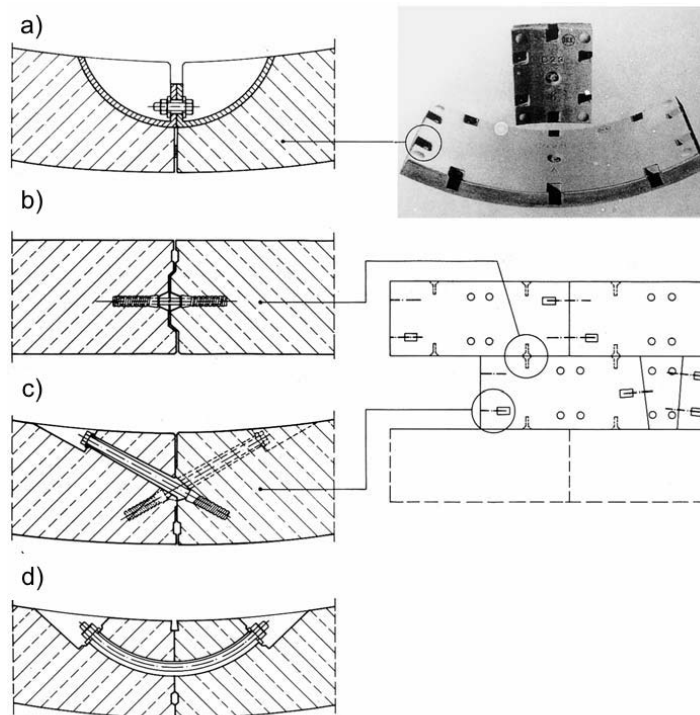
vznikají v případě, že se následují prstenec natočí o $1/n$ kruhu. Dané natočení je třeba zahrnout do návrhu zkosení prstenců a tím se sníží počet možných pozic.



Obrázek 3.7 - schéma skladby segmentového ostění a) příčný řez b) podélný řez c) rozvinuté schéma [3]

V případě prstence členěného na segmenty s klenákem poloviční délky, vznikají vždy křížové spáry. Poté je nutné eliminovat křížové spáry například ukloněním všech spár, nebo upravení délky segmentů tak, aby se střídaly delší a kratší dílce. Styčné spáry mezi segmenty se mohou nechat hladké, nebo je možné vytvořit systém typu péro – drážka, kdy se na jedné straně vytvoří náletek a na druhé straně výduť. Dále se používá varianta, kdy je segment opatřen prohlubněmi do kterých se vkládají vodící kolíky tzv. bicone. Prstence jsou mezi sebou spojeny nejčastěji pomocí šroubů, případně pomocí samosvorných hmoždin, čímž je zajištěno přenášení tahových sil. Tahová síla mezi styčnými spárami jsou vyvozeny převážně důsledkem pružení stlačeného těsnění. Montáž pomocí šroubů se většinou provádí z vnitřního povrchu ostění, kde v jednom segmentu je připravená nika do které se vloží šroub, který se zašroubuje do zabetonované hmoždiny v přilehlém segmentu. Veškeré spojovací prvky jsou na segmentech rozmístěny tak, aby na sebe segmenty pasovaly ve všech pozicích. Počet pozic závisí právě na počtu spojovacích míst. Například pokud se na prstenci nachází 16 spojovacích míst, je možné prstenec

natočit do 16ti poloh. Prstenec se natočí vždy minimálně o $1/16$ kruhu, tedy $360/16 = 22,5^\circ$. Jak bylo zmíněno výše, nepoužívají se všechny pozice, jelikož při některých vznikají průběžné podélné spáry, které nejsou žádoucí.



Obrázek 3.8 - detaily kotvení železobetonových segmentů a) ocelová kapsa b) vložený trn c) šroub v hmoždině d) zahnutý šroub [5]

Při výrobě segmentového ostění jsou kladeny velké nároky na přesnost a to z důvodů, aby bylo možné segmenty osadit a napojit ve všech možných kombinacích, aniž by docházelo k nežádaným koncentracím napětím. V případě větších výrobních nepřesností, může dojít k nedokonalému doléhání těsnění a nefunkčnosti celého systému [3].

Tabulka 3.1 - Přípustné tolerance segmentového ostění [3]

1	Podélné spáry (vztaženo na plochu přenášející zatížení)	
1.1	Pravoúhlé spoje v podélných spárách	0,3 mm
1.2	Konicita podélných spár	0,5 mm
1.3	Pravidlo sčítání zároveň vzniklých nepřesností: V rámci podélné spáry nesmí vzniknout jako kombinace různých tolerancí větší celková odchylka než 0,6 mm.	
2	Rozměry celého segmentu (vztaženy na střední rovinu)	

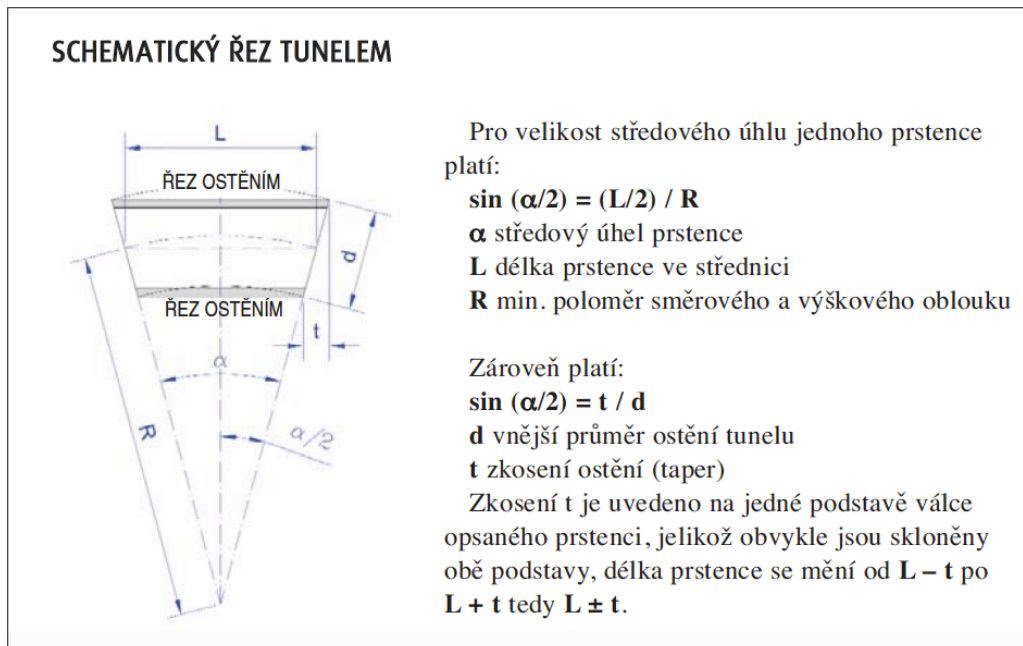
2.1	Šířka segmentu	0,5 mm
2.2	Tloušťka segmentu	3,0 mm
2.3	Délka obvodu segmentu	0,6 mm
2.4	Vnitřní poloměr (jednotlivé segmenty)	1,5 mm
2.5	Délka diagonály vnitřní plochy segmentu se smí odchylovat maximálně o 5 mm	
2.6	Od roviny vytvořené třemi rohy segmentů se vzdálenost čtvrtého rohu může odchylovat maximálně o 5 mm.	
3	Drážka pro izolaci	
3.1	Šířka drážky	+0,2, -0 mm
3.2	Hloubka drážky	+0,2, -0 mm
3.3	Osa drážky	1 mm
4	Rovinnost	
4.1	Rovinnost podélných spár	0,5 mm
4.2	Rovinnost příčných spár	0,5 mm
4.3	Lokální nerovnosti, které vedou ke vzniku koncentrace napětí bodovým nebo liniovým dotykem nesmí vznikat.	
5	Tolerance na sestaveném prstenci	
5.1	Vnější průměr	10 mm
5.2	Vnitřní průměr	10 mm
5.3	Vnější obvod (měřený ve třech úrovních)	30 mm

3.3 Geometrie prstenců

Délka prstence se navrhuje v závislosti na směrovém a výškovém vedení trasy tunelu a to tím způsobem, aby bylo možné vyrábět jeden univerzální prstenec s určitým úklonem. Což je výhodné s ohledem na typizaci výroby a není potřeba vyrábět každý prstenec jiného tvaru.

Na základě souběhu výškových a směrových oblouků se stanoví minimální poloměr oblouku, který je možné z daných prstenců sestavit. Přímé úseky se realizují tak, že se jednotlivé prstence kladou v protisměrných polohách, čímž se vyruší zkosení. Oblouk nebo přechodnice se pak sestavuje natáčením následujícího prstence tak,

aby odchylka byla ve stanovených mezích. Zkosení je nutné volit uvážlivě, neboť při příliš velkém zkosení dochází k větším odchylkám od stanovené trasy [3].



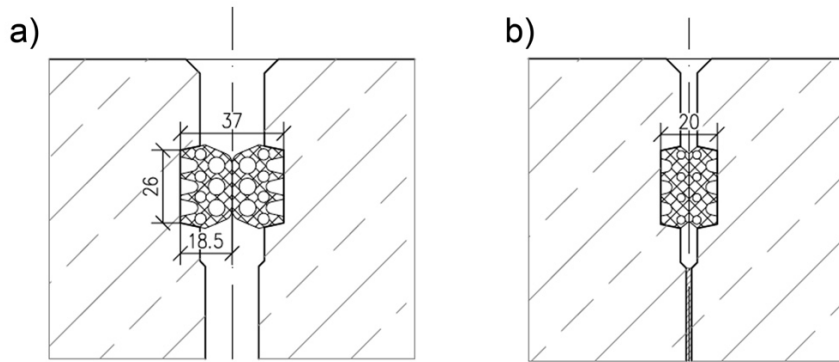
Obrázek 3.9 - Výpočet zkosení prstence [3]

3.4 Izolace a těsnění mezi segmenty

Segmentové ostění musí být navrženo tak, aby bylo zamezeno vniknutí tlakové vody do tunelu. Čehož je docíleno samotnými segmenty, jejichž nepropustnost je zajištěna omezenou velikostí trhlin a maximálním přípustným napětím. Mezi segmenty se vkládají pryžové těsnící pásy, které se osazují do připravených žlábků na kontaktních plochách. Těsnění se vyrábí v kuse a tvoří uzavřený rám, který se navleče na každý segment, tudíž jsou vždy v ložných a styčných spárách dvě těsnění proti sobě. Rohy těsnění jsou uzpůsobeny tak, aby byly ostré nikoliv zaoblené. Těsnění je většinou v drážce přilepeno, aby při manipulaci se segmentem nedošlo k jeho vyvléknutí.

Druhy těsnění

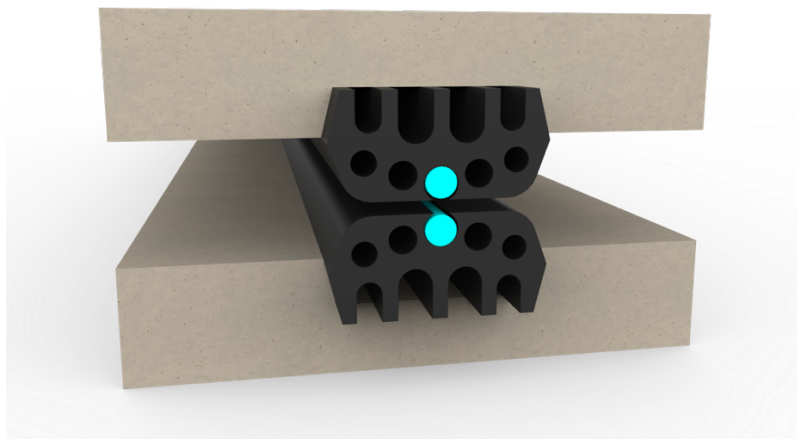
Stlačitelné těsnění – jedná se o těsnění z elastomeru, která se speciálně vyrábí pro segmentové ostění. Tento typ funguje na jednoduchém principu. Při montáži se nově montovaný segment přitlačí k již namontovanému, čímž dojde ke stlačení i těsnící izolace a zajistí se vodonepropustnost.



Obrázek 3.10 - schéma těsnění: a) nestlačené těsní b) stlačené těsnění [7]

Vodoexpanzní těsnění – taktéž se jedná o těsnění z elastomeru, ale od předešlého se liší vodoexpanzními vlastnostmi, tudíž pokud se dostane do kontaktu s vodou začne bobtnat. Základní vodonepropustnost se zajistí pouhým stlačením těsnění a při nabobtnání odolá i hydrostatickému tlaku. Těsnění je schopné své bobtnání cyklicky opakovat. Umisťuje se na segmentu pár centimetrů od rubové strany a používají se dva způsoby umístění. Již zmíněný systém, kdy je těsnění po celém obvodu segmentu tzv. dvouvrstvý systém, nebo je nataženo pouze na polovině segmentu tzv. jednovrstvý systém.

Kombinované těsnění – tento systém kombinuje dva předešlé systémy, kdy stlačitelné těsnění tvoří základní složku a expanzní je v ní vloženo, čímž je zajištěno vzájemné doplňování jednotlivých vlastností. Tento typ se umisťuje okolo celého obvodu segmentu [3].



Obrázek 3.11 - kombinované těsnění [6]

4 Historická řešení prostupů v segmentovém ostění

Nutnost řešit jakým způsobem realizovat prostupy v segmentovém ostění byla již v minulosti a to z důvodů výstavby přilehlých stavebních objektů napojených na traťové tunely. Například: hygienické buňky, vzduchotechnická zařízení, spojení měníren, jímky pro odvodnění, objekty ochranného systému metra, bezpečnostní propojení traťových tunelů propojkami a další objekty potřebné pro dopravní a ochranné systémy metra. Dále při výstavbě trojlodních stanic při propojení středního staničního tunelu s krajními staničními tunely [1].



Obrázek 4.1 - prostup ve stanici Staroměstská [2]

4.1 Výstavba prostupů

Výstavba prostupů byla závislá na typu použitého rámu. Buď se používaly rámy složené z tvarových tubingů, kdy se rám plynule osazoval do prstence ostění, nebo v případě použití železobetonových rámu se rámy výhradně prováděly do hotového ostění. Ocelové rámy do šířky 2 m bylo možné ve stabilních geologických podmínkách osazovat v průběhu výstavby ostění, ale většinou se i ocelové rámy osazovaly dodatečně.

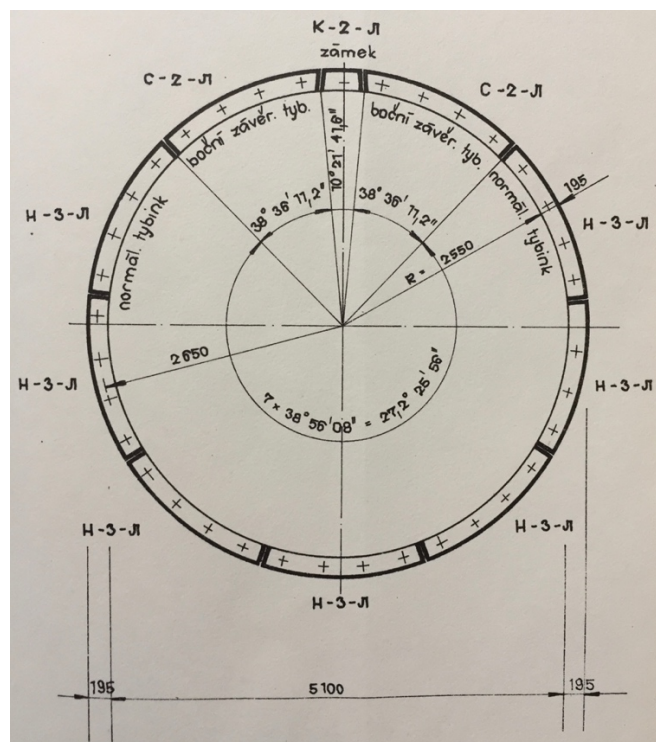
Prstence se v místech budoucích prostupů natáčí tak, aby ložné spáry byly průběžné. Při použití litinového ostění se závěrový tubing prstence umísťuje právě do místa prostupu nebo se zde jeden tubing vynechá a otvor se vyplní stříkaným betonem.

V místě prostupu je nutné nejdříve provést dokonalou výplňovou injektáž a v případě, že jsou v okolí špatné geologické podmínky, je nutné prstence ostění rozepřít provizorním podvlakem. Toto rozepření však nesmí narušit technologii výstavby tunelu a vnitrostaveništní dopravu. Odstranit se smí až po vybudování stěn přístupové štoly, do kterých jsou opřeny stojky vloženého rámu.

Aby bylo možné nainstalovat rám, je potřeba do ostění provést potřebný otvor a následně za rubem ostění vylomit potřebný manipulační prostor, který se v případě špatné geologie zajišťuje ocelovými sítěmi, svorníky a stříkaným betonem. Dále je potřeba, aby se rám v tunelovém ostění co nejrychleji zaktivoval [1].

4.2 Prostupy v litinovém ostění $\varnothing 5,1/5,5$ m

V tomto typu ostění jsou nejčastěji použity prostupy o světlých rozměrech: 3,0x3,0 m; 3,6x3,0 m; 1,5x2,4 m; 1,6x2,1 m; 2,25x2,1 m; 1,8x2,1 m; 1,0x1,0 m.



Obrázek 4.2 - řez litinovým ostěním $\varnothing 5,1/5,5$ m [1]

Konstrukce prostupu

Konstrukce prostupu je tvořena rámem, který se skládá z příčlů a stojek. Jako příčle jsou použity svařované I nosníky, které jsou následně pomocí koutových vzpěrek připojeny ke stojkám. Stojky jsou navrženy z ocelových plechů či z válcovaných profilů přišroubovaných na styčnou plochu ostění v místě prostupu. Aby bylo

zajištěno lepší přenášení reakcí z průvlaků k ocelové stojce prostupu bylo navrženo přibetonování stěn o tloušťce 15 cm, které jsou v případě nutnosti vyztuženy. Návrh stěn, stojek i příčlí je nutné prokázat statickým výpočtem [1].

Konstrukční detaily

Pásnice příčlí je potřeba upravit tak, aby spára mezi přírubou tubingů a pásnicí se mohla utěsnit a zároveň, aby bylo možné pásnici přišroubovat k přírubě tubingů ostění.

Na styčné spáry prostupů jsou přišroubovány plechy, které mají funkci stojek, a jejich tloušťka musí být minimálně 16 mm. Segmenty stojek musí být mezi sebou přivařeny a v lici ostění musí být upraveny, aby spáru mezi stojkou a přírubou tubingů ostění bylo možné utěsnit.

Betonovou stěnu je možné do plechů ocelové izolace betonovat postupnou betonáží nebo injektovat pomocí výplňové injektáže.

Příčle je ke stojce připojena šrouby nebo přivařena průběžnými svary a dále je většinou podepírána vyztužnými plechy. Aby bylo možné za rubem ostění provést injektáž, nachází se v ní injektážní otvory. Konstrukční detaily jsou takové, aby byla zajištěna snadná a rychlá montáž prostupu [1].

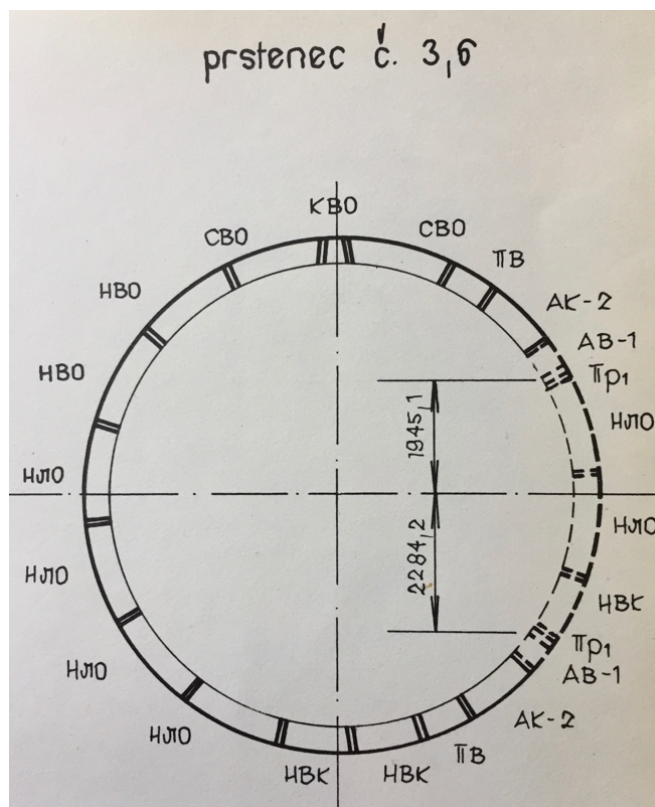
4.3 Prostupy v litinovém ostění \varnothing 5,6/6,0 m

Světlá velikost prostupů v tomto typu ostění je nejčastěji těchto rozměrů: 3,6x3,0 m; 3,0x3,0 m; 1,8x2,1 m; 0,7x0,7 m. Konstrukce a konstrukční detaily se řeší podle stejných zásad jako u litinového ostění \varnothing 5,1/5,5 m, které jsou popsány v kapitolách 2.2.1 a 2.2.2 [1].

4.4 Prostupy v litinovém ostění \varnothing 7,8/8,5 m

Velikost prostupů v tomto typu ostění vychází z rozměrů vyráběných rámu a litinových tubingů. Jedná se buďto o takzvaný nízký nebo vysoký rám. Menší prostupy jsou řešeny individuálně podle konkrétních požadavků.

Světlá šířka rámu je $4 \times 0,75 \text{ m}$ (šířka segmentu ostění) = 3,0 m nebo $5 \times 0,75 \text{ m} = 3,75 \text{ m}$. Pomocí vkládání potřebného počtu a druhu tubingů mezi horní a dolní klenbu rámu je možné dosáhnout variabilní výšky prostupu. Zároveň musí být upraven klad tubingů v následujících prstencích rámu. Velikost rámu je odvislá od technologický, provozních a architektonických požadavků [1].

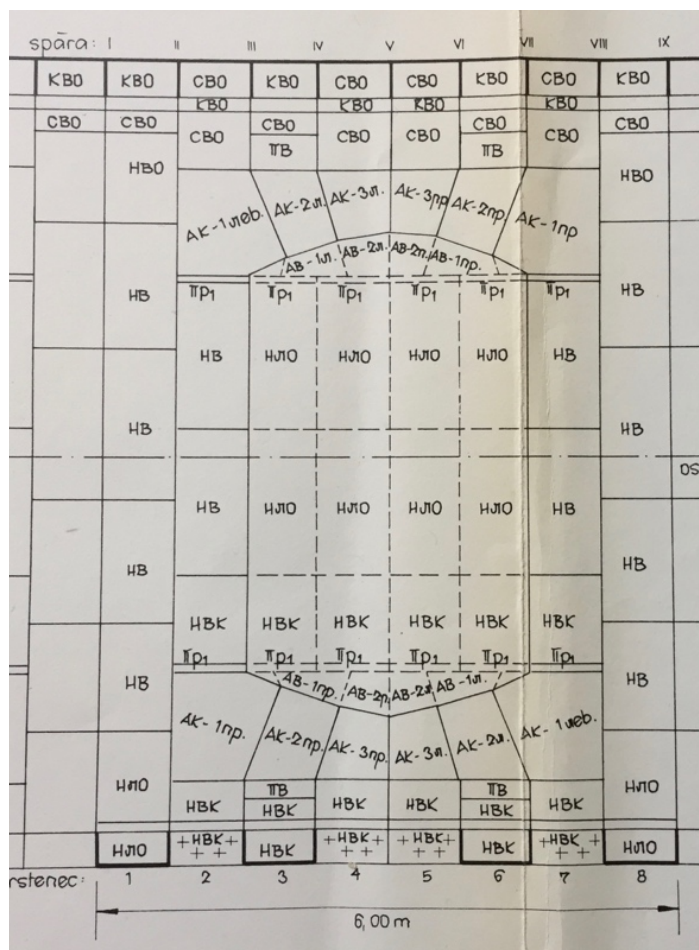


Obrázek 4.3 - řez třetím a šestým prstencem konstrukce nízkého rámu ze speciálních litinových segmentů ostění \varnothing 7,8/8,5 m [1]

Konstrukce prostupu

Rám prostupu je tvořen speciálními litinovými tubingy a nejčastěji je široký 3,0 m. Dělá se ve dvou variantách nízký nebo vysoký.

Nízký rám se skládá z horní a dolní klenby a jeho rozměry jsou 300 x 422,9 cm. Klenba je složena z těchto tubingů: 2 x AK-1 lev; 2 x AK-1pr; 2 x AK-2 lev; 2 x AK-2 pr; 2 x AK-3 lev; 2 x AK-3 pr. Další část rámu je tvořena tubingy v opěrné části prstenců mezi dolní a horní klenbou. Jsou zde: 4 ks 85-NV; 2 ks 85-NVK; 4 ks litinové vložky 85 PR-1.



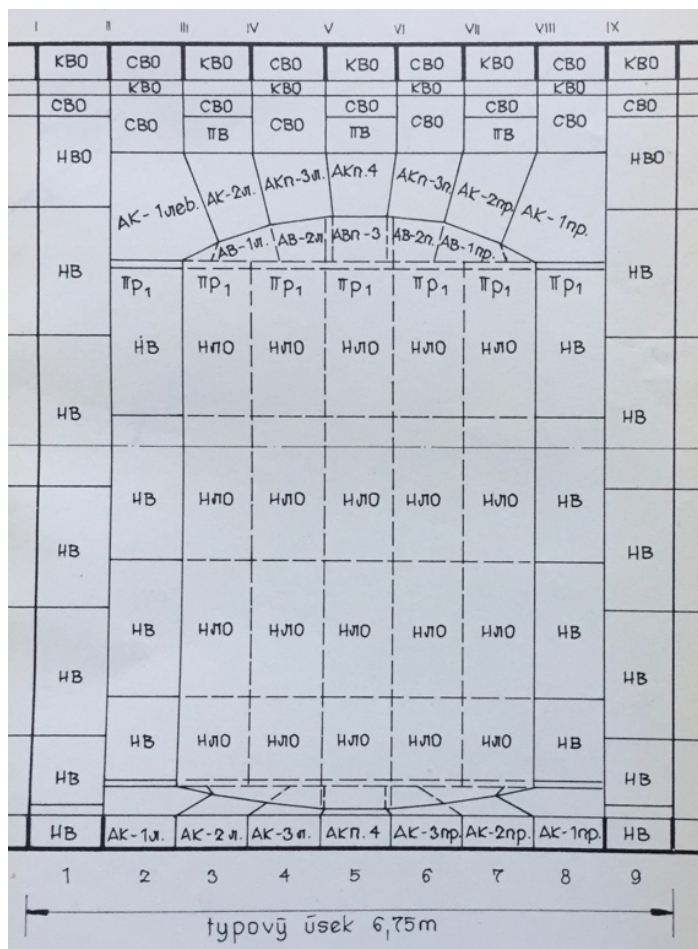
Obrázek 4.4 - pohled na nízký rám v litinovém ostění $\varnothing 7,8/8,5$ m pro šířku prostupu 3 m [1]

Vysoký rám má rozměr 300 x 554,8 cm a od nízkého rámu se liší pouze počtem tubingů v opěrné části prstenců mezi horní a dolní klenbou. Zde se nachází: 8 ks 85-NV a 4 ks litinových vložek 85 PR-1.

V místě budoucího prostupu je takzvaná dočasná část rámu, která se skládá z výplňových tubingů. Nad spodní a pod horní klenbou jsou 2 ks AV-1 lev, 2 ks AV-1 pr, 2 ks AV-2 lev a 2 ks AV-2 pr, které slouží k vyrovnání zalomených hran klenb rámu. Dále jsou na každé straně čtyři litinové vložky 85 PR-1. Mezi vložkami jsou 4 ks NVK tubingů a 8 ks 85-NLO u nízkého rámu, potažmo 16 ks 85-NLO u vysokého rámu. Ložné spáry dočasných tubingů jsou u obou rámu průběžné.

Varianta o šířce rámu prostupu 3,75 m má klenby z těchto tubingů: 2 x AK-1 lev; 2 x AK-1 pr; 2 x AK-2 lev; 2 x AK-2 pr; 2 x AKP-3 lev; 2 x AKP-3 pr; 2 x AKP-4. Pilířové prstence jsou shodné jako u rámu šířky 3,0 m popsaného výše. Jako výplňové tubingy jsou použity tyto typy: 2 x AV-1 lev; 2 x AV-1 pr; 2 x AV-2 lev; 2 x AV-2 pr; 2

Rozevírání segmentového ostění tunelů městské podzemní dráhy Štěpán Weiss
x AVP-3. Ostatní tubingy jsou shodné a liší se pouze počtem oproti rámu šířky 3,0 m [1].



Obrázek 4.5 - pohled na vysoký rám v litinovém ostění $\varnothing 7,8/8,5$ m pro šířku prostupu 3,75 m [1]

4.5 Prostupy v litinovém ostění $\varnothing 8,8/9,5$ m

Tento typ ostění je používán minimálně. Jedním z případů kde je využit, jsou sloupové stanice se středním rozšířeným tunelem. Prostupy jsou realizovány pomocí tvarových tubingů $\varnothing 8,5$ -AK, u kterých je však nutné upravit vrtání otvorů ve společné spáře podle tubingů AK [1].

4.6 Prostupy v železobetonovém ostění $\varnothing 5,1/5,5$ m

V tomto ostění jsou prostupy pro napojení hygienických buněk, vzduchotechnických zařízení, odvodňovacích jámek apod. použity pouze v nezbytných případech. V případě, že je při výstavbě vstup potřeba narušit více než dva prstence ostění, je vhodné v traťovém tunelu předem osadit potřebný počet z litinových tubingů $\varnothing 5,1/5,5$ m.

Konstrukce prostupu

Konstrukce prostupů se skládá z ocelových příčlí a stojek. Příčle je ze svařovaných nebo válcovaných profilů. Stojky jsou navrženy ze dvou U profilů přivařených k sobě a zároveň jsou po celé délce kotveny šrouby 3 \varnothing 20 mm/ m. Celá konstrukce je následně obetonována betonem vyztuženým svařovanou sítí.

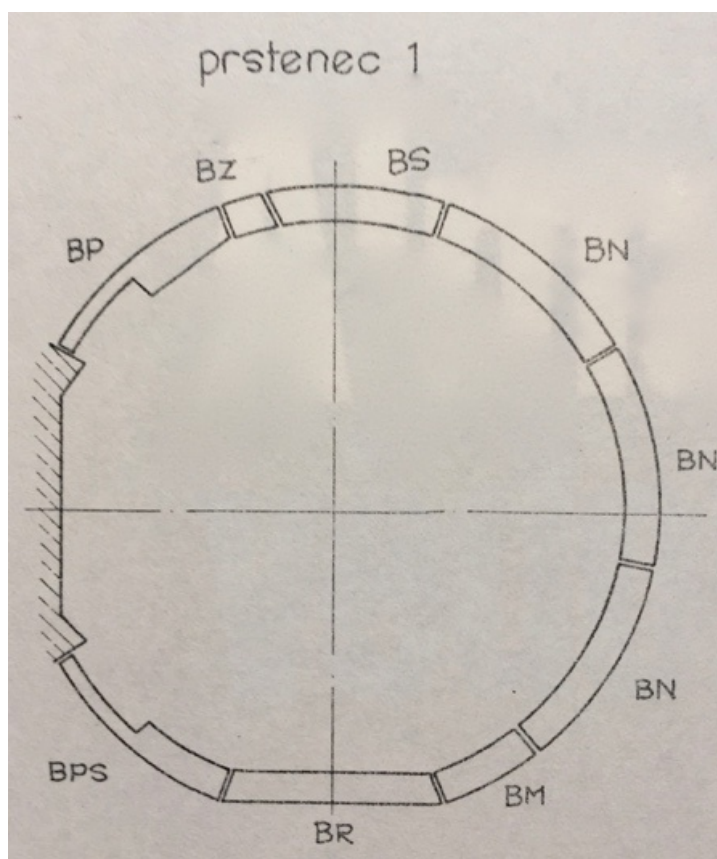
Konstrukční detaily

Ložné plochy dílců ostění jsou uloženy do válcovaného U profilu, který je vyplněn rozpínavým cementem. Stojka je připojena k příčli montážním stykem [1].

4.7 Prostupy v železobetonovém ostění \varnothing 7,8/8,8 m

V tomto ostění jsou prostupy nejčastěji budovány za účelem propojení staničních a technologických tunel, staničních a traťových tunelů a pro napojení měření.

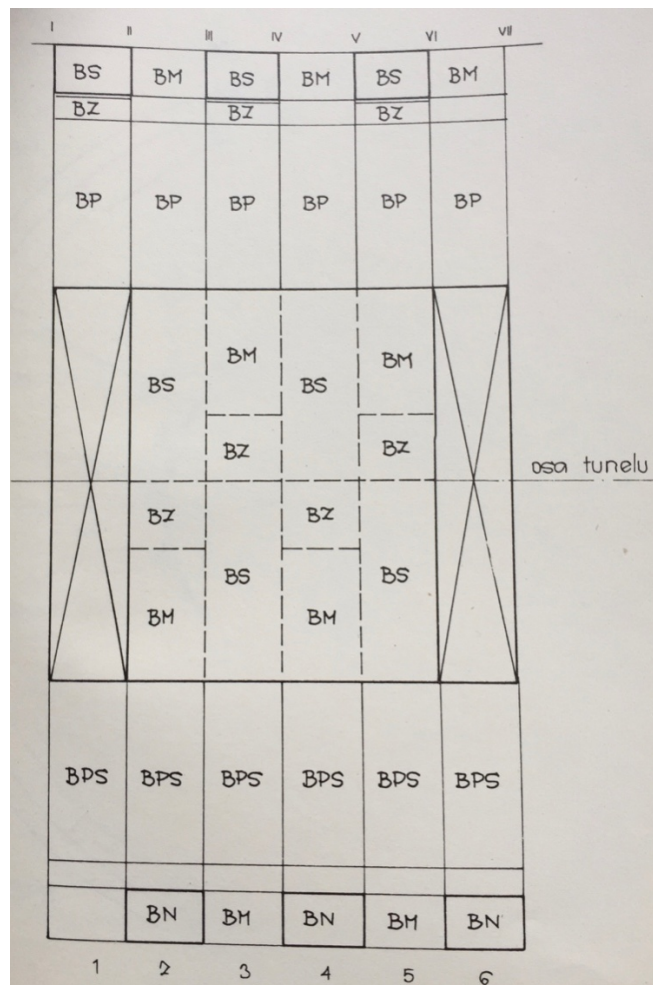
Světlé rozměry prostupu jsou poté nejčastěji rozměrů: 3,0x3,9 m; 1,6x2,1 m; 1,8x2,1 m; 1,0x0,9 m.



Obrázek 4.6 - řez první prstencem konstrukce rámu prostupu v železobetonovém \varnothing 7,8/8,5 m [1]

Konstrukce prostupu

Ve stanicích je konstrukce prostupů složena z pilířů a průvlaků, které se opírají do segmentů ostění BP. Pilíře jsou betonovány do ztraceného ocelového bednění, které se osadilo během výstavby ostění tunelu, nebo jsou pilíře montovány z předem vyrobených dílců. V místě prostupu jsou dočasně vloženy dílce, které jsou demontovány po zabudování monolitických či prefabrikovaných průvlaků. Konstrukce prostupu z železobetonových dílců je převážně řešena unifikovaně a jsou použity jednotné prefabrikované dílce. V případě, že je navržen užší prostup než 3,0 m, je doporučeno použít upravenou konstrukci s monolitickým železobetonovým průvlakem [1].



Obrázek 4.7 - pohled na konstrukci rámu pro prostup v železobetonovém ostění $\varnothing 7,8/8,8$ m [1]

5 Současné systémy zajištění prostupů

5.1 Ocelové rámy

Před zahájením úmyslného rozevírání segmentového ostění traťových tunelů za účelem realizace tunelové propojky, je nezbytné v obou tunelech nainstalovat rozpěrný ocelový rám, který zajistí stabilitu několika přerušených prstenců ostění [8].



Obrázek 5.1 - kruhový rozpěrný rám - prodloužení linky metra A [9]

5.1.1 Kruhový rám

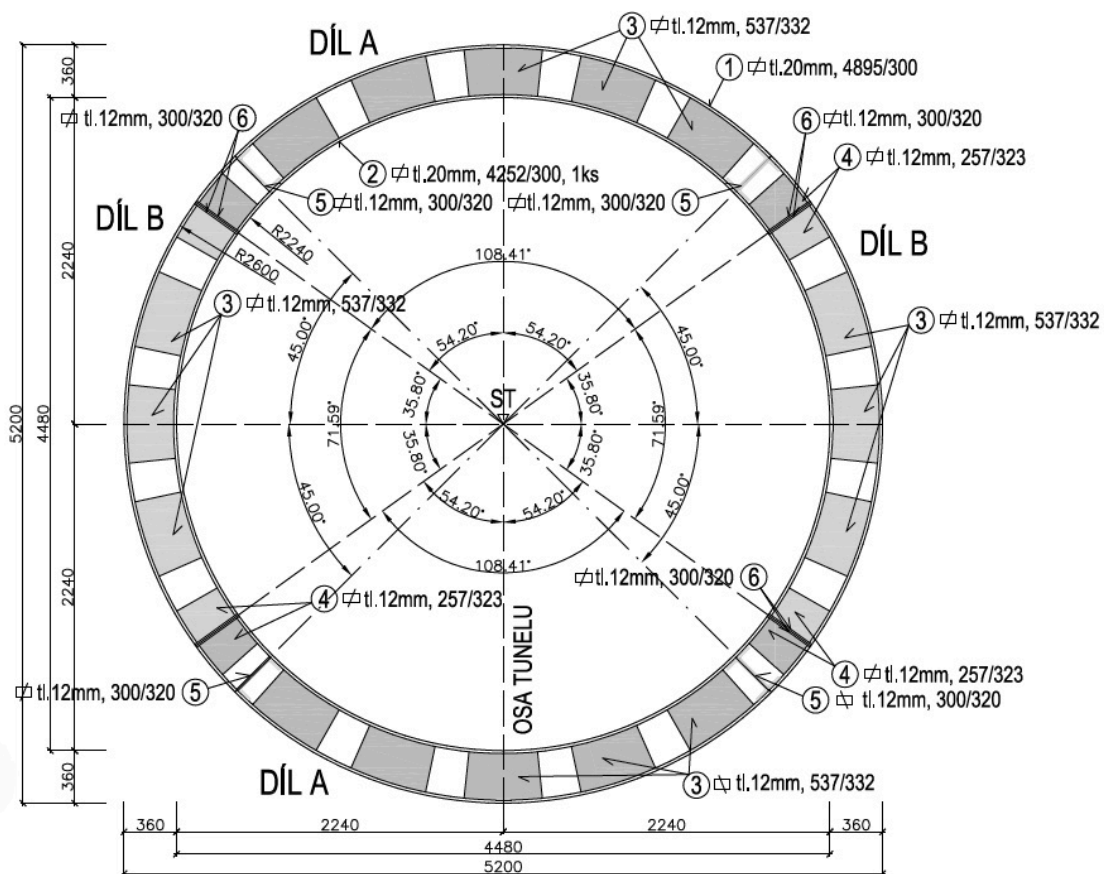
Konstrukce je tvořena dvěma kruhovými rámy o průměru téměř shodném se světlým průměrem traťového tunelu. Rámy jsou umístěny před a za plánovaným otvorem v ostění a jsou k nim přichyceny čtyři podélné nosníky, které plní podpěrnou funkci dílců ostění v místě budoucího prostupu. Rámy a podpěrné nosníky musí být po montáživyklínovány dřevěnými klíny, čímž dojde k aktivování vůči prstencům segmentového ostění. Kruhové ocelové rámy se umístí vně od budoucího prostupu přibližně 100 mm od styčné spáry prstenců. Zatímco podélné podpěrné rámy jsou pod a nad budoucím prostupem odsazeny přibližně o 300 mm [8].

Projekt – Prodloužení trasy metra A v Praze

Kruhový ocelový rám byl použit při výstavbě propojek mezi traťovými tunely na nově vzniklém úseku prodloužení pražského metra linky A.

Při výstavbě tohoto úseku byl použit mechanizovaný zeminový štít EPB s řeznou hlavou průměru 6,08 m. Ostění je vybudováno z prefabrikovaných železobetonových segmentů, kde jeden prstenec je složen z pěti standardních segmentů a jednoho klínového, který prstenec uzavírá. Světlý průměr traťového tunelu je 5,3 m a tloušťka ostění je 250 mm. Zbýlý prostor mezi ostěním a výrubem je zaplněn dvousložkovou injektáží.

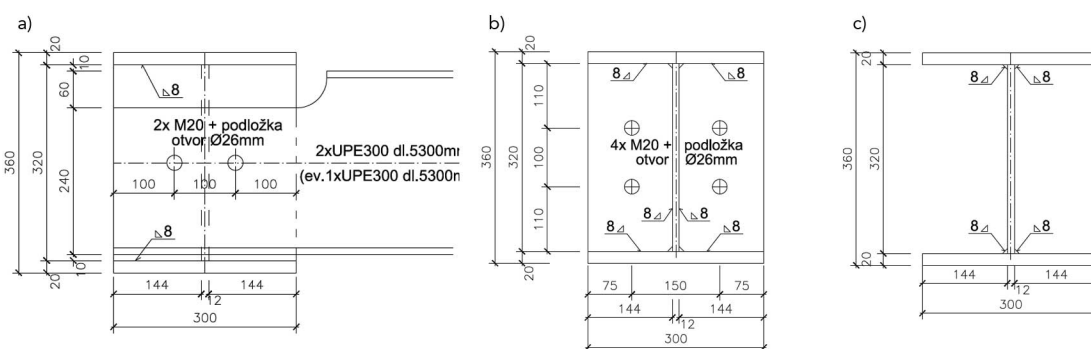
Propojky jsou na celém úseku projektovány přibližně po 200 m a jsou navrženy tak, aby snižovaly pístový efekt od projíždějících vlaků a zároveň, aby sloužili k evakuaci v případě havárie. Přesná poloha jednotlivých propojek byla navržena v závislosti na skladbě segmentového ostění [10].



Obrázek s5.2 - výkres kruhového rozpěrného rámu [8.]

Před zahájením ražby propojky byla na místě budoucí propojky nainstalována dvojice rozpěrných kruhových ocelových rámu s vnějším průměrem 5200 mm.

Jeden rám se skládal ze čtyř dílů. Dvou dílů s označením A (horní, dolní) a dvou bočních dílů s označením B. Příčný průřez jednotlivých dílů byl tvaru I rozměrů 300 x 360 mm (šířka x výška). Jednotlivé díly rámu byly svařovány z plechů. Pásnice byly z plechů tloušťky 20 mm a stojina byla navržena z jednotlivých plechů tloušťky 12 mm, které jsou mezerovitě odsazený. Na každém konci dílu byly čelní plechy, přes které byl proveden montážní styk mezi jednotlivými díly. Dále byly v rámech přivařeny příčné výztuhy a to v místech montážních styků rámu a podélného nosníku, ke kterým se podélníky přišroubovaly.



Obrázek 5.3 - a) napojení podélníku; b) čelní plech rámu; c) příčný řez rámu [8]

Jako podélné podpěrné nosníky byly použity válcované profily UPE 300 o délce 5300 mm. Podélné podpěry nad a pod prostupem byly navrženy dvojicí UPE profilů stojinami k sobě a ve třetinách rozpětí byly přes ocelovou podložku sešroubovány. Na straně od prostupu byly instalovány pouze jednotlivé UPE profily. Po montáži kruhového rámu a podélných podpěrných nosníků bylo potřeba konstrukci vyklínovat, aby byl rám aktivován vůči ostění. Celá konstrukce byla navržena z oceli S235 a montážní spoje byly provedeny pomocí šroubů M20 – 8.8..

Jakmile byly podpěrné konstrukce nainstalovány a vyklínovány v obou tunelových troubách, bylo možné začít vybourávat požadovaný prostup. Výška prostupu byla navržena 1348 mm nad osu tunelu a 1493 mm pod osu tunelu, tedy celková výška činí 2841 mm. Šířka prostupu byla navržena na 3 prstence, tudíž se šířka pohybovala v rozmezí 4455 mm až 4545 mm v závislosti na skladbě prstenců. Realizace dolní a horní hrany prostupu lze odvrátat pomocí jádrových vrtů či proříznout diamantovou kotoučovou pilou [8].



Obrázek 5.4 - kruhový rám - ražba propojky [11]

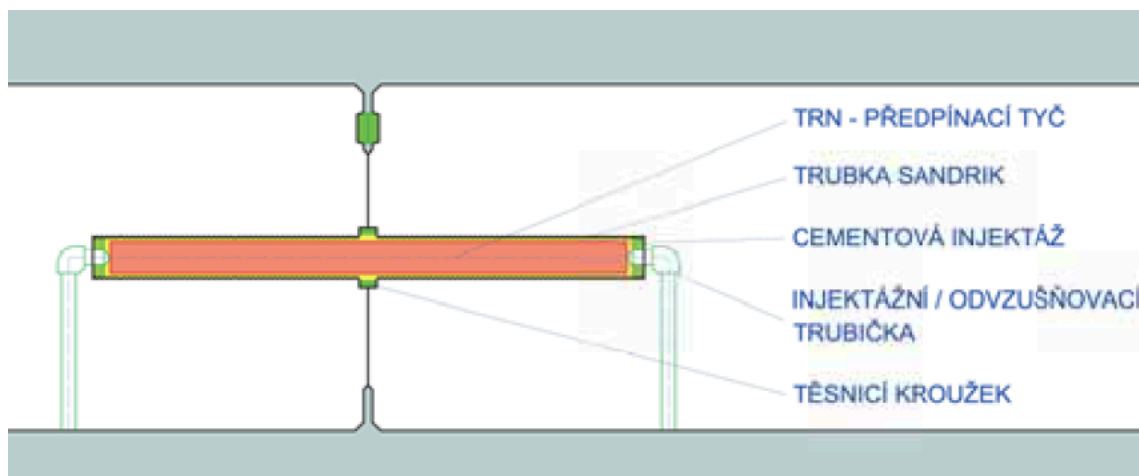
5.2 Speciální segmenty

Tato varianta je založena na principu, že jednotlivé prstence ostění jsou vzájemně propojeny a segmenty jsou schopny přenést zatížení od zemního či horninového tlaku i v případě, že je několik prstenců přerušeno výlomem potřebným k realizaci propojky či jiného objektu. Prstence mohou být například propojeny pomocí ocelových kapes, které jsou zabetonovány do segmentů a díky tomu je možné sousední prstence propojit ocelovými šrouby. Další variantou jsou segmenty, které jsou spojeny pomocí zainjektovaných ocelových trnů[12].

5.2.1 Segmenty spojované trny

Níže popsaný princip zajištění prostupu v segmentovém ostění je patentován firmou Metrostav, a. s..

Segmenty v místě budoucí propojky jsou navrženy tak, že vždy v sousedních segmentech se nacházejí na sebe navazující kanálky, které umožňují, po osazení segmentů do ostění, uložit a následně zainjektovat trny. Zatvrdnutí injektážní směsi zajistí pevné propojení segmentů viz. následující obrázek[12].



Obrázek 5.5 - detail spojení segmentů pomocí zainjektovaného trnu [12]

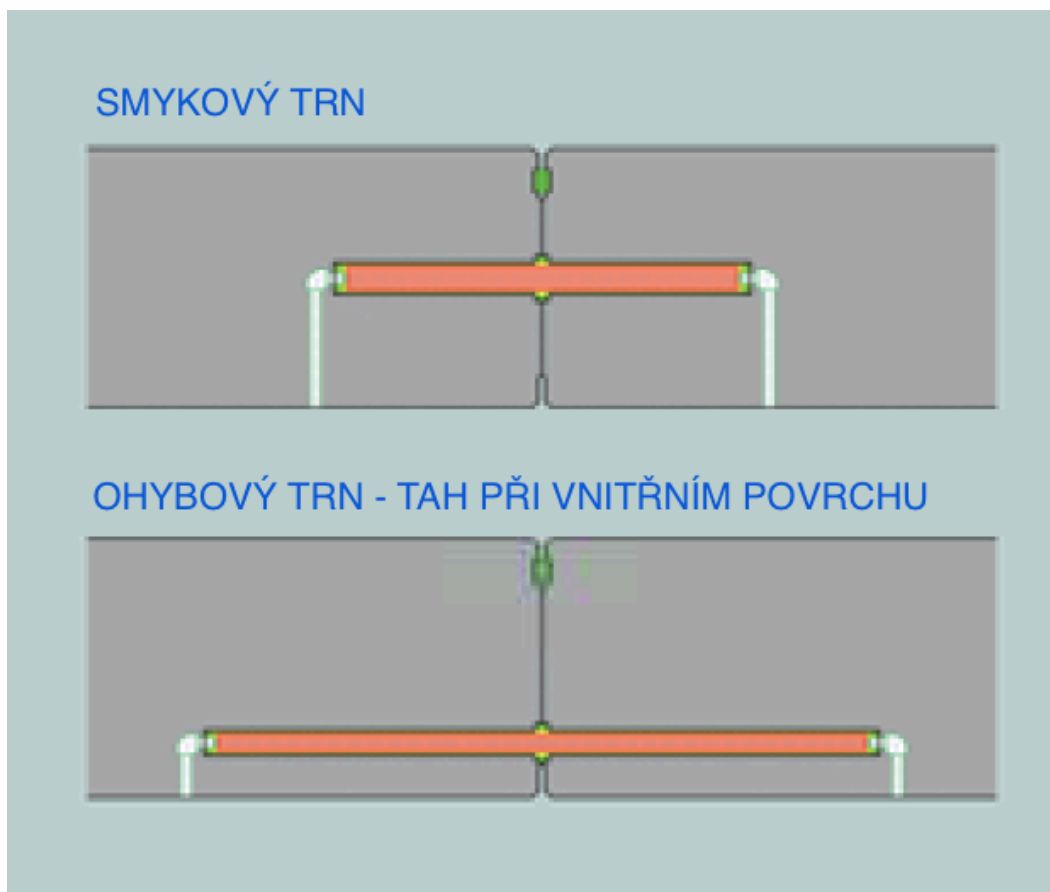
Aby byla zajištěna soudržnost kanálků s injektážní směsí a s betonem segmentu, jsou kanálky navrženy z tenkostěnných plechových trubek, které mají profilovaný povrch. Trny jsou navrženy buď ze standardní betonářské výztuže, nebo z vysokopevnostních předpínacích tyčí. Trny jsou vybaveny přípravky, které zajišťují centrální uložení v kanálku.

Injektáž se provádí pomocí trubiček, které jsou umístěny na koncích kanálku, a vede k vnitřnímu povrchu ostění. Do jedné z trubiček je vháněna injektážní hmota a z druhé je vytlačován vzduch. Injekční hmota je založena na cementové bázi, je shodná s hmotou, která se standardně používá pro vyplňování kanálků předpínacích kabelů, tudíž se jedná o dostupné a vyzkoušené složení[12].

Trny jsou navrženy tak, aby přenášely tahové nebo smykové namáhání. Ohybové trny jsou navrženy blíže k povrchu segmentu, kde je ostění namáháno ohybovými silami a to buď k vnějšímu, nebo k vnitřnímu. Tlakové namáhání se přeneso kontaktem betonových ploch mezi segmenty.

Jak je patrné z obrázku 5.6, ohybové trny jsou oproti smykovým delší, aby byla zajištěna požadovaná přesahová délka a trn správně přenášel zatížení do tahové výztuže segmentu. Čímž by mělo být zajištěno, že v mezním stavu únosnosti nedojde k vytržení trnu z kanálku, ale k jeho přetržení.

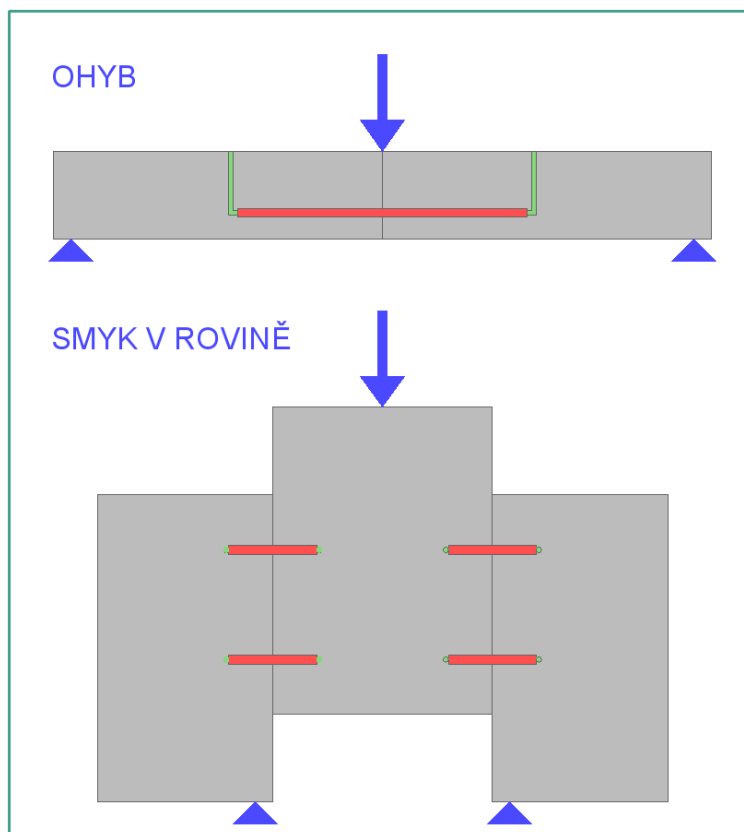
Smykové trny jsou kratší, jelikož se síly přenáší tzv. hmoždinkovým efektem a jsou umístěny ve středu segmentu (Obrázek 5.6). Dále je důležité, aby bylo okolí trnu řádně vyztuženo smykovou výztuží. Smykové trny přenášejí osově síly působící v ostění a příčné síly působící kolmo na ostění [12].



Obrázek 5.6 - typický tvar smykových a ohybových trnů [12]

Mezi segmenty je vkládáno více trnů, a proto trny nejsou v segmentech předem fixovány. Pokud by tomu tak nebylo, bylo by velmi komplikované následující segment k tomu předchozímu přesně osadit a trny zasadit do kanálků. Z tohoto důvodu se trny do segmentů vkládají zcela volně. Následující montovaný segment se přiblíží k volným koncům trnů, které se povytažením z již namontovaného segmentu vloží do kanálků právě montovaného segmentu. Poté je již možné montovaný segment přitlačit k předchozímu prstenci a provést injektáž trnů.

Zajištění prostupu pomocí trnů je pouze dočasné, aby trny mohly zatížení přenášet trvale, bylo by potřeba trny vhodným způsobem zabezpečit proti korozi. Trvalé zajištění prostupu je v tomto případě uvažováno pomocí železobetonového rámu (tzv. límce, collaru), který se vybuduje na vnějším líci ostění [12].



Obrázek 5.7 - statické schéma namáhání trnů [12]

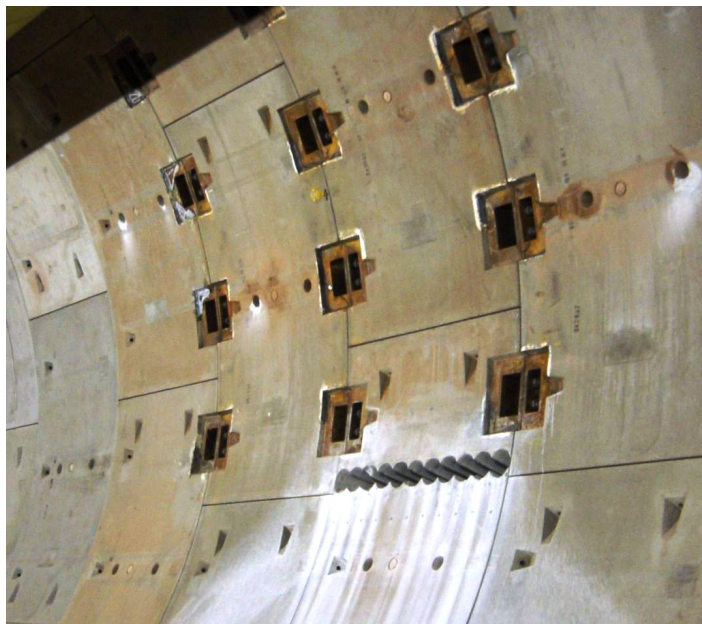
5.2.2 Segmenty spojené ocelovými kapsami

Jedná se o systém segmentů patentovaný firmou HOCHTIEF, kdy jsou segmenty nad a pod budoucím prostupem sešroubovány přes ocelové kapsy, které jsou osazeny v železobetonových segmentech. Princip funguje obdobně jako systém popsáný výše. Pomocí těchto segmentů s ocelovými kapsami se kolem budoucího prostupu vytvoří tuhý rám, ze kterého je možné odstranit vnitřní segmenty bez dodatečného zajištění tunelového ostění. Takto sešroubované segmenty zachytí normálové síly nad i pod vzniklým otvorem a přenesou je do bočních neporušených prstenců. Tyto segmenty je možné použít nejen v místech budoucích propojek, ale také v případě, že je nutné zvětšit stabilitu ostění, jelikož stabilita běžného systému je nedostatečná. Například ve špatných geologických podmínkách nebo v případě, že je ražba prováděna velmi mělce pod stávající zástavbou a je potřeba eliminovat deformace.

Výroba a instalace segmentů s ocelovými kapsami

Segmenty se vyrábějí ve stejné prefa výrobě jako standardní segmenty, které jsou použity ke stavbě konkrétního tunelu a to z důvodu, aby segmenty byly co se tvarů

týká naprosto totožné. Kapsy jsou vyrobeny ze standardních ocelových plechů z běžné oceli typu S235JR nebo S355J2 a jsou přivařeny do armokoše segmentu. Hloubka kapsy je v rozmezí 50-70% tloušťky segmentu a má 4 až 6 otvorů, přes které se provádí sešroubování s přilehlým segmentem. Poloha kapes v segmentu závisí na systému segmentového ostění a na vzájemném pootáčení prstenců. Při výrobě jsou kladeny velmi vysoké nároky na přesné umístění kapes v segmentu a to z důvodu, aby bylo možné k sobě správně připojit následující segment a vytvořit tak požadovaný rám okolo budoucího otvoru v tunelovém ostění. Tolerance umístění kapes je $\pm 0,5$ mm.



Obrázek 5.8 - pohled na uložené segmenty s ocelovými kapsami v segmentovém ostění [13]

Spojení segmentů je provedeno pomocí šroubů a tudíž výsledná únosnost spoje závisí především na použitém počtu a typu šroubů. Kde se volí především průměr a pevnostní třída.

Tabulka 5.1 - únosnosti šroubových spojů v konkrétních segmentech [12]

Tloušťka segmentu [mm]	Beton	Maximální zatížení [kN]		Šroubový spoj		
		Radiální	Tangenciální	Počet kusů	Šroub	třída
450	C50/60	700	2000	6	M36	10.9
350	C50/60	300	1100	4	M36	8.8
350	C50/60	250	850	4	M30	10.9

Kapsy musí být schopny přenést velká zatížení a musí být zajištěna dobrá soudržnost s železobetonem, aby nedošlo k vytržení kapsy ze segmentu. Kapsa je k armokoši přivařena a dále je vyztužení okolo kapsy zesíleno smykovou výztuží. Jelikož jsou armokoše těchto segmentů velmi husté, je potřeba s ohledem na to volit správnou betonovou směs, aby bylo dosaženo optimálního zhutnění a probetonování v okolí kapes, kde je vyztužení velmi husté.



Obrázek 5.9 - armokoš segmentu s ocelovými kapsami [14.]

Instalace těchto segmentů se provádí standardní způsobem, jako běžných segmentů. Jen je třeba dbát na přesné umístění, aby se segmenty sešroubovaly bez větších problémů. Optimální je instalovat tyto segmenty jako jedny z prvních v prstenci a ihned je přišroubovat k přilehlému prstenci, aby v případě deformace ostění nedošlo k nepříznivému posunutí segmentů a znemožnění provedení šroubového spoje. Poté co jsou nainstalovány všechny potřebné prstence v místě prostupu je možné začít se standardní demontáží segmentu v místě požadovaného prostupu. Segment je nutné ve většině případů nejprve odvrtnout pomocí jádrových vrtů nebo odříznout diamantovou pilou a poté je možné ho vybourat pneumatickým kladivem. Aby nebylo potřeba segment odřezávat, je možné v místě požadovaného otvoru nainstalovat segmenty přesně odpovídající velikosti otvoru, které bude

Rozevírání segmentového ostění tunelů městské podzemní dráhy Štěpán Weiss
snadné po smontování pomyslného rámu odstranit a vznikne požadovaný otvor. Výhodou této metody je, že okolo otvoru zůstane nepoškozený těsnící rám, který lze použít při následném utěsnění mezi traťovým tunelem a propojkou. Nevýhodou jsou však nutnost výroby dalšího typu segmentů. Rozhodnutí která z metod je výhodnější závisí vždy na konkrétních podmínkách projektu.



Obrázek 5.10 - demontáž segmentu v místě budoucí propojky [14]

Výpočtové modely

Numerické výpočty, které byly provedeny na předešlých projektech, byly realizovány 3D metodou konečných prvků a z nich následně byly určeny síly na které je nutné navrhnout šroubové spoje. Model bylo potřeba vytvořit tak, aby se choval co nejpřesněji a dával co nejrealnější výsledky. Ze zkušenosti se ukázalo, že je zapotřebí vymodelovat segmenty každý zvlášť a mezi nimi zvolit vhodnou interakci v podélných a příčných spárách. Dále byla vytvořen i 3D model kapsy [13].

5.2.3 Výhody a nevýhody

Největší výhodou těchto systémů zajištění je, že v místech výlomů není potřeba realizovat žádné podpůrné konstrukce, které by zasahovaly do tunelu a tím pádem

nikterak neomezují další stavební práce v tunelu. Spojení segmentů je jednoduché a zajišťuje se pomocí běžných a dostupných materiálů.

Nevýhodou je, že se musí vyrobit atypické segmenty a musí být zajištěna správná logistika segmentů, aby se dostaly na požadované místo, kde je projektována tunelová propojky, či jiný stavební objekt za segmentovým ostěním tunelu[12].

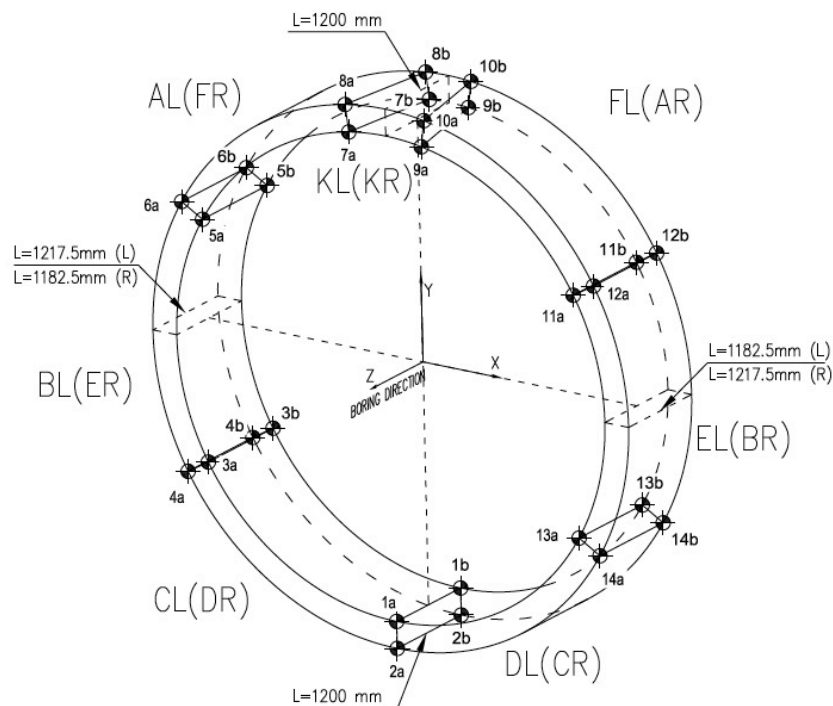
6 Navržený dočasný ocelový rám

6.1 Úvod

Pro výpočet jsem si vybral vnější ocelový rám, který byl použit při výstavbě tunelových propojek na fialové lince metra v Ázerbájdžánu v hlavním městě Baku. Linka se realizuje po etapách a celková délka má být přibližně 20 km a bude na ní 12 nových stanic. Prvotní plán byl, že se první úsek dokončí v roce 2015 a celá fialová linka by měla být postupně uváděna do provozu až do roku 2020. Nicméně tyto plány se změnilo po prudkém poklesu cen ropy a nyní jsou stavební práce pozastaveny.

Traťové tunely

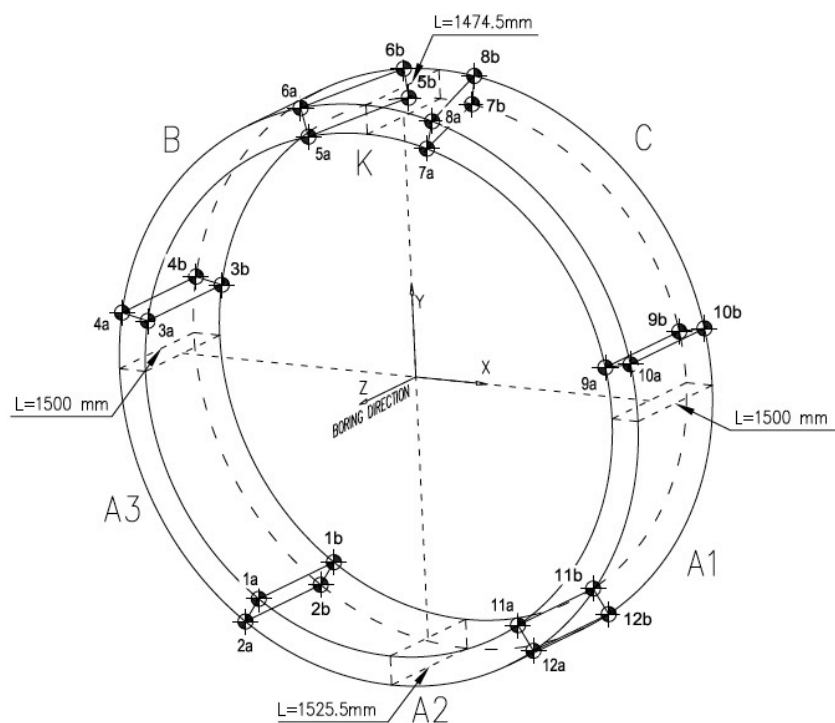
Traťové tunely jsou navrženy kruhového profilu o vnějším poloměru 3 m a ostění je navrženo z železobetonových segmentů tloušťky 300 mm. V každé tunelové trubě jsou použity odlišné segmenty, jelikož každý traťový tunel je ražen zeminovým štítem od jiného výrobce. Jedná se o velmi netradiční řešení, které s sebou nese jisté komplikace, například vyrábět odlišné segmenty pro každou tunelovou trubici a s tím spojenou logistiku na stavbě. Toto řešení vzešlo z politického rozhodnutí.



Obrázek 6.1 - skladba prstenců v západní tunelové trubě - stroj firmy Ribbins [7]

Východní tunelová trouba se razila strojem od výrobce „Robbins“ a západní pomocí stroje od výrobce „Herrenknecht“. Oba stroje jsou typu zeminový štít EPBS, které jsou vhodné do místních tuhých jíílů, ale obtížněji zvládají často přítomné vápencové lavice a zvodnělé pískovcové vrstvy pod hladinou podzemní vody. Prstence ostění ve východní tunelové troubě se skládají ze systému segmentů 5+1 a všechny prstence jsou shodně symetricky zkosené, jedná se o takzvaný univerzální prstenec. Oproti tomu ostění v západní tunelové troubě je ze systému skladby 6+1 a jsou použity dva druhy prstenců, které mají vždy jednu hranu svislou a druhou zkosenou, takzvaný systém s pravým a levým prstencem. Dále se segmenty liší umístěním nik pro spojování segmentů a délkou prstence. Délka prstence ve východní troubě je 1,5 m a v západní troubě 1,2 m. Šrouby mezi jednotlivými segmenty se uvažovaly pouze jako dočasné po dobu instalace ostění, než došlo k nárůstu pevnosti injektáže mezi segmentovým ostěním a zeminovým/ horninovým prostředím. Šrouby byly následně demontovány a použity při sestavování nového prstence. Vzdálenost pro demontáž šroubů se liší v závislosti na použité injektáži a v případě štítu Herrenknecht se šrouby demontují ve vzdálenosti cca 70 m za čelbou. Dále je nutné dodat, že tyto dočasné spojovací prvky byly ponechány v místě zavěšení pásového dopravníku, v místě propojek až do doby odstranění dočasného ocelového rámu a poté cca 10 m před a za stanicemi, kde jsou před dokončením traťových tunelů vyměněny za trvalé.

Oba tunelovací stroje umožňují přítlak na čelbu. Štít Herrenknecht dosahuje a 4,5 barů a štít Robbins až 5 barů. Přesto ražba ve značných hloubkách pod hladinou podzemní vody nebyla jednoduchá. Výkon strojů se průměrně pohyboval okolo 10-12 m za den a v případě složitých geologických podmínek byl výkon jen okolo 4 m. Dalším rozdílem mezi stroji je zajištění jejich obsluhy. Stroj Robbins bylo možné obsluhovat pouze kolejovou dopravou a to jak dopravu segmentu ke stroji, tak odvoz rubaniny od čelby. Oproti tomu stroj Herrenknecht používá pro dopravu segmentů na čelbu staveništní vlak, transport rubaniny zajišťují kontinuální dopravníkové pásy.



Obrázek 6.2 - skladba prstenců ve východní tunelové troubě - stroj firmy Herrenknecht [7]

Propojky a ventilační šachty

Vzhledem k tomu, že v roce 1995 došlo v Baku k největšímu požáru v historii podzemních drah na světě a zahynulo při něm téměř 300 lidí, je zde kladen velký důraz na požární bezpečnost při návrhu všech nově projektovaných linek metra. Znamená to návrh sofistikovaného bezpečnostního systému a veškeré technologické vybavení nového metra je navrženo z materiálu, které výrazně omezuje šíření ohně. Dále je nutné v případě požáru zajistit přívod velké množství čerstvého vzduchu a škodlivé zplodiny odvést ze systému metra co nejrychleji pryč. Navrhují se takzvané větrané úseky, které při intervalu 90 sekund mezi soupravami činní 1 km. Stanice v Baku jsou navrženy v rozmezí 1,5-2,5 km, je třeba navrhnout jednu až dvě mezilehlé ventilační šachty. Ventilační šachty a štolky jsou rozděleny na části určené pro vzduchotechniku a části určené pro pohyb obsluhy. Pasažérům je dovolen pohyb pouze skrz propojku, pomocí které mohou přejít do druhé tunelové trouby. Tunelové propojky jsou navrženy maximálně po 250 m, přičemž některé jsou přidruženy k ventilačním šachtám. Propojky byly navrženy a následně realizovány kruhového profilu o průměru výrubu 4,01 m a ražba byla prováděna metodou NRTM pobíráním na celý profil, s délkou záběru maximálně 1 m. Aby bylo

možné zahájit ražbu propojky, je nutné nejprve rozeprít segmentové ostění traťového tunelu pomocí dočasného ocelového rámu, který je umístěn na vnitřní straně segmentového ostění kolem budoucí propojky. Poté je možné segmenty rozebrat a zahájit ražbu metodou NRTM. Po výstavbě sekundárního ostění propojky a železobetonového límce, který je mezi propojkou a traťovým tunelem, je možné ocelový rám rozebrat a použít při výstavbě další propojky [15][16].

6.2 Popis návrhu a posouzení ocelového rámu

Tento rám byl navržen tak, aby byl univerzální pro všechny propojky na celé budované lince metra. Z podélného profilu trasy byly vybrány dvě propojky a to nejhluběji a nejměleji pod povrchem položené. Rám byl navržen na základě vnitřních sil, které vznikají v traťových tunelech, které je potřeba při porušení segmentového ostění přenést právě pomocí ocelového rámu.

Zatížení traťového tunelu bylo řešeno analytickou metodou, kdy se bere v potaz poloha tunelu, zdali se jedná o tunel mělce, středně hluboko či hluboko položený. Na základě tohoto rozdělení se určí, zda vznikne nad tunelem horninová klenba a jaké se následně uvažuje zatížení na ostění.

Tabulka 6.1 - Poloha tunelu v závislosti na horninové klenbě [16]

Podmínka	Typ tunelu - uložení
$H < B$	Mělký
$B < H < 2,5*B$	Středně hluboký
$H > 2,5*B$	Hluboký

Kde: H – hloubka koruny tunelu pod terénem,

B – šířka uvažované klenby, která se počítá dle vztahu:

$$B = 2 * R * \tan\left(\left(\frac{3*\pi}{8}\right) - \left(\frac{\varphi}{4}\right)\right) \quad (6.1)$$

kde: R – poloměr tunelu,

φ – úhel vnitřního tření.

Na základě uložení tunelu se počítá vertikální napětí p_v na primární a definitivní ostění dle níže uvedených vzorců.

Pro mělký tunel:

- primární ostění:

$$p_v = \frac{\gamma * B - 2 * c}{2 * \tan \varphi} * \left(1 - e^{-\frac{2 * H * \tan \varphi}{B}} \right) \quad (6.2)$$

- definitivní ostění:

$$p_v = \gamma * H. \quad (6.3)$$

Pro středně hluboký tunel:

- primární i definitivní ostění:

$$p_v = \gamma * B. \quad (6.4)$$

Pro hluboký tunel:

- primární i definitivní ostění:

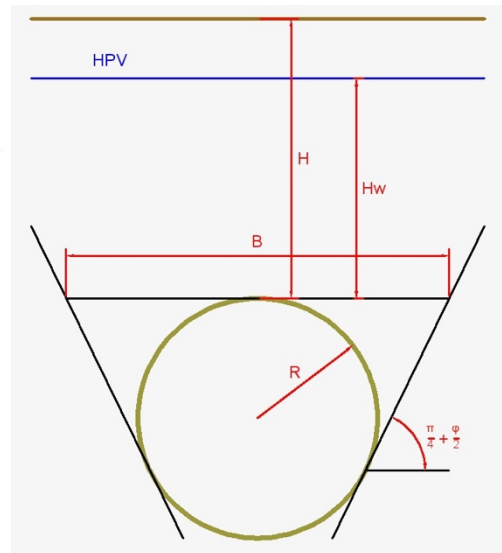
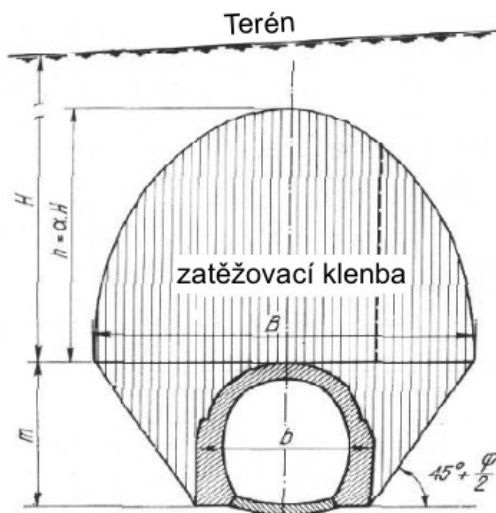
$$p_v = \frac{\gamma * B - 2 * c}{2 * \tan \varphi}, \quad (6.5)$$

kde: γ – objemová hmotnost,
 c – soudržnost,
 φ – úhel vnitřního tření,
 B - šířka uvažované klenby,
 H - hloubka koruny tunelu pod terénem.

Horizontální totální napětí p_h se spočte jako:

$$p_h = p_v * K_0, \quad (6.6)$$

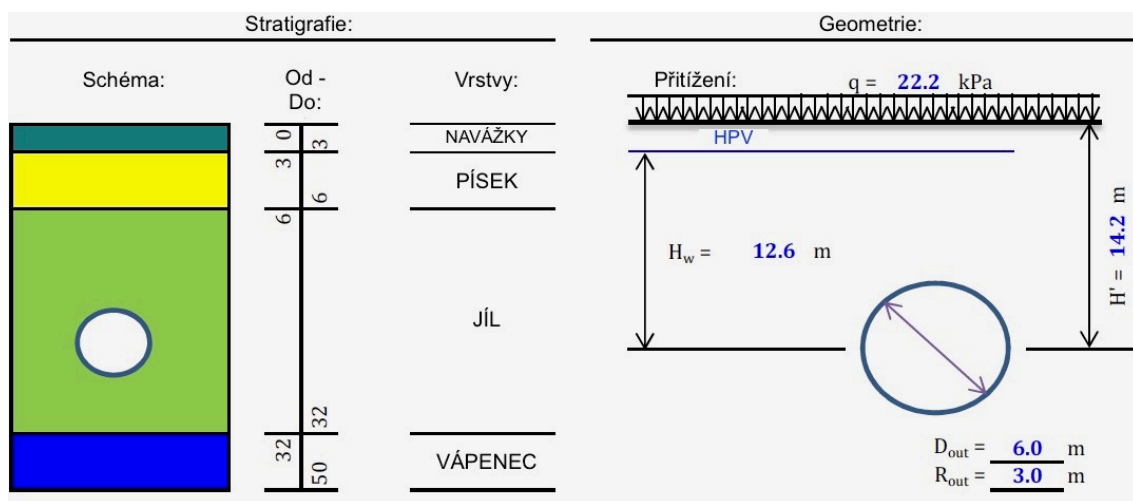
kde: p_v – vertikální totální napětí,
 K_0 – koeficient zemního tlaku v klidu, [16].



Obrázek 6.3 - schéma horninové klenby [16]

Mělká propojka

Tato propojka spojuje traťové tunely o vnějším průměru 6 m, jejichž osa se nachází přibližně 14,2 m pod povrchem terénu. V okolí propojky se nacházejí čtyři geologické vrstvy. Vrstva navážek mocnosti 2,5 m, následuje písčitá vrstva tloušťky 3,5 m a vrstva jílu, která se nachází v hloubce od 6 m do 32 m. Na vrstvu jílu navazuje vápenec. Podzemní voda se nachází v hloubce přibližně 1,6 m. Traťový tunel zasahuje celým svým průměrem pouze do jílové vrstvy. Na obrázku níže je schematicky znázorněna geometrie a poloha traťového tunelu včetně geologických vrstev. Geologické parametry jednotlivých vrstev jsou uvedeny v tabulce 4.



Obrázek 6.4 - Geologické schéma mělké propojky [17]

Při výpočtu vertikálního napětí se na základě výše zmíněných vzorečků a podmínek počítá s tím, že nevznikne žádná horninová klenba a definitivní ostění je zatíženo plnou tíhou nadloží.

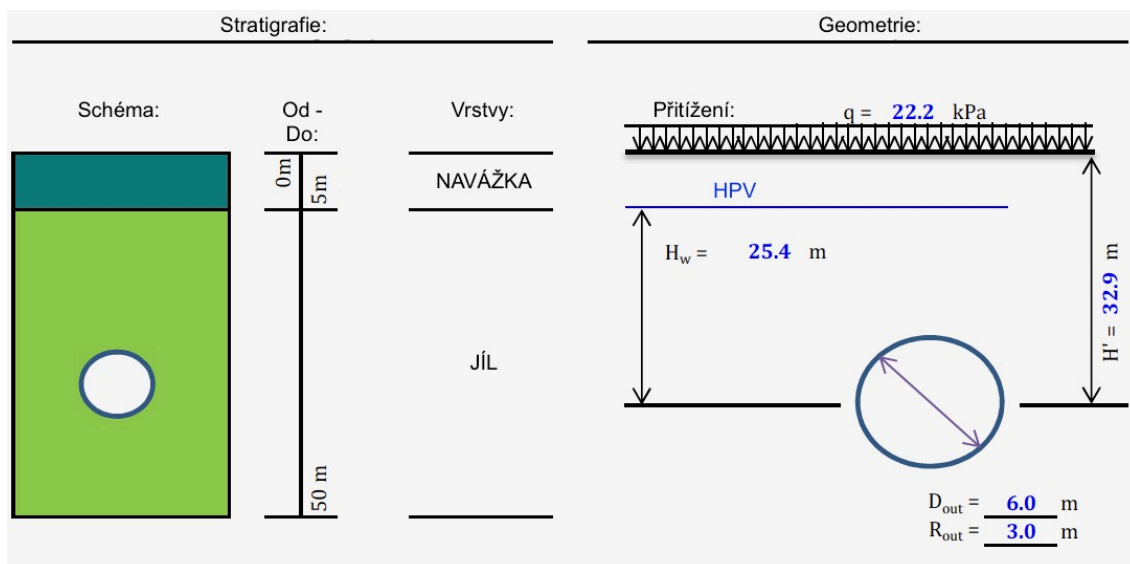
Výsledná napětí na ostění:

Vertikální totální napětí: $p_v = 306,2 \text{ kPa}$

Horizontální totální napětí: $p_h = 252,1 \text{ kPa}$, [17].

Hluboká propojka:

Hluboká propojka propojuje traťové tunely jejichž osa se nachází v hloubce 32,9 m a nacházejí se v geologickém prostředí, které se skládá pouze z vrstvy navážek o mocnosti 5 m a poté už je pouze vrstva jílu. Hladina podzemní vody je uvažována 7,5 m pod povrchem terénu. Traťový tunel se opět nachází celým svým průměrem v jílové vrstvě. Na obrázku níže je schematicky znázorněna geometrie traťového tunelu a geologický profil v jeho okolí. Geologické parametry vrstev jsou uvedeny v tabulce 4.



Obrázek 6.5 - Geologické schéma hluboké propojky [17]

V tomto případě platí podmínka $H > 2,5 \cdot B$, tudíž se jedná o hluboký tunel a uvažuje se, že vznikne horninová klenba a tudíž na ostění působí zatížení dle obrázku 6.4.

Výsledná napětí na ostění:

Vertikální totální napětí: $p_v = 276,7 \text{ kPa}$

Horizontální totální napětí: $p_h = 269,9 \text{ kPa}$, [17].

Tabulka 6.2 - Geologické parametry vrstev [17]

Č.	Vrstva	Geotechnické parametry									
		Od [m]	Do [m]	h [m]	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	φ' [°]	c' [kPa]	E' [MPa]	ν' [-]	K_0 [-]
1	Navážka	0,0	2,5	2,5	20	20	20	10	15	0,3	0,5
2	Písek	2,5	6,0	3,5	20	20	30	0	35	0,3	0,5
3	Jíl	6,0	32,0	26,0	20	20	22	10	50	0,15	0,7
4	Vápenec	32	50	18	20	20	35	50	150	0,25	0,5

h – mocnost vrstvy

γ – objemová tíha zeminy

γ_{sat} – objemová tíha zeminy plně nasycené vodou

φ' - úhel vnitřního tření – efektivní

c' - soudržnost – efektivní

E' - odvodněný modul pružnosti

ν' - Poissonovo číslo – efektivní

K_0 – koeficient zemního tlaku v klidu

Výpočet normálové síly v ostění

Normálové síly byly spočteny na základě následující analytických vzorců a výsledné síly v místě mělké i hluboké propojky jsou shrnuty v tabulce 6.3.

Průměrná normálová síla

- plná vazba i tangenciální skluz

$$N_{av} = \frac{(p_v + p_h) * R}{2 + \frac{p_v - p_h}{p_v} * \frac{2 * (1 - \nu)}{(1 - 2 * \nu) * (1 + \nu)} * \frac{E * R}{E_c * A}} \quad (6.7)$$

Proměnná normálová síla

- plná vazba

$$N_{var} = (p_v - p_h) * R * \frac{1 + \frac{1}{12 * (1 + \nu)} * \frac{E * R^3}{E_c * I_{eff}}}{2 + \frac{3 - 2 * \nu}{6 * (1 + \nu) * (3 - 4 * \nu)} * \frac{E * R^3}{E_c * I_{eff}}} \quad (6.8)$$

- tangenciální skluz

$$N_{var} = \frac{(p_v - p_h) * R}{\frac{10 - 12 * \nu}{3 - 4 * \nu} + \frac{2}{3 * (1 + \nu) * (3 - 4 * \nu)} * \frac{E * R^3}{E_c * I_{eff}}} \quad (6.9)$$

Kde: p_v – vertikální totální napětí,

p_h – horizontální totální napětí,

R – vnější poloměr ostění,

A - plocha řezu ostění,

E – modul pružnosti zeminy,

ν - poissonovo číslo zeminy,

E_c – modul pružnosti betonového ostění,

I_{eff} – efektivní moment setrvačnosti ostění, [17].

Plnou vazbou je myšleno, že ostění plně spolupůsobí se zeminou a prokluz mezi ostěním a zeminou se rovná nule. Zatímco v případě tangenciálního skluzu je umožněn plný prokluz mezi ostěním a zeminou.

Tabulka 6.3 - výsledné normálové síly v traťových tunelech, na základě analytického výpočtu [17]

Propojka	Výpočet	N_{av} [kN]	N_{var} [kN]	N_{min} [kN]	N_{max} [kN]
Mělká	Plná vazba	835,29	75,08	760,20	910,37

	Tangenciální skluz	835,29	17,35	817,93	852,64
Hluboká	Plná vazba	819,70	9,48	810,22	829,18
	Tangenciální skluz	819,70	2,18	817,51	821,89

Z tabulky 6.3 vyplývá, že větší normálová síla vznikne v mělčeji položeném traťovém tunel a právě tato sílu $N_{Ek} = 910,37$ kN byla použita pro návrh dočasného ocelového rám.

Návrhová normálová síla

$$N_{Ed} = N_{Ek} * \gamma_G \quad (6.10)$$

Kde: N_{Ed} – návrhová normálová síla,

N_{Ek} – charakteristická normálová síla,

γ_G – bezpečnostní součinitel zatížení, [staták rám].

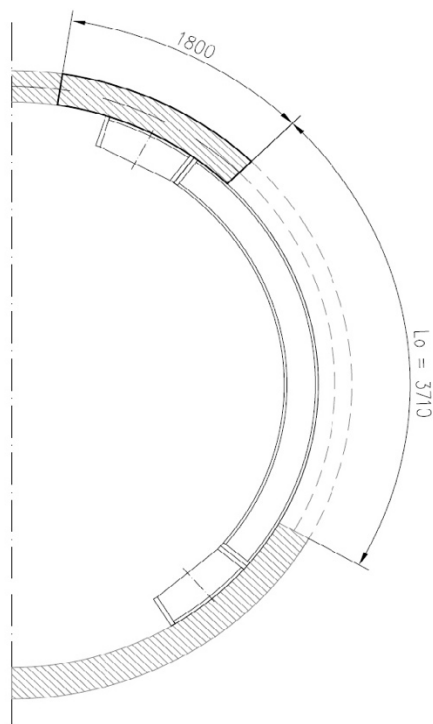
Tabulka 6.4 - návrhová normálová síla [17]

N_{Ek} [kN]	γ_G [-]	N_{Ed} [kN]
910,37	1,35	1229

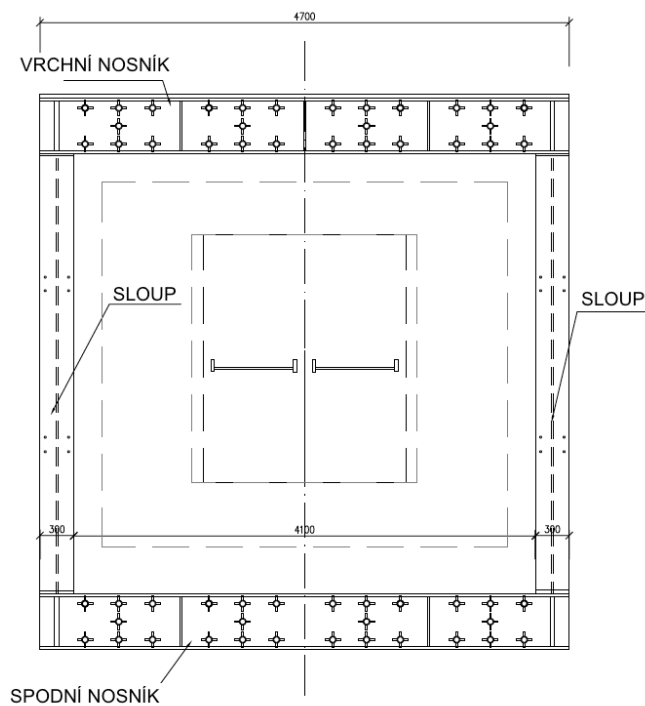
Geometrie navrženého rámu

Propojky jsou navrženy s vnitřním průměrem 3,1 m a tloušťka jak primární, tak sekundárního ostění je 250 mm. Z čehož vychází, že velikost výrubu musí být minimálně 4,1 m. Dalším požadavkem bylo osazení dveří o rozměru 2,1 x 1,8 m. Na základě těchto požadavků byly navrženy rozměry prostupu 3,6 x 3,6 m, které je nutné do segmentového ostění traťových tunelů vybourat.

Navržený rám se skládá ze dvou nosníků, vrchního a spodní, délky 4,7 m a mezi nimi jsou dva sloupy, které kopírují vnitřní poloměr segmentového ostění a jsou vsazeny mezi nosníky s nimiž jsou na jejichž koncích sešroubovány.



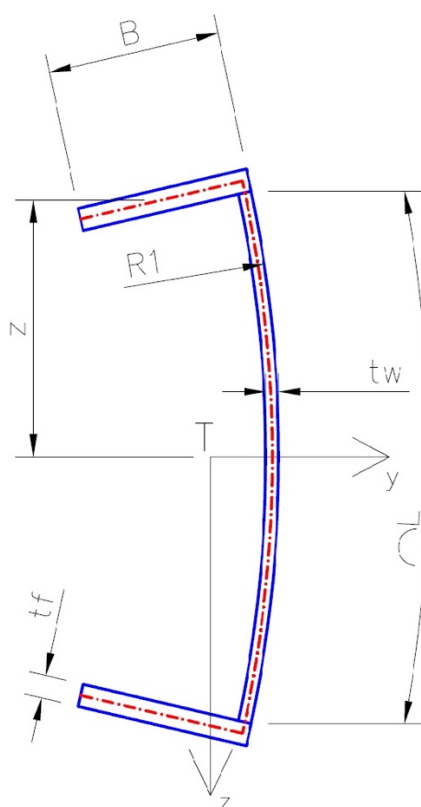
Obrázek 6.6 - schématický řez ocelovým rámem [17]



Obrázek 6.7 - schématický pohled na ocelový rám [18]

Nosníky jsou ze svařovaných profilů tvaru C, kde stojinu tvoří plech tloušťky 25 mm a pásnice jsou z plechu tloušťky 30 mm. Stojina je vysoká 500 mm a je zakřivená poloměrem $R = 2,7$ m, aby kopírovala vnitřní poloměr traťového tunelu. Šířka pásnic je 300 mm. Sloupy jsou taktéž ze svařovaných profilů, které tvoří příčný profil tvaru H. Stojina je z plechu o tloušťce 15 mm a je vysoká 260 mm. Pásnice jsou o 5 mm tlustší a jejich šířka je 300 mm. Přilehlá pásnice k ostění má vnější poloměr $R = 2700$ mm. Montážní spoj sloupu a nosníku je proveden přes čelní desku tloušťky 30 mm, která je přivařena ke sloupu a pásnici pomocí čtyř šroubů $\varnothing 20/100$ mm.

Parametry příčného řezu nosníku:

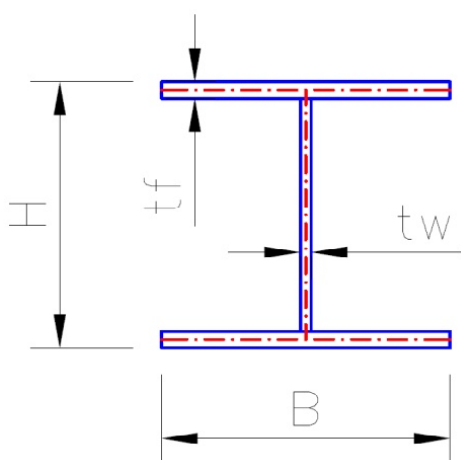


Geometrie:

$L = 0,50 \text{ m}$	délka stojiny
$B = 0,3 \text{ m}$	šířka pásnice
$R1 = 2,70 \text{ m}$	poloměr stojiny
$t_f = 0,030 \text{ m}$	tloušťka pásnice
$t_w = 0,025 \text{ m}$	tloušťka stojiny
$A = 0,030 \text{ m}^2$	plocha řezu
$A_v = 0,012 \text{ m}^2$	smyková plocha

Obrázek 6.8 - příčný řez nosníkem [17]

Parametry příčného řezu sloupu:



Geometrie:

$H = 0,30 \text{ m}$	výška řezu
$B = 0,30 \text{ m}$	šířka řezu
$t_f = 0,020 \text{ m}$	tloušťka pásnice
$t_w = 0,015 \text{ m}$	tloušťka stojiny
$A = 0,016 \text{ m}^2$	plocha řezu
$l = 4,1 \text{ m}$	délka sloupu

Obrázek 6.9 - příčný řez sloupem [17]

6.3 Použité materiály a jejich parametry

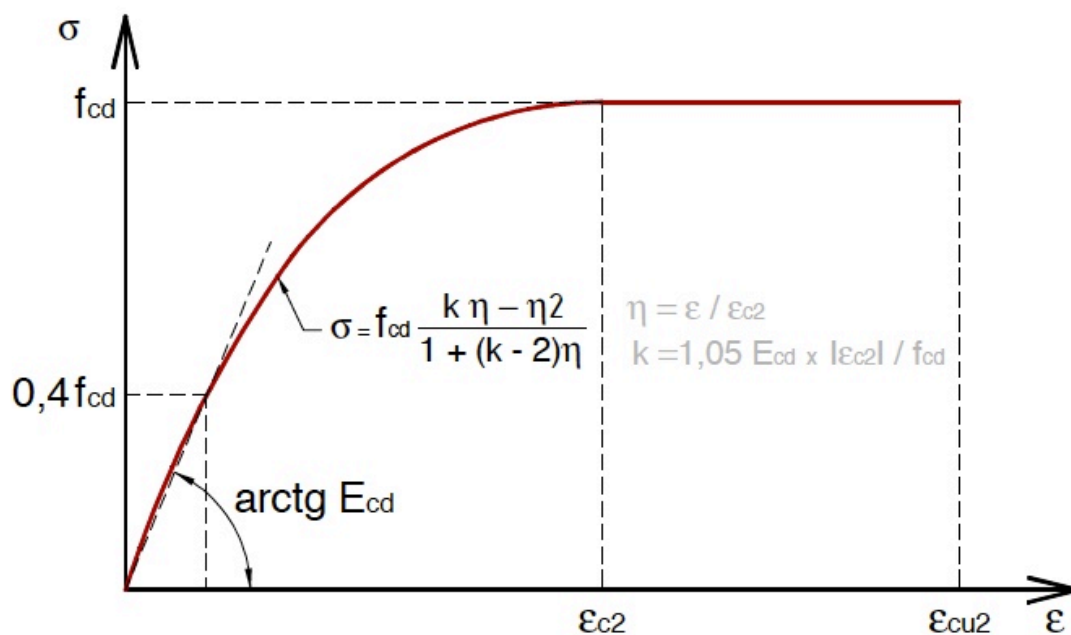
Segmenty traťových tunelů jsou železobetonové a jsou vyrobeny z beton C40/50 a výztuž tvoří standardní betonářská ocel B 500 B. Dočasný ocelový rám byl navržen z oceli typu S 355 [17].

Segmentové ostění

Beton C40/50

Tabulka 6.5 - Parametry betonu C40/50 [17]

Označení	hodnota	Jednotky	Popis
f_{ck}	40	MPa	tlaková pevnost
f_{tk}	2,5	MPa	tahová pevnost
E_c	35	GPa	modul pružnosti
$E_{c,eff}$	18,5	GPa	efektivní modul pružnosti
γ_c	1,5	-	bezpečnostní součinitel
$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	26,7	MPa	návrhová tlaková pevnost
$f_{td} = \alpha_{cc} * \frac{f_{tk}}{\gamma_c}$	1,7	MPa	návrhová tahová pevnost
λ	0,8	-	koeficienty napětí
η	1,0	-	koeficienty napětí
α_{cc}	1,0	-	součinitel dlouhodobých a nepříznivých účinků
$\gamma_{c,arcc}$	1,2	-	bezpečnostní součinitel - nahodilé zatížení



Obrázek 6.10 - pracovní diagram betonu [17]

Betonářská výztuž B 500 B

Tabulka 6.6- parametry betonářské oceli B 500 B [17]

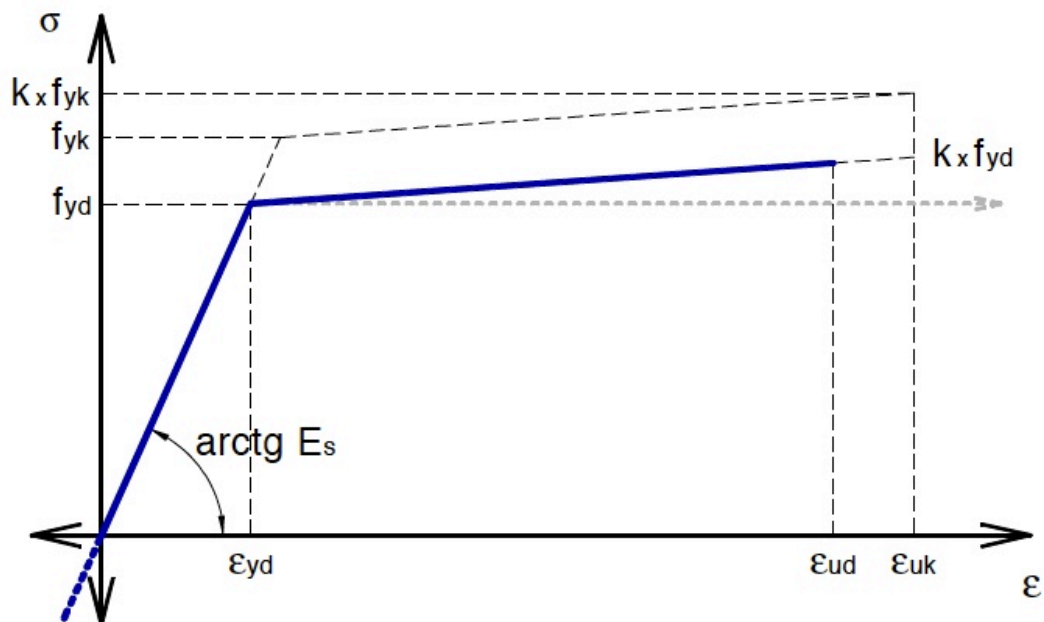
Označení	hodnota	Jednotky	Popis
f_{yk}	500	MPa	mez kluzu
γ_s	1,15	-	bezpečnostní součinitel
E_s	210	GPa	modul pružnosti
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	435	MPa	návrhová pevnost

Dočasný ocelový rám

Ocel S355

Tabulka 6.7- parametry oceli S355 del EN 1992-1-1 [17]

Označení	hodnota	Jednotky	Popis
f_{yk}	355	MPa	mez kluzu
γ_s	1,0	-	bezpečnostní součinitel
E_s	210	GPa	modul pružnosti
$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	355	MPa	návrhová pevnost



Obrázek 6.11 - pracovní diagram oceli [17]

7 Alternativní posouzení navrženého rámu








V této části popisuji mnou provedený postup posouzení výše popsaného ocelového rámu. K posouzení navrženého rámu jsem nejprve použil numerický 2D model rovinného přetvoření, který jsem vytvořil v programu PLAXIS 2D. Pomocí něhož jsem nasimuloval zeminové prostředí a jeho chování při jednotlivých stavebních fázích traťového tunelu a z nich plynoucích několik sad výsledků. Tímto způsobem jsem namodeloval obě dvě polohy traťových tunelů, jak pro mělce uloženou propojku (viz. Obrázek 6.4), tak pro hluboko uloženou propojku (viz. Obrázek 6.5). Hlavními výstupy z programu PLAXIS 2D jsou především působící napětí na ostění traťového tunelu od zemního tlaku, potažmo vodního tlaku. Z čehož dále plynou deformace konstrukce a vnitřní síly, které v konstrukci vznikají. Dále jsem vymodeloval 3D skořepinovo pružinkový model části traťového tunelu, včetně požadovaného otvoru s výše popsaným ocelovým rámem. Tento 3D model jsem vytvořil v programu SCIA Engineer a následně ho zatížil napětím, které jsem získal z programu PLAXIS 2D. Výsledky z programu SCIA Engineer jsou vnitřní síly působící v nosníku ocelového rámu. Na základě, kterých bylo možné určit, zda je nosník vyhovující, či nikoliv.

Veškeré výpočty jsou provedeny na základě požadavků, rozměrů a materiálových parametrů zmíněných v kapitolách 6.1, 6.2 a 6.3.

7.1 Rozvoj 2D modelů

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitola, v programu PLAXIS 2D jsem vymodeloval dva základní modely, pro mělký a pro hluboký tunel. Pro oba modely jsem udělal šestnáct variant výpočtů, které jsou shrnuty v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1 - variant výpočtů

Název výpočtu	Materiálový model	Metoda relaxace	Ostění	Legenda	
MC-VL-2,0-P	MC	VL	2,00%	plné	
MC-VL-2,0-R			redukované		
MC-VL-0,5-P		0,50%	plné		
MC-VL-0,5-R			redukované		
MC-Mst-0,1-1,0-P		Mst	0,1 - 1,0	plné	
MC-Mst-0,1-1,0-R				redukované	
MC-Mst-0,4-1,0-P	0,4 - 1,0		plné		

MC-Mst-0,4-1,0-R				redukováno	
MCC-VL-2,0-P	MCC	VL	2,00%	plné	
MCC-VL-2,0-R				redukováno	
MCC-VL-0,5-P			0,50%	plné	
MCC-VL-0,5-R				redukováno	
MCC-Mst-0,1-1,0-P		Mst	0,1 - 1,0	plné	
MCC-Mst-0,1-1,0-R				redukováno	
MCC-Mst-0,4-1,0-P			0,4 - 1,0	plné	
MCC-Mst-0,4-1,0-R				redukováno	

Materiálový model:

Nejprve jsem modely rozdělil podle použitých materiálových modelů. V prvním případě se jednalo o variantu, kdy bylo zeminové prostředí simulováno podle **Mohr-Coulombova (MC)** materiálového modelu a v druhém případě byl použit **Modifikovaný Cam-clay(MCC)** model. Jako vstupní parametry pro Mohr-Coulombův model byly pro jednotlivé geologické vrstvy uvažovány parametry viz. tabulka 6.2. V případě výpočtu s Modifikovaným Cam-clay materiálovým modelem byly pro jílovou vrstvu použity následující parametry (tabulka 7.2), které jsou převzaty z inženýrsko-geologické zprávy.

Tabulka 7.2 - parametry Modifikovaného Cam-clay modelu - vrstva Jílu [18]

Parametry MCC - Jíl	Hodnota [-]
λ - směrnice NCL (linie normální konsolidace)	0,0582
κ - směrnice linie bobtnání	0,00868
ν - Poissonovo číslo	0,15
e_0 - počáteční číslo pórovitosti	1,64
M_{CSL} - směrnice linie kritického stavu	1,027

Metody modelování relaxace prostředí

Relaxaci zeminy v okolí výrubu jsem do výpočtů 2D modelu zanesena pomocí dvou variant. První variantou je takzvaná metoda „**VolumeLoss**“ (**VL**), neboli ztráta objemu zeminy. Dále je možné relaxaci simulovat pomocí jednotlivých fází výstavby, které se v programu PLAXIS simulují přes funkci **Σ Mstage** (**Mst**).

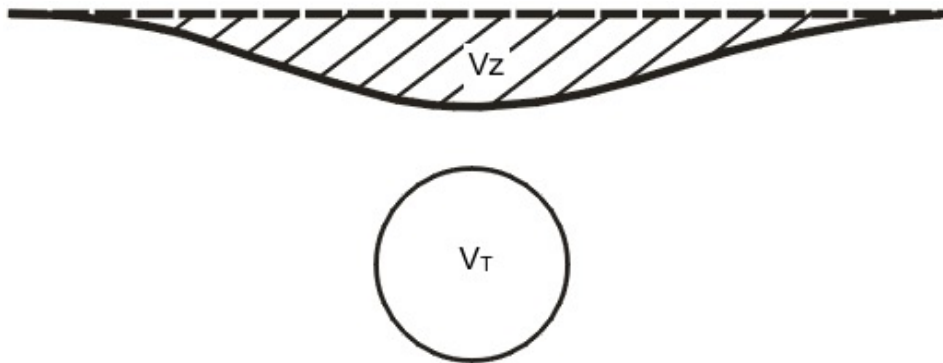
„VolumeLoss“ (VL)

Jako český ekvivalent pro toto označení se používá termín **ztráta objemu zeminy**. Jedná se o ukazatel kvality tunelování, který udává v % poměr „ztracené zeminy“ k teoretické ploše tunelového výrubu.

$$VL = \frac{V_z}{V_T} * 100 (\%) \quad (7.1)$$

Kde: V_z = objem ztracené zeminy

V_T = teoretická plocha/obsah tunelového výrubu, [3].

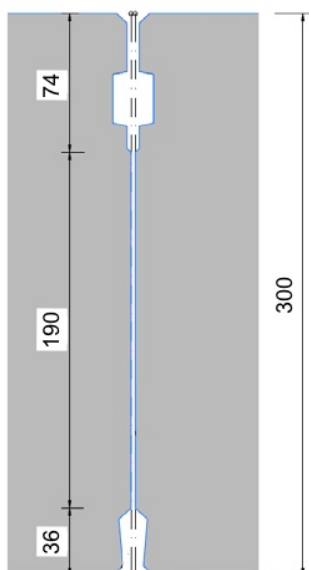


Obrázek 7.1 - schéma pro výpočet "Volumeloss" [19]

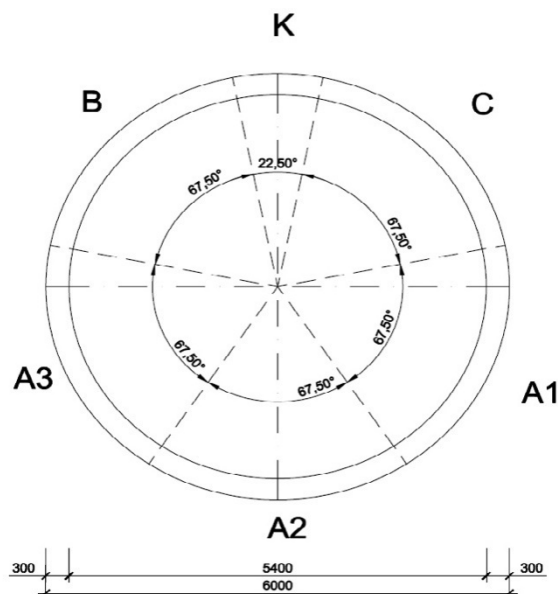
Investorem byla v návrhových kritériích požadována hodnota „Volumeloss“ v rozsahu 0,5-2,0 %. Tudíž jsem vytvořil dva výpočty, kde v prvním případě jsem uvažoval $VL = 0,5\%$ a v druhém případě $VL = 2,0\%$.

ΣM_{stage} (Mst)

Při výpočtech se zahrnutým postupem výstavby jsem vždy nasimuloval dvě následující varianty. V prvním případě jsem ve fázi, kdy došlo k odtěžení zeminy v oblasti výrubu uvažoval hodnotu **Mst = 0,1**, což představuje, že na nevystrojený výrub působí pouze 10% veškerého zatížení. Zbytek zatížení působí v následující fázi, ve které je již aktivováno ostění a musí tedy přenést zbylých 90% veškerého zatížení. V druhém případě jsem ve fázi odtěžení zeminy uvažoval **Mst = 0,4**, teda 40% zatížení působí na nevystrojený výrub a zbylých 60% přenáší ostění.



Obrázek 7.2 - detail spáry mezi segmenty [17]



Obrázek 7.3 - schéma prstence ostění [17]

Ostění

Dále bylo potřeba do výpočtu zahrnout tuhost ostění. V prvním případě jsem ostění namodeloval jako **plné (P)**, jde o zjednodušení, kdy se neuvažují spáry mezi segmenty. Ve výpočtu se s ostěním počítá, jakoby se jednalo o jeden monolitický prstenec. Počítá se s absolutním momentem setrvačnosti I_{full} . Realitě lépe odpovídá druhá varianta, kdy je ostění **redukované (R)**, tudíž jsou do výpočtu zahrnuty spáry mezi segmenty a to pomocí takzvaného efektivního momentu setrvačnosti I_{eff} , který se spočítá dle vzorce:

$$I_{eff} = I_{joint} + I_{full} * \left(\frac{4}{n}\right)^2, \quad (7.2)$$

$$I_{joint} = \frac{1}{12} * b * t_c^3, \quad (7.3)$$

$$I_{full} = \frac{1}{12} * b * t^3, \quad (7.4)$$

- kde: I_{eff} – efektivní moment setrvačnosti,
 I_{joint} – moment setrvačnosti ve spáře mezi segmenty,
 I_{full} – absolutní moment setrvačnosti (bez spáry),
 n – počet spár v prstenci,
 b – šířka prstence – počítáno na 1 m,
 t – tloušťka segmentu,
 t_c – kontaktní tloušťka mezi segmenty, [17].

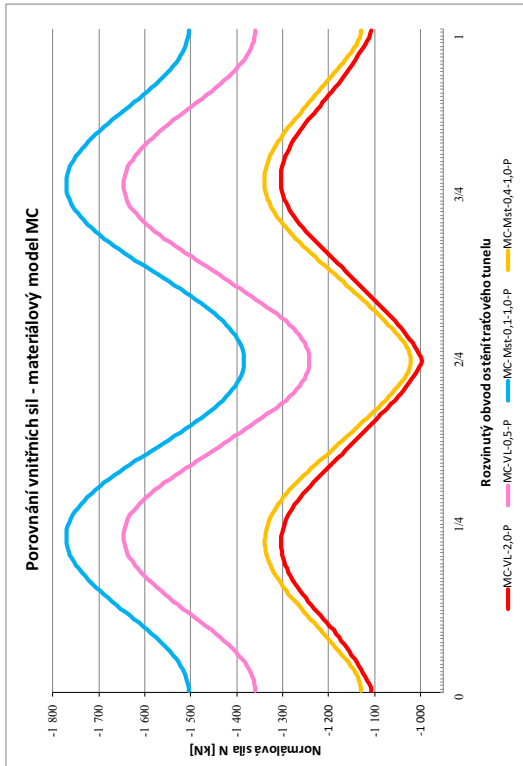
7.2 Grafické znázornění vnitřních sil jednotlivých modelů

V této kapitole jsou shrnuty výsledky vnitřních sil z programu PLAXIS 2D, které vyšly na základě jednotlivých výpočtů. Pro lepší porovnání jsou znázorněny v grafech, kde na svislé ose je vždy jedna z vnitřních sil (moment, normálová síla, smyková síla) a vodorovnou osu tvoří rozvinutý obvod ostění, tudíž výsledný graf znázorňuje průběh konkrétní vnitřní síly po obvodě ostění. Začátek a konec grafu zobrazuje velikost vnitřní síly ve dně tunelového ostění, v 1/4 a ve 3/4 jsou zobrazeny velikosti vnitřních sil na bocích tunelového ostění a v 1/2 je zobrazena velikost vnitřní síly v koruně tunelového ostění.

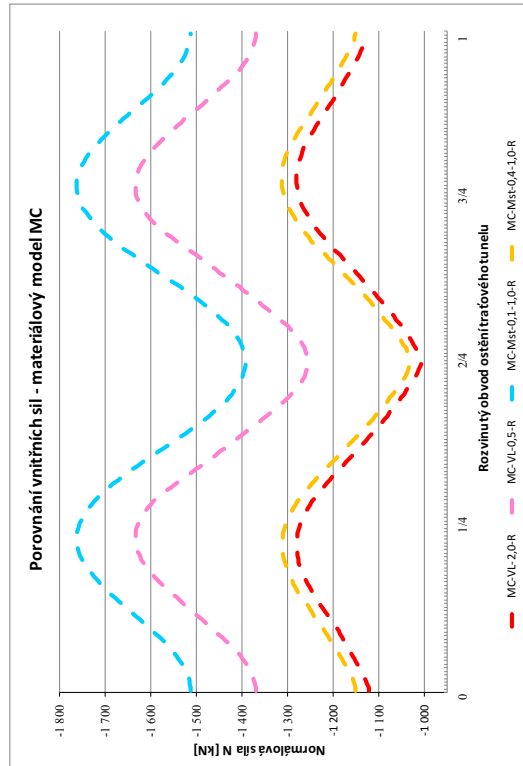
Vzhledem k tomu, že nebylo stanoveno, kdy dojde k instalaci ocelového rámu, byl rám posuzován na základě větších sil, které vznikly až po konsolidaci a na hlouběji položeném tunelu. Následující grafy, tedy zobrazují průběhy vnitřních sil na ostění traťového tunelu v místě budování hluboké propojky a to až po zkonsolidování zeminy, všechny ostatní grafy jsou v příloze A a B.

Průběhy vnitřních sil jsou vždy znázorněny na jedné sadě grafů, kterou tvoří čtyři grafy. Na prvních dvou grafech je zeminové prostředí modelováno pomocí Mohr-Coulombova (MC) materiálového modelu a liší se pouze tím, že v prvním grafu se ostění uvažuje jako plné (P), zatímco na druhém grafu jsou vykresleny vnitřní síly, které vzniknou při započítání spár do výpočtu. Obdobně je na tom druhá dvojice grafů, pouze zeminové prostředí je simulováno pomocí Modifikovaného Camclay materiálového modelu.

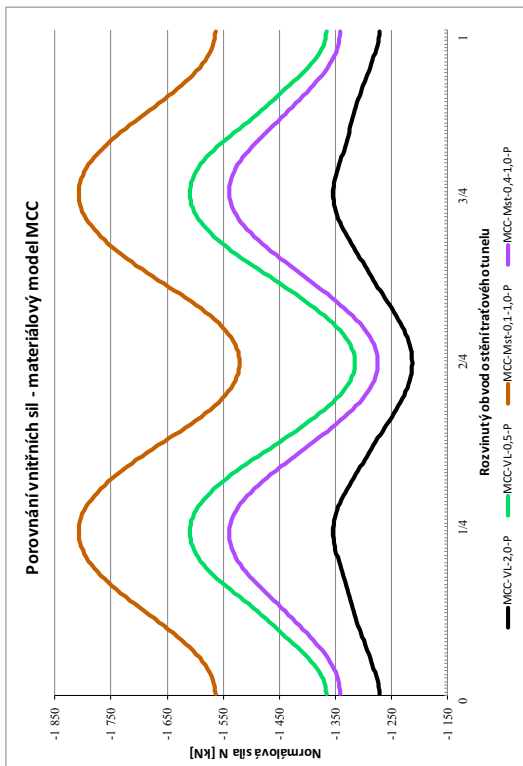
Normálové síly po konsolidaci – hluboká propojka



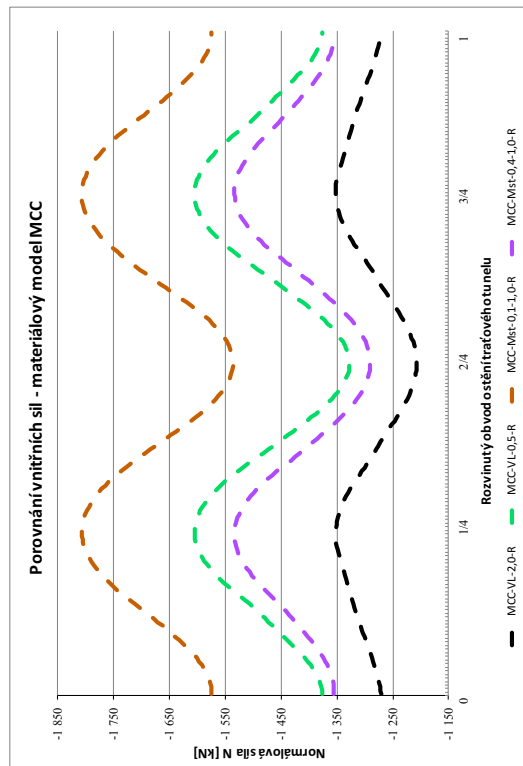
Obrázek 7.4 - model MC - plné ostění



Obrázek 7.5 - model MC - redukované ostění

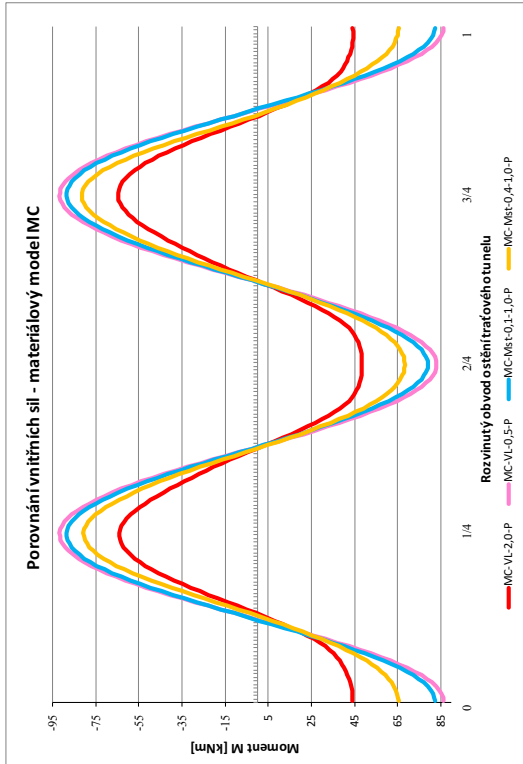


Obrázek 7.6 - model MCC - plné ostění

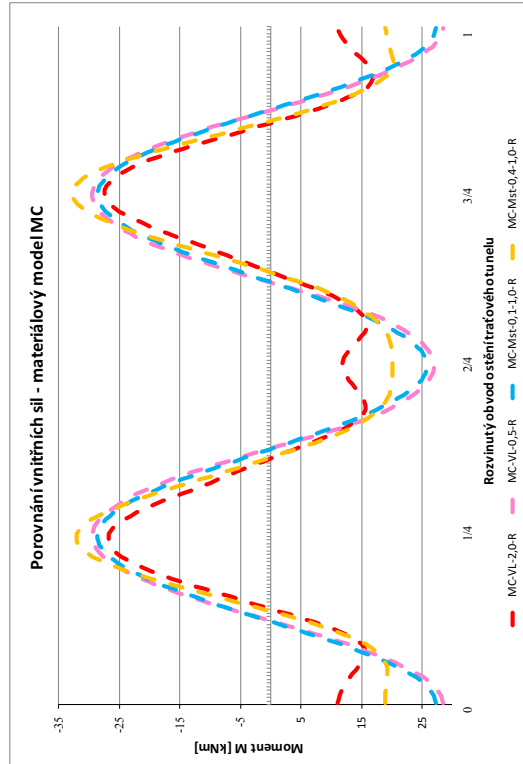


Obrázek 7.7 - model MCC - redukované ostění

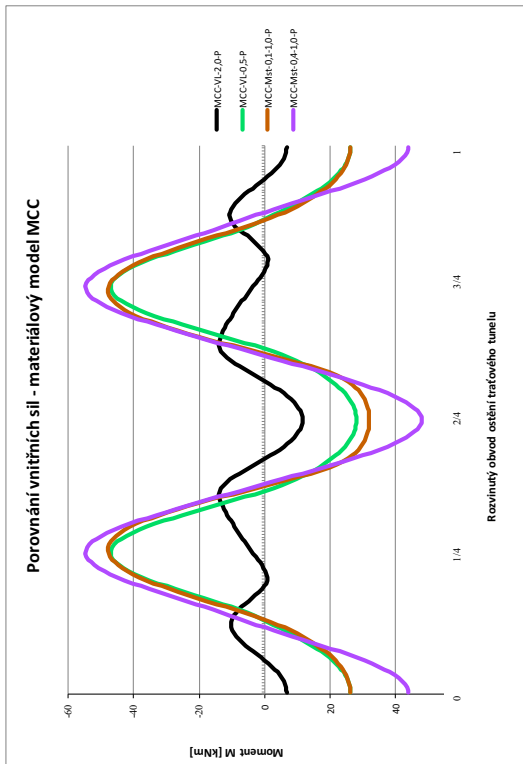
Momenty po konsolidaci - hluboká propojka



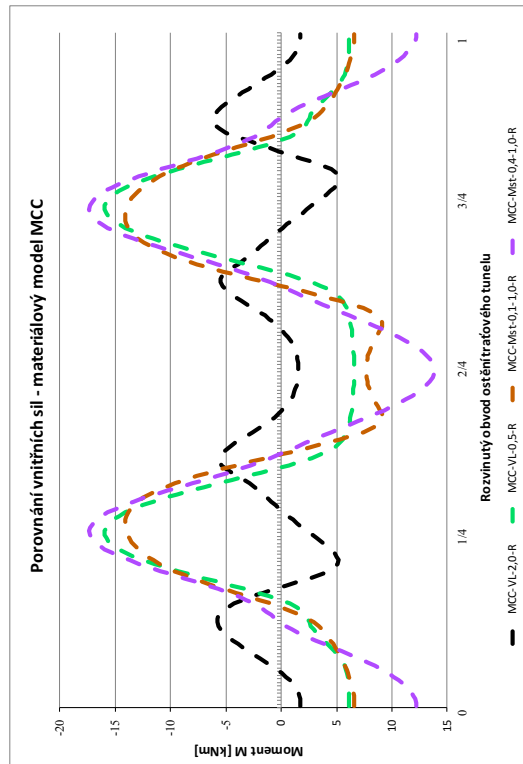
Obrázek 7.8 - model MC - plné ostění



Obrázek 7.9 - model MC - redukováné ostění

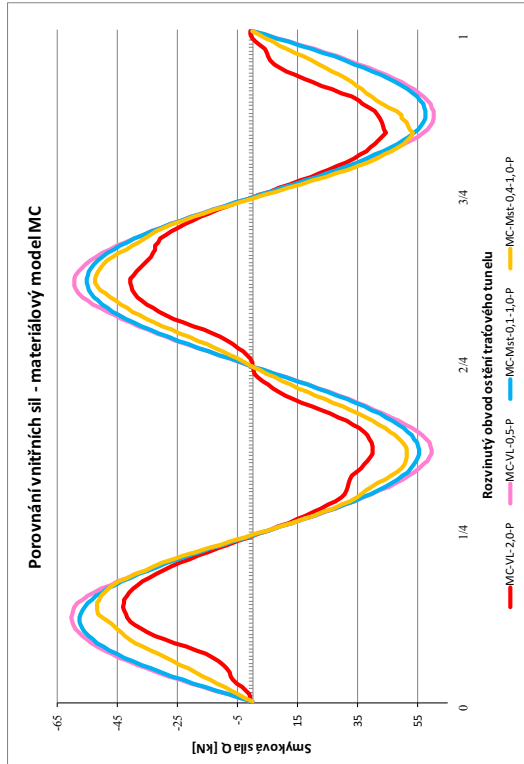


Obrázek 7.10 - model MCC - plné ostění

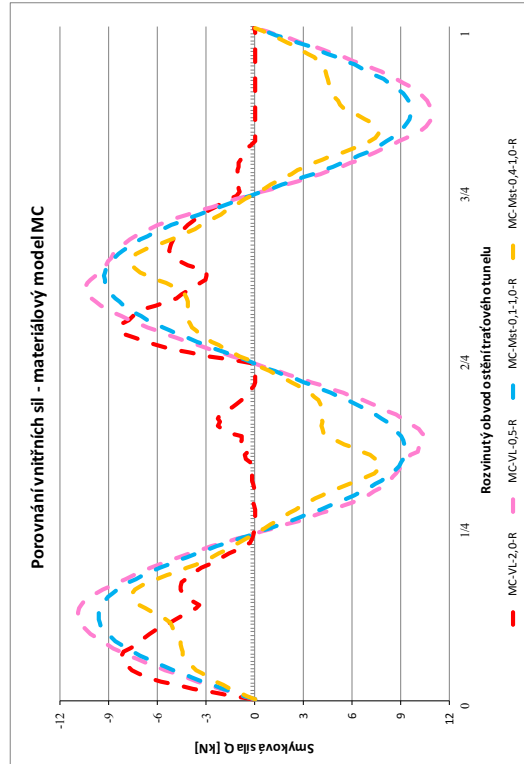


Obrázek 7.11 - model MCC - redukováné ostění

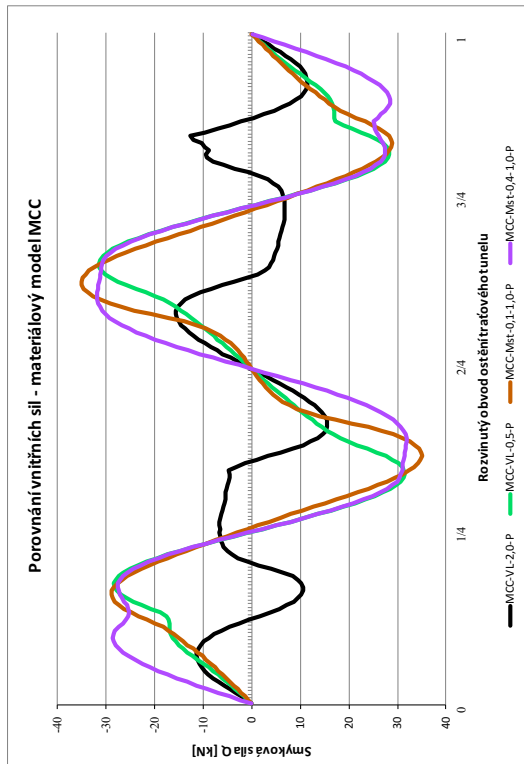
Smykové síly po konsolidaci - hluboká propojka



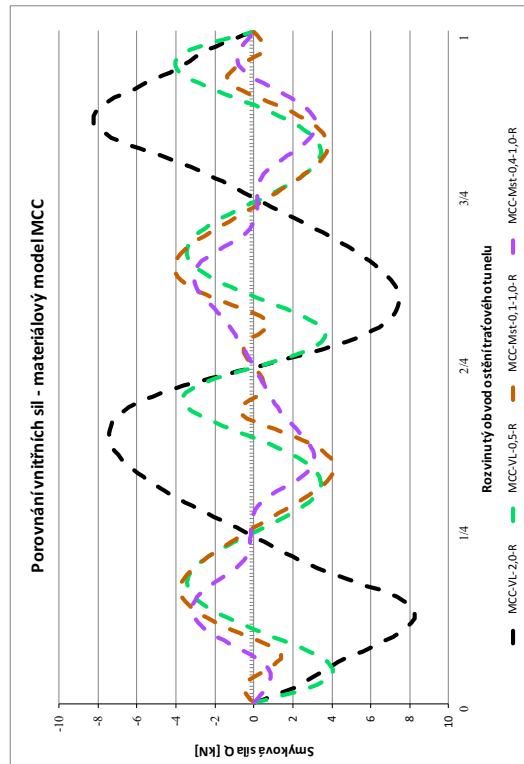
Obrázek 7.12 - model MC - plné ostění



Obrázek 7.13 - model MC - redukované ostění



Obrázek 7.14 - model MCC - plné ostění



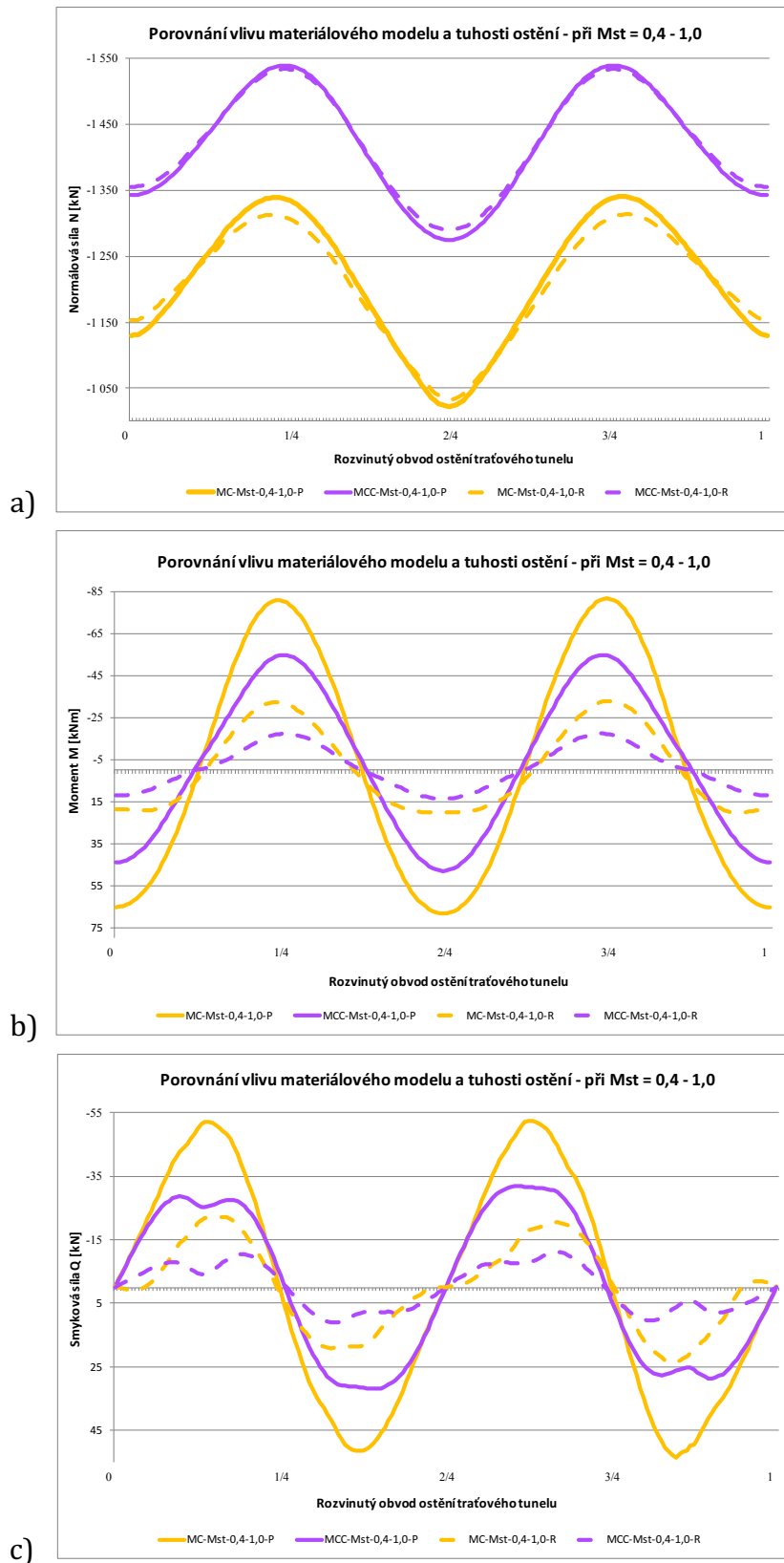
Obrázek 7.15 - model MCC - redukované ostění

Z grafů je patrné, že výpočet při použití $VL = 2\%$ dává ve všech případech značně odlišné průběhy i hodnoty výsledných sil oproti ostatním výpočtům, tudíž jsem vyhodnotil, že se nejedná o nesprávně nastavený výpočet. V případě varianty s $Mst = 0,1-1,0$ se jedná o variantu příliš konzervativní, jelikož není pravděpodobné, že by ostění přenášelo 90% zatížení a zemina pouze 10%. Co se varianty s $VL = 0,5\%$ týká, tak při ní vznikaly velmi obdobné vnitřní síly, jako ve variantě s $Mstage = 0,1-1,0$, které se taktéž dají považovat za příliš konzervativní. Jako nejoptimálnější variantu jsem vyhodnotil výpočet přes $Mstage = 0,4 - 1,0$, kdy jsou výsledné průběhy a hodnoty z mého pohledu nejreprezentativnější a poměr zatížení přenosu zatížení 40% zemina a 60% ostění by mohl odpovídat realitě.

Dále jsme vytvořil další sadu grafů, která se nachází na obrázku 6.27. Zde je již zobrazen pouze výpočet přes $Mstage = 0,4 - 1,0$. Sadu tvoří tři grafy, přičemž každý zobrazuje jednu z vnitřních sil a srovnává, jaký vliv na velikost vnitřní síly má použitý materiálový model a uvažování, či neuvažování spár mezi segmenty.

Uvažování spár nemá žádný velký vliv na normálové síly a to z důvodu, že se redukoval pouze moment setrvačnosti, tudíž se změnila pouze ohybová tuhost EI , nikoliv tuhost v tlaku EA .

Nejreprezentativnějším výpočtem je varianta MCC-Mst-0,4-1,0-R, kdy je materiálové prostředí reprezentováno Modifikovaným Cam-clay materiálovým modelem, které přesněji vystihuje chování zemin a dále je přihlédnuto k tuhosti ostění, které je díky spárám nižší.



Obrázek 7.16 - porovnání vnitřních sil na základě materiálového modelu a typu ostění – konsolidační fáze: a) normálové síly, b) momenty, c) smykové síly

7.3 Nastavení 3D skořepinovo pružinového modelu

K nastavení jsem použil jednoduchý model, který tvořil jednoduchý plný tubus, bez uvažování jakýchkoliv spár a skladby segmentového ostění

Hlavním úkolem bylo na tomto modelu nastavit správnou tuhost pružin, reprezentujících zeminové prostředí v okolí tunelu, aby mi 3D model dával téměř totožné výsledky vnitřních sil jako 2D model

Tuhost pružin jsem nastavoval na základě mého 2D modelu z programu PLAXIS s označením MCC-Mst-0,4-1,0-P. Použil jsem model s plným ostěním, nikoliv s redukováním z toho důvodu, že ve finálním 3D modelu jsou fyzicky vymodelovány jednotlivé segmenty. Postup k určení optimální tuhosti byl takový, že jsem z výše zmíněného modelu zjistil, jaké normálové napětí působí na ostění a jaká v daném místě vzniká deformace a to konkrétně ve dně a na bocích ostění. Vycházel jsem ze vztahu:

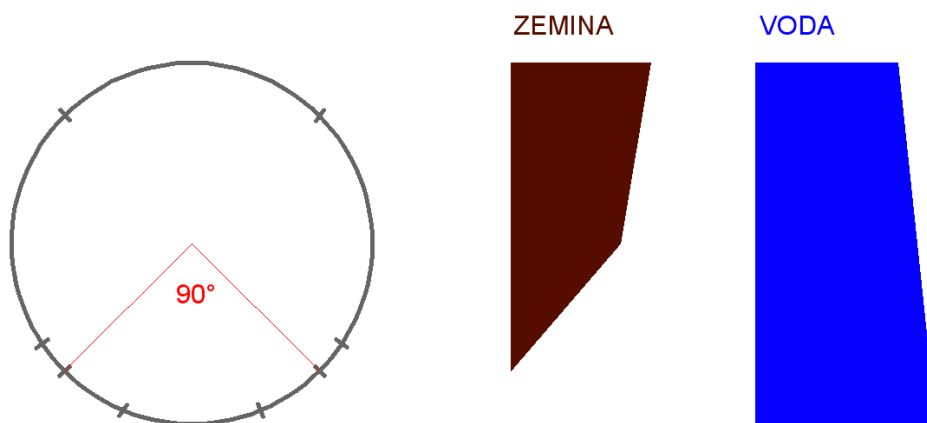
$$k = \frac{\sigma_N}{P_u} \quad (7.5)$$

Kde: k – tuhost pružiny

σ_N – normálové napětí

P_u – deformace v dané fázi výpočtu

Z toho vztahu jsem získal dvě hodnoty tuhostí, 63,5 MN/m³ ve dně tunelu a 13 MN/m³ na bocích tunelu. Ostění tunelu jsem nejprve rozdělil na čtyři čtvrtiny. Horní, dolní a dvě boční, kde horní a dolní jsem podepřel pružinami o tuhosti $k = 63,5$ MN/m³ a boční pružinami tuhosti $k = 12$ MN/m³. Abych dostal přesnější a lépe odpovídající průběhy vnitřních sil, bylo potřeba dále rozdělit spodní polovinu ostění. Část dna jsem podepřel ještě tužšími pružinami $k = 75$ MN/m³ a dále bylo potřeba nastavit přechodovou tuhost mezi tuhosti dna $k = 65$ MN/m³ a tuhosti na bocích, kterou jsem zvolil 43 MN/m³. Výsledné vnitřní síly a deformace jsou si už velmi blízké. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba ostění rozdělil na ještě jemnější úseky s postupnějším nárůstem tuhostí.



Obrázek 7.17 - zatěžovací schéma SCIA modelu

Zatížení tunelu jsem, také převzal z programu PLAXIS a to tím způsobem, že jsem vzal svislé napětí, které působilo v koruně ostění $\sigma_{V1} = 221 \text{ kN/m}^2$ a vodorovné napětí $\sigma_{H1} = 231 \text{ kN/m}^2$, které působilo na bok ostění v ose, dále jsem na kraji modelu určil hodnotu svislého napětí ve hloubce koruny tunelu $\sigma_{V2} = 406 \text{ kN/m}^2$ a opět vodorovné napětí v hloubce osy tunelu $\sigma_{H2} = 317 \text{ kN/m}^2$, které reprezentuje původní napjatost v zemině. Zatížení v koruně tunelu se rovná přímo působícímu napětí v ostění $\sigma_{V1} = 221 \text{ kN/m}^2$, oproti tomu vodorovné zatížení na bocích tunelu vychází z poměru svislého zatížení v koruně a původní vodorovné napjatosti v ose tunelu.

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{V1}}{\sigma_{V2}} * \sigma_{H2} \quad (7.6)$$

Kde: σ_H – výsledné vodorovné zatížení v hloubce osy tunelu,

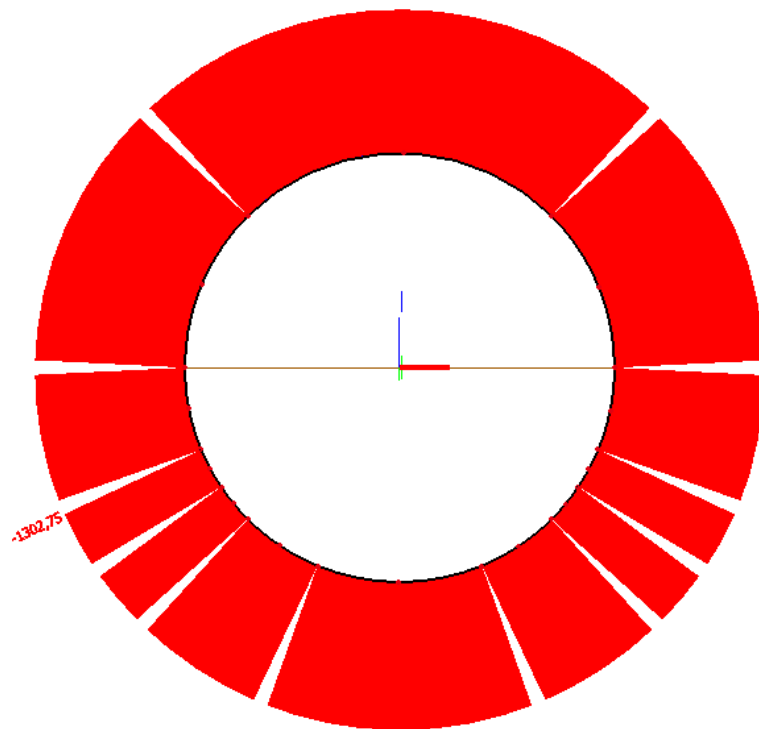
σ_{V1} – svislé napětí na ostění v koruně tunelu,

σ_{V2} – původní svislé napětí v hloubce koruny tunelu,

σ_{H2} – původní vodorovné napětí v ose tunelu.

Výsledná hodnota $\sigma_H = 172,5 \text{ kN/m}^2$. Od hloubky osy tunelu zatěžovací obrazec, klesá až do nuly, která se nachází v takové pozici, aby spojnice osy tunelu s polohou nulového zatížení ostění na jedné straně svírala se spojnicí osy tunelu a nulového bodu zatížení na druhé straně ostění 90° .

Porovnání normálových sil



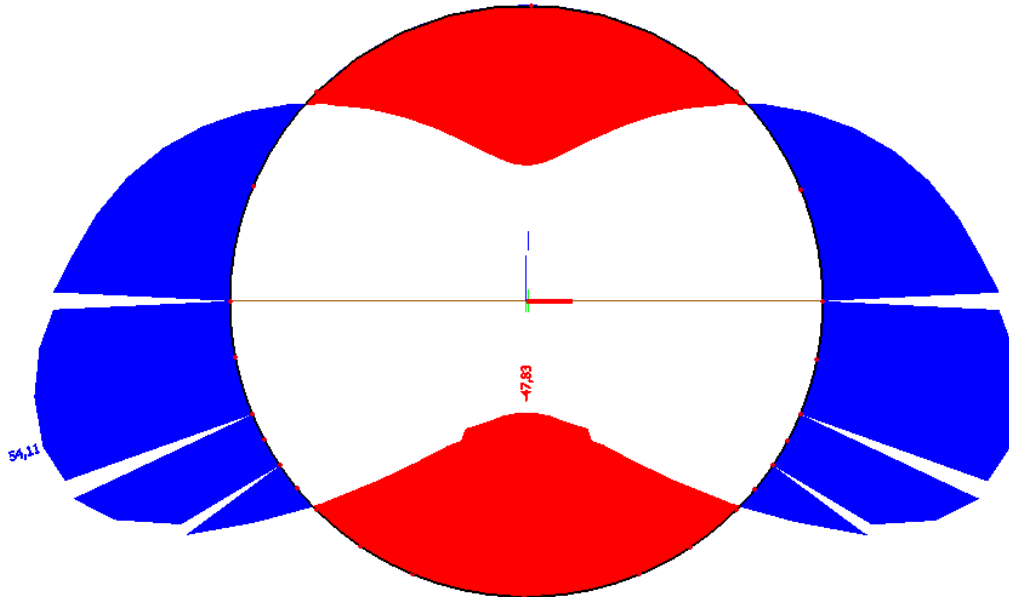
Obrázek 7.18 - normálová síla $N_{min} = -1302 \text{ kN/m}$ - řez 3D SCIA modelem



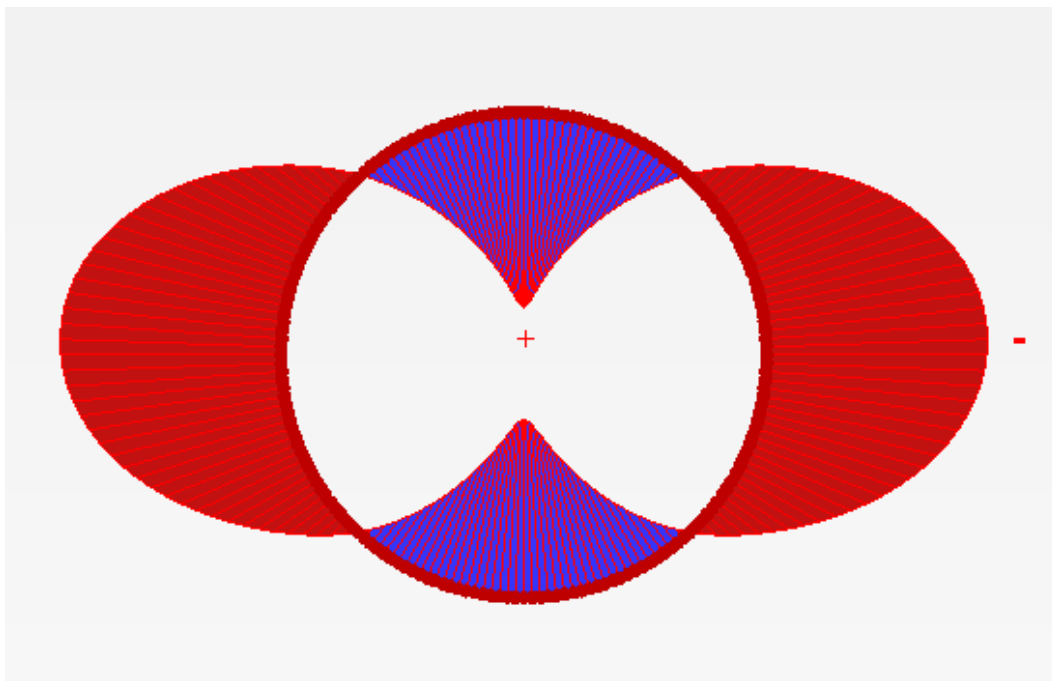
Obrázek 7.19 - normálová síla $N_{min} = 1539 \text{ kN/m}$, $N_{max} = 1275 \text{ kN/m}$ - 2D model PLAXIS

Porovnání momentů

Z obrázku 6.31 je patrné, že by bylo potřeba podepřít konstrukci v dolní polovině pružinami o větší tuhosti, ale zároveň by bylo potřeba rozdělit tak, aby byl plynulejší přechod mezi jejich tuhostmi.



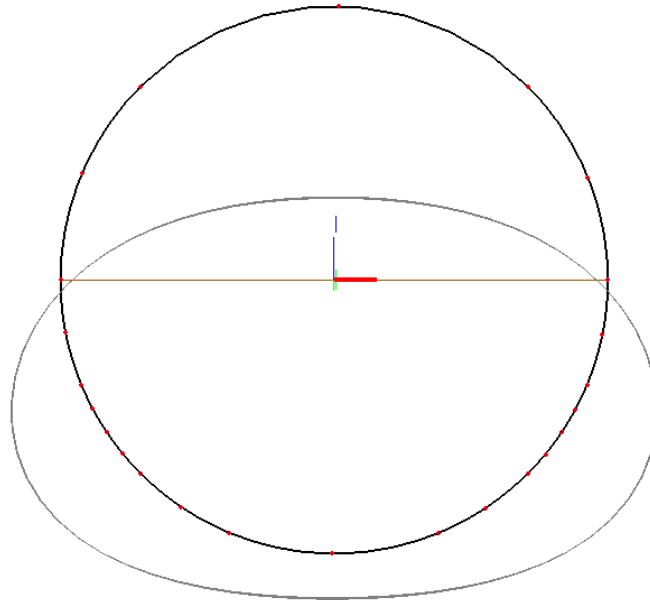
Obrázek 7.20 – Moment $M_{min} = -48,83 \text{ kNm/m}$ - řez 3D SCIA modelem



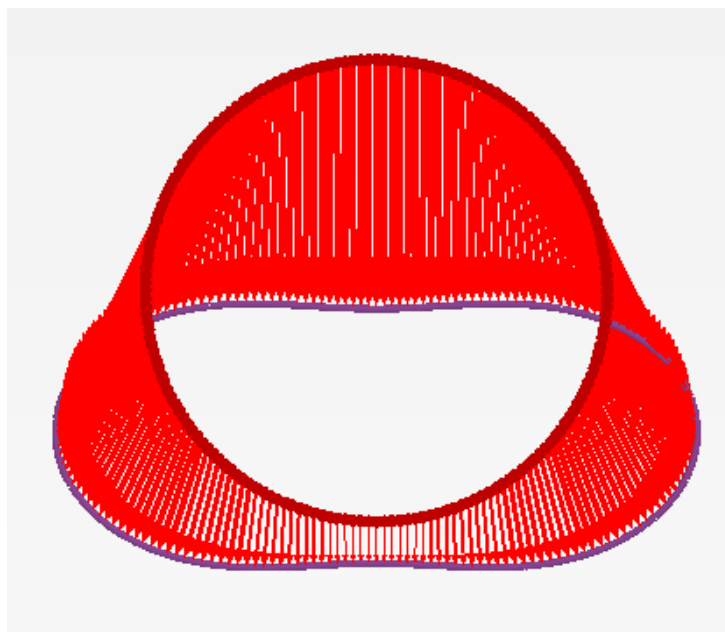
Obrázek 7.21 - Moment $M_{max} = 48,08 \text{ kNm/m}$, $M_{max} = -54,66 \text{ kNm/m}$ - řez 3D SCIA modelem

Porovnání deformací

Tvar deformované konstrukce je velmi podobný, ale ve SCIA modelu mi hodnoty deformací vyšly přibližně o 35% větší. Maximální deformace vzniká vždy v koruně tunelu a v případě 3D SCIA modelu se rovná 9 mm, zatímco v 2D modelu z programu PLAXIS je deformace rovna 6,7 mm.



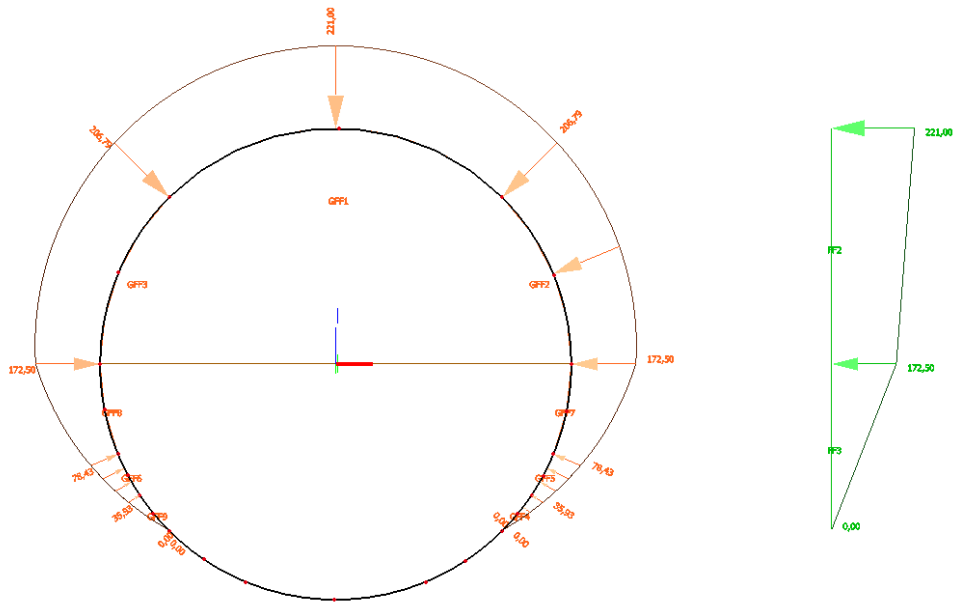
Obrázek 7.22–tvar deformovaná konstrukce – řez 3D modelem SCIA



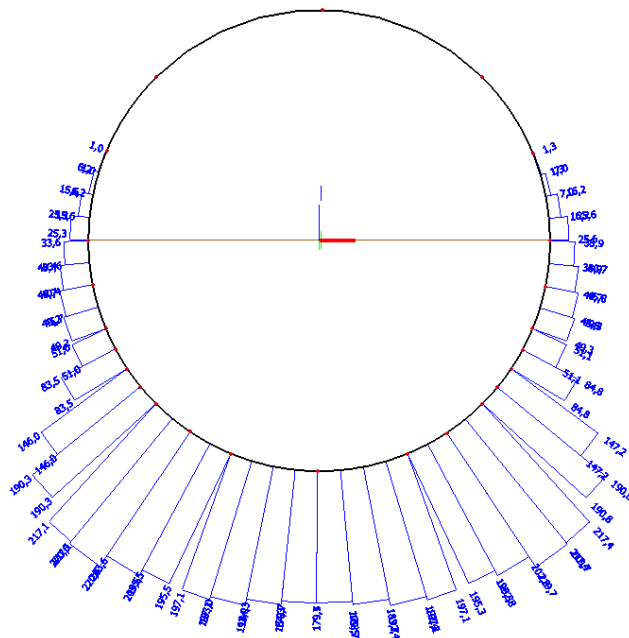
Obrázek 7.23–tvar deformovaná konstrukce - PLAXIS

Napětí v pružinkách

Na obrázku 6.35 je zobrazen průběh zatížení od zemního tlaků působící na konstrukci. Druhý obrázek zobrazuje kontaktní napětí, které vzniká právě vlivem zatížení a reprezentuje napětí, které vzniká v pružinkách.



Obrázek 7.24 - zatížení od zemního tlaku - SCIA model



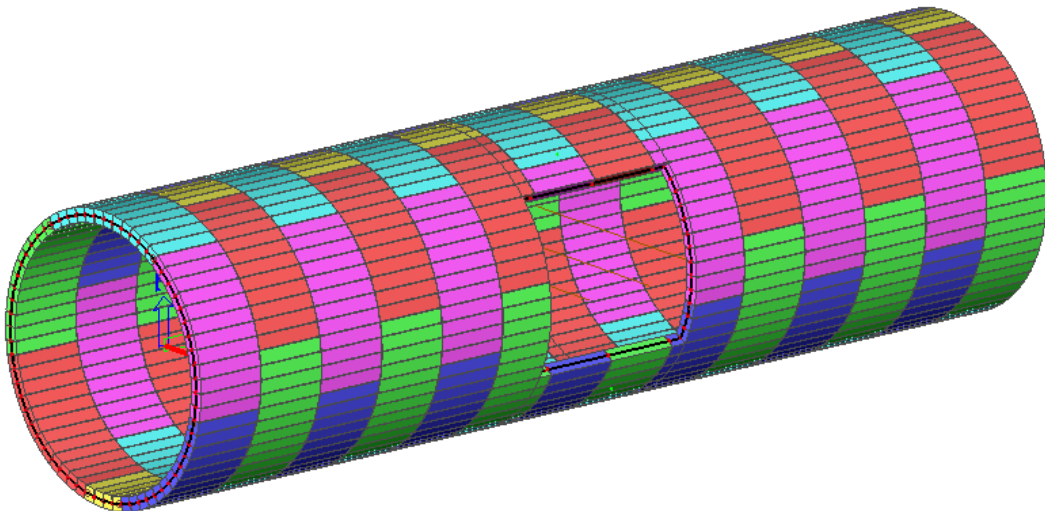
Obrázek 7.25 - výsledné kontaktní napětí - SCIA model

7.4 Model traťového tunelu včetně ocelového rámu a prostupu

Jakmile jsem dospěl k závěru, že tuhost pružin, reprezentující okolní zeminové prostředí dávají přijatelné výsledky v porovnání s programem PLAXIS, přesunul jsem se k modelování finálního modelu.

V tomto modelu, jsem již modeloval jednotlivé segmenty ostění včetně natáčení jednotlivých prstenců. Dále jsem v modelu vytvořil požadovaný otvor s navrženými nosníky nad a pod otvorem.

Celá konstrukce je zatížena stejným zatížením, které je popsáno a schematicky znázorněno v kapitole 7.3, a také zeminové prostředí je reprezentováno pomocí pružin o tuhosti, která vzešla z předešlého modelu popsaného v kapitole 7.3.

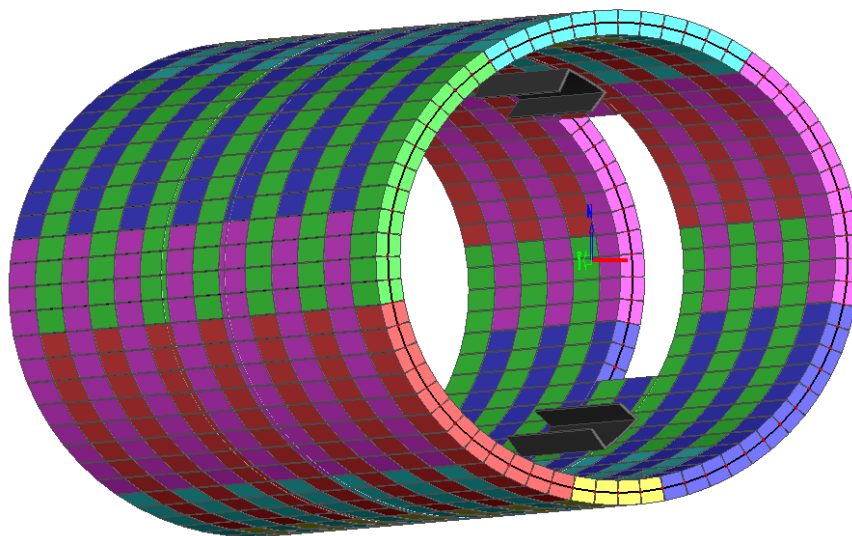


Obrázek 7.26 - 3D model včetně prostupu a ocelových nosníků

Vytvořil jsem tři varianty tohoto modelu:

1. Vodorovné spáry mezi segmenty a svislé spáry mezi prstenci nejsou uvažovány. Tunel se chová jako jeden tuhý celek
2. Svislé spáry mezi prstenci jsou započítány a to tím způsobem, že mezi každým prstence je namodelován 10 milimetrový prstenec, kterému je přidělen smyšlený materiál s modulem pružnosti $E = 30 \text{ MPa}$.

3. Ve výpočtu jsou zahrnuty nejen svislé spáry, ale i vodorovné spáry mezi jednotlivými segmenty a to tím způsobem, že na hranách mezi segmenty jsou klouby, které umožňují natočení ve všech směrech, ale zamezují posunům. První model sloužil především k porovnání, jestli je model správně vymodelován a vznikají na něm v místě mimo otvor stejné vnitřní síly, jako na zjednodušeném modelu viz kapitola 7.2.



Obrázek 7.27 - 3D vizualizace – pohled na rám

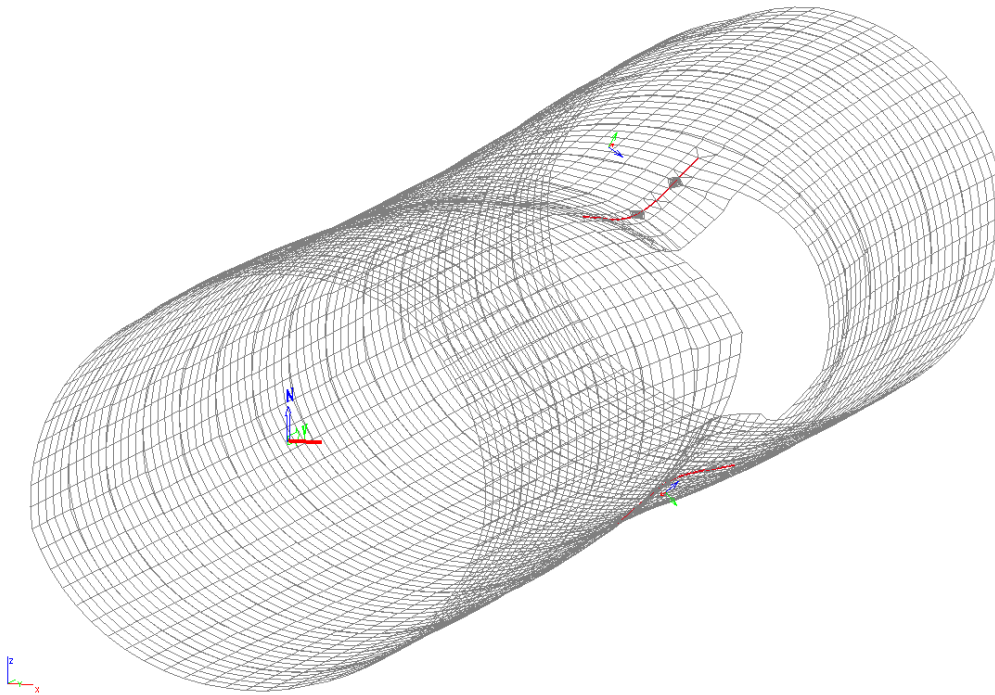
7.5 Výsledné vnitřní síly a chování konstrukce

K posouzení navrženého rámu byl použit třetí model, ve kterém vycházely na nosnících největší vnitřní síly, tudíž se jedná o konzervativní přístup. Na následujících obrázcích je nejprve zobrazena deformovaná síť celé konstrukce a následně průběhy vnitřních síl, které jsou potřebné k posouzení nosníků.

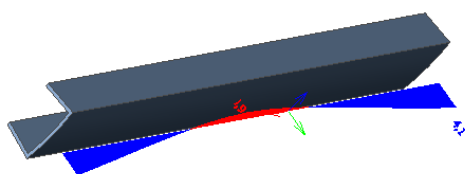
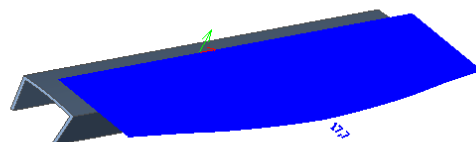
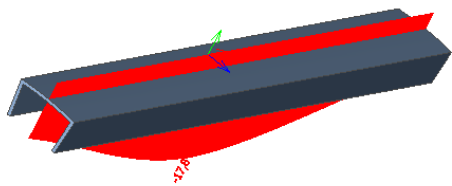
Deformace

Z deformace sítě (Obrázek 7.28 a 7.29) je patrné, že se ostění nad a pod otvorem více deformuje směrem do tunelu a segmenty na bocích otvoru se více „vyvaluji“ do zeminy. Maximální deformace oslabených prstenců je přibližně 24 mm, tudíž vzrostla o více než dvojnásobek. Maximální deformace samotného nosníku (Obrázek 7.30 a 7.31) jsou $u_y = 17,8$ mm a $u_z = 17,7$ mm. Z průběhů deformace

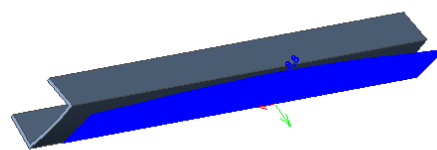
vyplývá, že se oba nosníky ohýbají směrem do otvoru a poté horní nosník, na kterém vzniká větší deformace ve směru y se ohýbá do prostoru tunelu, což odpovídá deformované síti celé konstrukce.



Obrázek 7.28 - 3D deformovaná síť celé konstrukce – zobrazení2



Obrázek 7.29 - deformace nosníků ve směru y



Obrázek 7.30 - deformace nosníků ve směru z

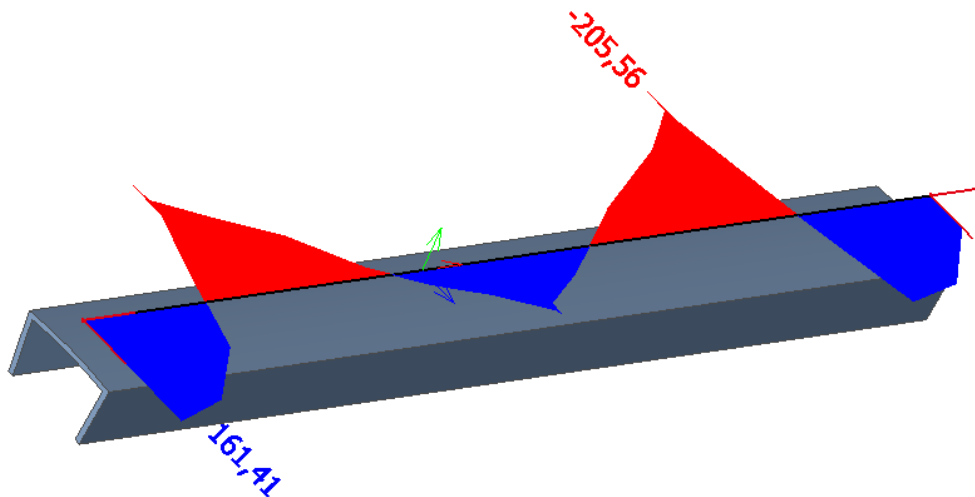
Vnitřní síly

Průběhy vnitřních sil jsou znázorněny na obrázcích 7.31 – 7.36 a výsledné maximální a minimální hodnoty vnitřní síly jsou shrnuty v tabulce 7.3. Jednotlivé hodnoty po celé délce nosníku jsou uvedeny v příloze B.

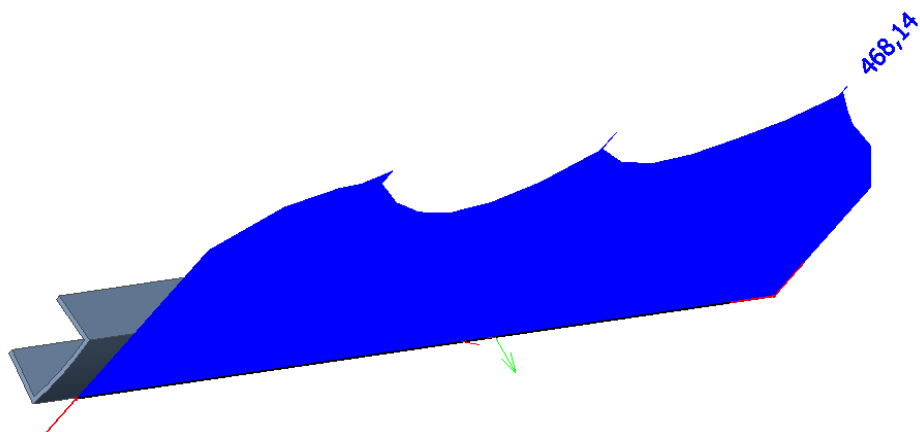
Tabulka 7.3 - Maximální a minimální vnitřní síly na nosnících

Vnitřní síly	Vrchní rám	Spodní rám
N_{\min} [kN]	-205,56	-
N_{\max} [kN]	161,41	468,14
$M_{y, \min}$ [kNm]	-530,16	-286,81
$M_{y, \max}$ [kNm]	39,82	7,86
$M_{z, \min}$ [kNm]	-75,40	-45,11
$M_{z, \max}$ [kNm]	404,63	244,59
$V_{y, \min}$ [kN]	-213,07	-145,99
$V_{y, \max}$ [kN]	451,78 (375,10)	119,68
$V_{z, \min}$ [kN]	-1383,05 (1026,08)	-1000,08 (-744,31)
$V_{z, \max}$ [kN]	1482,33 (1036,77)	946,07 (707,52)

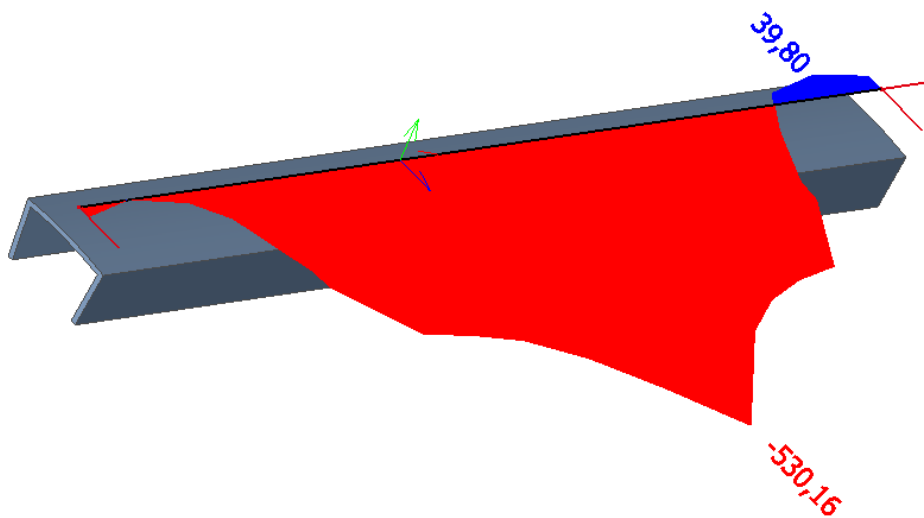
Špičky smykových sil byly zredukovány na hodnoty uvedené v závorkách.



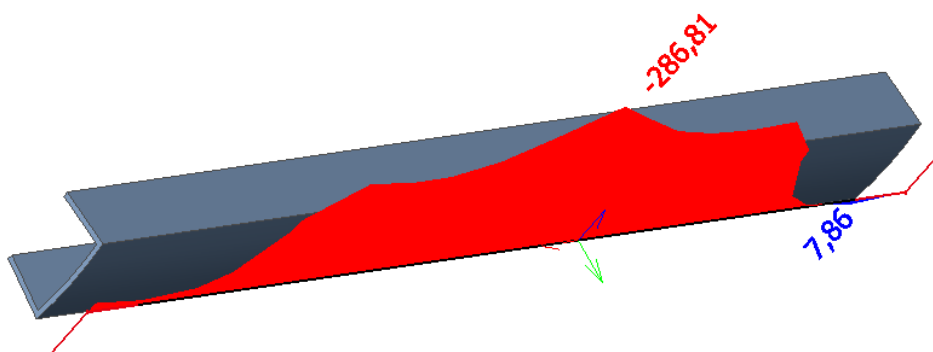
Obrázek 7.31- normálová síla N [kN] - vrchní nosník



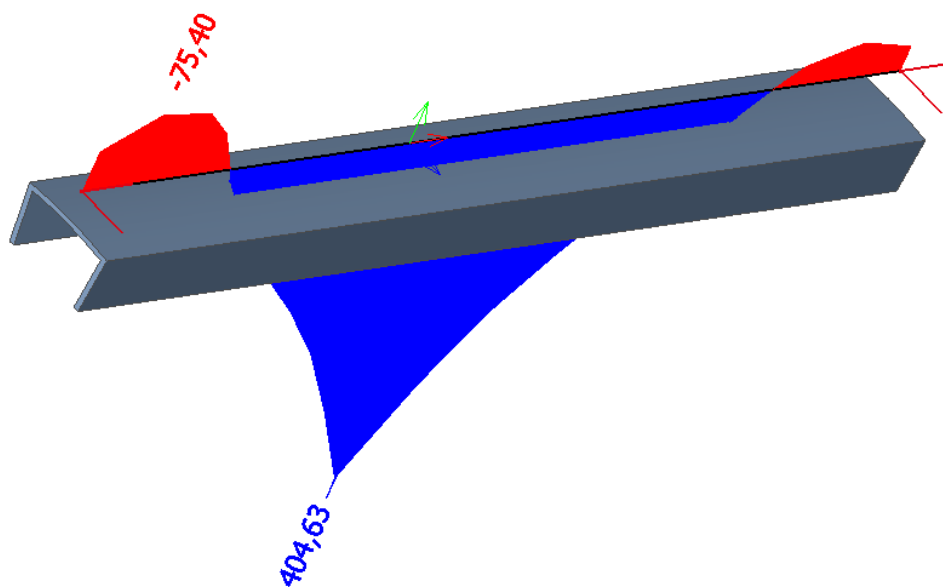
Obrázek 7.32 normálová síla N [kN] - spodní nosník



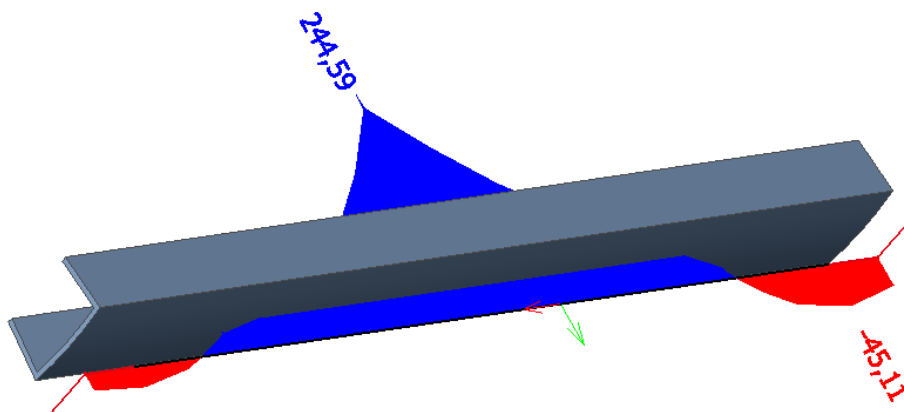
Obrázek 7.33 moment M_y [kNm] - vrchní nosník



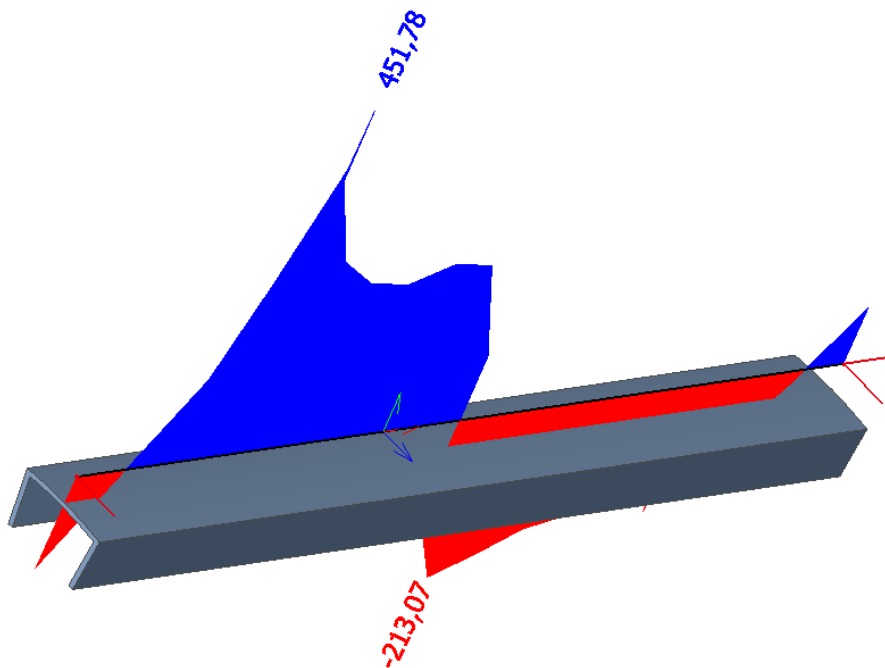
Obrázek 7.34 moment M_y [kNm] - spodní nosník



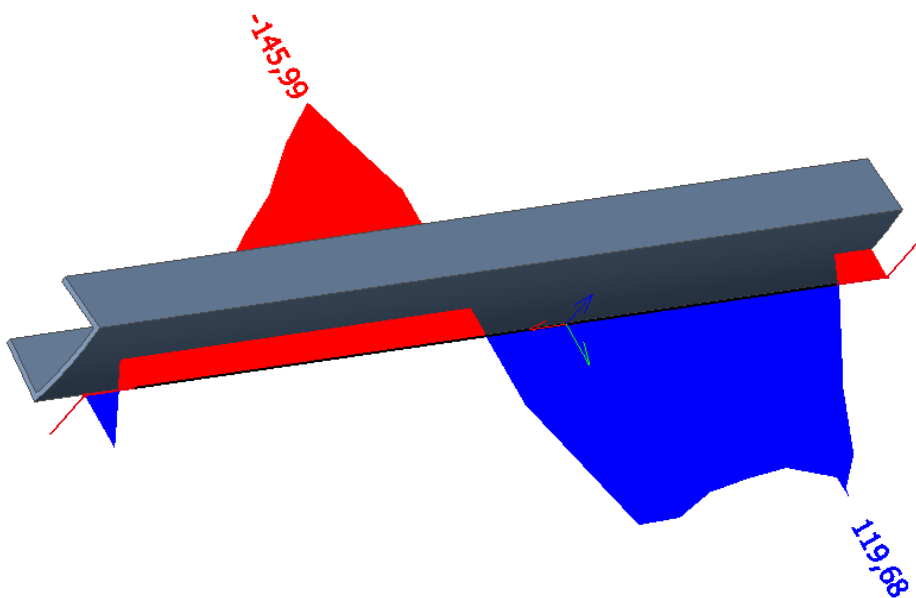
Obrázek 7.35 moment M_z [kNm] - vrchní nosník



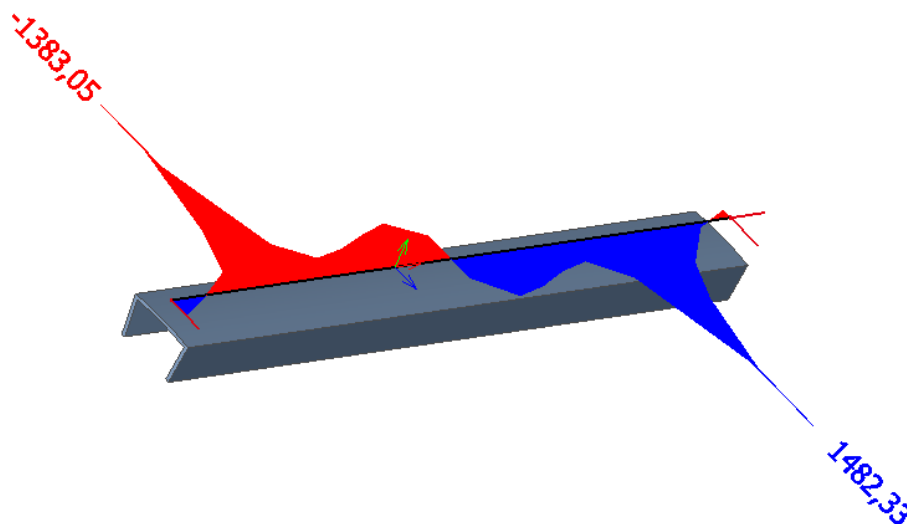
Obrázek 7.36 moment M_z [kNm] - spodní nosník



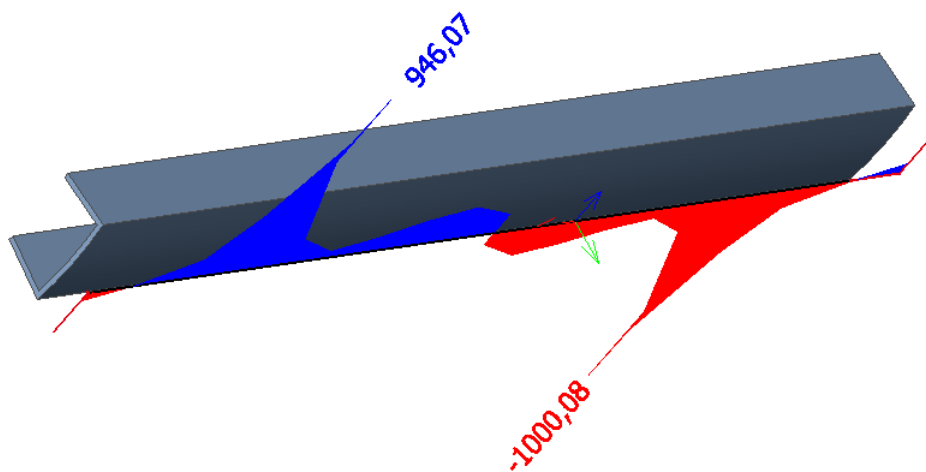
Obrázek 7.37 smyková síla V_y [kN] - vrchní nosník



Obrázek 7.38 smyková síla V_y [kN] - spodní nosník



Obrázek 7.39 smyková síla V_z [kN] - vrchní nosník



Obrázek 7.40 smyková síla V_y [kN] - spodní nosník

7.6 Posouzení ocelových nosníků

Na základě výše zmíněných vnitřních sil jsem provedl zjednodušený posudek hlavních ocelových prvků navrženého dočasného ocelového rámu, kterými jsou vrchní a spodní nosník.

Zatřídění svařovaného průřezu

-dle EN 1993-1-1 tabulka 5.2

Stojina nosníku:

-podmínky 1 třídy průřezu, kde platí:

$$\frac{c}{t} \leq 33 * \varepsilon \quad (7.7)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (7.8)$$

kde: c – výška stojiny po odečtení svarů,

t – tloušťka stojiny,

f_y – mez kluzu oceli.

$$c = 430 \text{ mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$\frac{430}{25} \leq 33 * \sqrt{\frac{235}{355}}$$

$$17,2 < 26,85$$

Stojina vyhovuje podmínce, spadá do 1. třídy průřezu.

Pásnice nosníku:

-podmínky 2. třídy průřezu, kde platí:

$$\frac{c}{t} \leq 10 * \varepsilon \quad (7.9)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (7.10)$$

kde: c – šířka pásnice po odečtení svaru a tloušťky stojiny,

t – tloušťka pásnice,

f_y – mez kluzu oceli.

$$c = 240 \text{ mm}$$

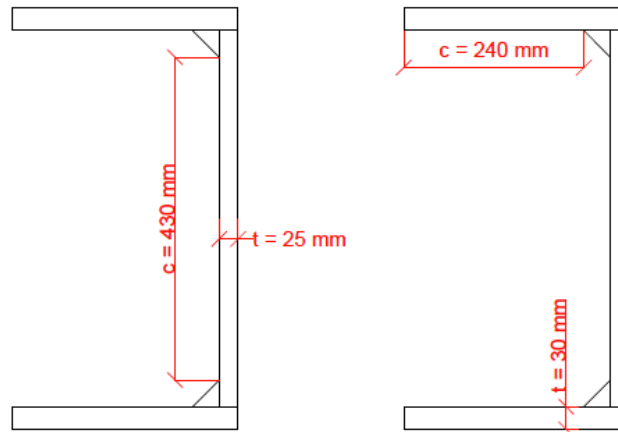
$t = 30 \text{ mm}$

$f_y = 355 \text{ MPa}$

$$\frac{240}{30} \leq 10 * \sqrt{\frac{235}{355}}$$

$$8 < 8,14$$

Pásnice vyhovuje podmínce, spadá do 2. třídy průřezu.



Obrázek 7.41- schéma pro zatřídění stojiny a pásnice svařovaného průřezu

Posouzení nosníku

Posudek jsem provedl na základě vztahu dle EN 1993-1-1, článek 6.2.1, bod 5, který říká, že musí být splněna v rozhodujícím bodě následující podmínka:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) * \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 \leq 1 \quad (7.11)$$

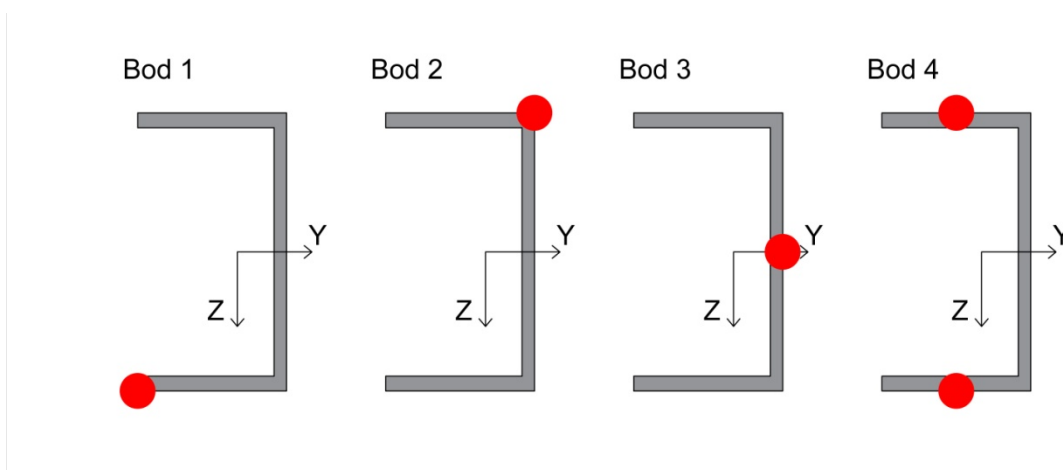
kde:

$\sigma_{x,Ed}$ – návrhová hodnota podélného normálového napětí v uvažovaném bodu,

$\sigma_{z,Ed}$ – návrhová hodnota příčného normálového napětí v uvažovaném bodu,

τ_{Ed} – návrhová hodnota smykového napětí v uvažovaném bodu.

Dále splňuji bod 8 z článku 6.2.1 normy EN 1993-1-1, který říká: „Jestliže všechny tlačené části průřezu jsou alespoň třídy 2, lze uvažovat, že průřez je schopný rozvinout plnou plastickou únosnost za ohybu.“ Z toho vyplývá, že při výpočtu normálových sil mohu počítat s plastickým průřezovým modulem.



Obrázek 7.42 - body posouzení dle vztahu 7.11

Na průřezu jsem určil čtyři kritické body, ve kterých bylo nutné nosník posoudit, dle rovnice 7.11.

Bod 1

Jedná se o místo, kde je nosník namáhán největším tahovým namáháním, jak od momentu M_y , tak od momentu M_z , případně od normálové síly. Smykové napětí τ je zde nulové.

Bod 2

Místo vzniku největšího tlakového namáhání, opět od obou momentů M_y , M_z a normálové síly N . Smykové napětí τ je opět nulové.

Bod 3

V tomto bodě je průřez namáhán maximálním smykovým napětím τ_{xz} od smykové síly V_z a dále normálovým napětím od momentu M_z a normálové síly N .

Bod 4

Tento bod je ekvivalentní k bodu 3, jen místo maximálního τ_{xz} zde působí maximální τ_{xy} od smykové síly V_y . Normálové napětí zde působí od momentu M_y . Dále závisí na normálové síle N , zda se jedná o tah či tlak. V případě tlaku se posudek provede v horní pásnici a v případě tahu v dolní pásnici.

Posouzení kritických míst na nosníku

Nejkritičtější místo se nacházelo na vrchním nosníku okolo poloviny rozpětí. Návrhová napětí a výsledky jednotlivých posudků v bodech dle obrázku 7.42 jsou shrnuty v tabulce 7.5. Použité průřezové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 7.4.

Tabulka 7.4 - průřezové charakteristiky nosníku

Průřezové charakteristiky		
A [m ²]	0,0305	plocha průřezu
W _{pl,y} [m ²]	0,0060247	plastický průřezový modul y
W _{pl,z} [m ²]	0,0025117	plastický průřezový modul z

Tabulka 7.5 - posouzení nosníku v kritických místech

$\sigma_{x,Ed,N}$ [MN/m ²]	$\sigma_{x,Ed,My}$ [kN/m ²]	$\sigma_{x,Ed,Mz}$ [kN/m ²]	$\tau_{x,Ed,Vy}$ [kN/m ²]	$\tau_{x,Ed,Vz}$ [kN/m ²]	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	< 1	Rezerva [%]
2,13	-100,56	162,43	-32,92	-19,40	0,54	0,56	0,22	0,10	OK	44
3,71	-118,57	205,05	-19,24	-11,34	0,81	0,85	0,35	0,11	OK	15
3,98	-118,11	217,48	-3,08	-1,82	0,87	0,92	0,39	0,10	OK	8
3,22	-118,80	203,33	15,56	9,17	0,81	0,84	0,34	0,11	OK	16
1,65	-101,36	153,30	34,20	20,15	0,51	0,52	0,20	0,11	OK	48

Závěr a zhodnocení posudku

Závěrem mohou konstatovat, že navržený ocelový rám dle mého zjednodušeného posudku vyhoví. Na posouzeném nosníku v žádném bodě nevznikne taková kombinace napětí, aby byla překročena mez kluzu oceli. V nejkritičtějším místě, které se nachází přesně v polovině rozpětí nosník, je nosník využití na 92%, tudíž má pouze 8% rezervu. Je však potřeba říci, že výsledná rezerva by byla pravděpodobně vyšší, jelikož jsem ve svém posudku nepočítal s příčnými výztuhami a masivními ocelovými nohami.

Dále je potřeba říci, že by bylo potřeba posoudit železobetonové segmenty v okolí prostupu, zdali přenesou zatížení, která jsou do nich přenášena z ocelového nosníku. Tento posudek již není součástí mé diplomové práce.

8 Závěr

V této diplomové práci jsem se pokusil osvětlit problematiku rozevírání segmentového ostění. Přičemž jsme se nejprve zmínil o tom co je segmentové ostění, kde se používá a jakými metodami se realizuje.

Dále jsem se pokusil popsat některé historii i dnes používané metody týkající se zajištění segmentového ostění a pokusit se vystihnout jejich principy výstavby a jejich fungování.

Na závěr provedl alternativní zjednodušený posudek hlavních ocelových prvků navrženého dočasného ocelového rámu , který byl realizován v městě Baku. Abych rám mohl posoudit, tak jsem nejprve vytvořil několik sad výpočtu v programu PLAXIS 2D pomocí něhož jsem získal zatížení na ostění traťového tunelu. Poté jsem vytvořil 3D model v programu SCIA Engineer, kde jsem vymodeloval část traťového tunelu včetně použitých segmentu, velikosti navrženého prostupu a hlavních nosníků ocelového rámu. Z programu SCIA Engineer jsem dostal konkrétní vnitřní síly na nosnících a mohl jsem provést posudek na základě působících napětích.

9 Seznam použité literatury

- [1] ZÁVORA *Metro - Ražené tunely*. Praha: Dopravní podnik hlavního města Prahy, 1979.
- [2] ZÁVORA, K. RAŽENÍ TRAŤOVÝCH TUNELŮ PRSTENCOVOU METODOU NA TRASE I.C PRAŽSKÉHO METRA. *Tunel*, 2011, vol. 4, p. 108–111.
- [3] Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR. ; Česká tunelářská asociace ITA-AITES
- [4] GUGLIELMETTI, a kolektiv. *Mechanized tunnelling in urban areas*. 2007. ISBN 978-0-415-42010-5.
- [5] MAIDEL, a kolektiv. *Mechanise Shield Tunnelling*. 2nd ed. 2012. ISBN 978-3-433-02995-4.
- [6] <http://www.vip-polymers.com/products-item/tsg-information/> [online] [vid. 1.12.2016]
- [7] Mott MacDonald CZ, spol s r. o. Národní 984/15, Praha 1 Baku Metropolitan – General Segmental Lining Design
- [8] **Metrostav a.s.** Koželužská 2450/4 Praha 8, Prodloužení trasy A metra V Praze ze stanice Dejvická – VZT propojky mezi traťovými tunely
- [9] http://technet.idnes.cz/metro-petriny-nejvetsi-jeskyne-v-praze-fc2-/tec_reportaze.aspx?c=A121010_221752_tec_reportaze_rja [online] [vid. 28.11.2016]
- [10] SVOBODOVÁ, et al. Uvedení nového úseku metra V.A do provozu. *Tunel*, 2015, vol. 2, p. 12–23.
- [11] ČAJKA Trase metra V.A - zajištění ražby vzduchotechnických propojek pomocí sanační a těsnící horninové injektáže. *Zakládání*, 2013, vol. 3, p. 16–20.
- [12] VÍTEK Zajištění segmentového ostění TBM tunelů v okolí propojek. *Beton*, 2014, vol. 6, p. 46–49.
- [13] SCHULTE Sicherun von Öffnungen in Tübbingauskleidungen durch den Einsatz von Stahlbetontübbings mit Verschraubungselementen. p. 364–393.
- [14] Archiv společnosti HOCHTIEF CZ a.s. Plzeňská 16/3217 Praha 5
- [15] RŮŽIČKA, et al. Metro Baku: Návrh a realizace fialové linky. *Tunel*, 2012, vol. 2, p. 27–34.

[16] Mott MacDonald CZ, spol s r. o. Národní 984/15, Praha 1. Baku Metropolitan – Design criteria – Part 2

[17] Mott MacDonald CZ, spol s r. o. Národní 984/15, Praha 1. Baku Metropolitan – Statical analysis report: Temporary opening frame

[18] Mott MacDonald CZ, spol s r. o. Národní 984/15, Praha 1. Baku Metropolitan – Tunnell crosspassage – General Arrangement

[19] <http://www.groundloss.com/theory/> [online] [vid. 2.1.2017]

10 Seznam příloh

Příloha A – Grafické znázornění vnitřních sil z 2D modelů – hluboká propojka

Příloha B – Grafické znázornění vnitřních sil z 2D modelů – mělká propojka

Příloha C – Tabulky vnitřních sil na nosnících