VŠB- Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Segmentové ostění pro mechanizovanou ražbu

The Segmental Lining for Mechanised Tunnelling

Student: Tomáš Červený

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2015

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

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Červený**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R017 Geotechnika

Téma: Segmentové ostění pro mechanizovanou ražbu
The Segmental Lining for Mechanized Tunnelling

Zásady pro vypracování:

1, Úvod
2, Mechanizované ražení pomocí štítů
3, Segmentové ostění - materiál, výroba, těsnění
4, Instalace ostění
5, Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Bielecki, R. *Mechanized tunnelling and segmental lining*. WSDTI. Hamburg 2009. ISBN: 978-3-00-025435-2.
Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling* . Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.
R. R. Tatiya. Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment. A.A. BALKEMA PUBLISHERS LEIDEN. ISBN 90 5809 627 0
Uživatelská příručka CzTA - Mechanizované tunelování
Časopis Tunel

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

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

Datum zadání: 31.10.2014
Datum odevzdání: 04.05.2015

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA * OSTRAVA * Fakulta stavební

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

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě..... .....

podpis studenta

Prohlašuji, že

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

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

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

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

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

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

V Ostravě .....

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Ďurišovi, Ph.D, za jeho vedení, rady a poskytnuté materiály při tvorbě této práce.

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na segmentové ostění, které je instalováno během mechanizované ražby. Ostění je prováděno přímo za tunelovacím strojem a tvoří tak nedílnou součást této metody tunelovaní. Hlavní výhodou této metody je rychlost provádění, bezpečnost práce a ekonomické hledisko. Cílem této práce je popsání hlavních prvků, ze kterých se segmenty skládají. Jsou zde dále uvedeny materiály, ze kterých se ostění v dnešní době provádí a způsoby výroby tubingů. V České republice se tato metoda teprve rozvíjí a uvádí do praxe, z tohoto důvodu je zde uveden projekt, který se realizoval v nedávné době a to prodloužená trasa metra V.A v Praze. Na závěr jsou spočtena zatížení, která mohou působit na ostění při různých situacích.

Annotation

This bachelor work is focused on the segmental lining being installed in the course of mechanical tunnelling process. The lining is carried out directly behind the tunnelling machine, and creates an integral part of this tunnelling method. The main advantages of this method are the performance speed, the safety at work, and the economic point of view. The objective of this work consists in the description of the main elements from which the segments are composed, materials of which the lining is presently manufactured, and the tubing making process itself. In the Czech Republic this method is now in the state of development and putting in practice. This is also the reason for dealing with the project which was implemented in recent times, i.e. the V.A prolonged metro line in Prague. At the conclusion the loads which can act on the lining at various situations are calculated.

Klíčová slova

Mechanizované tunelování

Segmentové ostění

Zeminový štít

Podzemní stavby

Key Words

Mechanised tunnelling

Segmental Lining

EPB Shield

Underground Construction

Obsah bakalářské práce:

Seznam použitého značení 1
1 Úvod 3
2 Mechanizované ražení 4
2.1 Historický vývoj tunelovacích strojů a štítů 4
2.2 Tunelovací stroje 5
2.3 Základní rozdělení štítů 7
2.4 Druhy štítů 8
3 Segmentové ostění 12
3.1 Statický výpočet pro návrh ostění 12
3.2 Základní parametry pro statické posouzení segmentů 13
3.3 Analytické řešení ostění 14
3.4 Uspořádání a geometrie segmentů 15
3.5 Izolace segmentového ostění 17
3.6 Materiály segmentového ostění 22
3.7 Výroba segmentů 25
3.7.1 Oběžné (karuselové) zařízení 26
3.7.2 Stacionární zařízení pro výrobu segmentů 28
3.7.3 Popis forem pro segmenty 29
4 Instalace segmentového ostění 30
4.1 Systémy pro spojování segmentů 30
4.2 Výplňová injektáž za rub ostění 31
5 Příklad z praxe- Ražení jednokolejných tunelů metra A v Praze 33
5.1 Umístění stavby a zastižená geologie 33
5.2 Použité štíty 34
5.3 Segmentové ostění a jeho výroba 35
5.4 Výplňová injektáž 35
6 Stanovení zatížení působícího na tunel 36
6.1 Návrh segmentu 36
6.2 Zeminové prostředí 36
6.3 Výpočet zatížení 37
7 Závěr 44

8 Seznam použité literatury 45
8.1 Seznam obrázků 47

Seznam použitého značení

b	šířka segmentového ostění
Do	průměr segmentového ostění
EPBM	earth pressure balance
EPDM	ethylene propylene diene monomer
g	mrtvé zatížení
H	výška nadloží
HPV	hladina podzemní vody
K_0	součinitel bočního tlaku
p	celkový tlak
pe	zemní tlak
pg	reakce mrtvého zatížení u dna
pw	vodní tlak
q	celkový boční tlak
qe	boční tlak vyvozený zeminou
qw	boční tlak vyvozený vodou
Rc	poloměr těžiště
SM	shield machine
t	tloušťka segmentu
TBM	tunnel Boring Machine
TM	tunnel machine
γ	objemová tíha zeminy
γ_c	objemová tíha betonu

γ_{sat}	objemová tíha nasycené zeminy
γ_{su}	objemová tíha skeletu pod HPV
γ_{w}	objemová tíha vody
π	ludolfovo číslo
φ	úhel vnitřního tření

1 Úvod

Mechanizované tunelování patří pro své výhody ke stále využívanějším metodám ražby podzemních liniových staveb. Ve světě se stala tato metoda hojně používanou zejména díky rychlosti ražení, která je oproti konvenčním metodám několikanásobně větší. Další výhodou je snížení sedání na povrchu, což je v dnešní době při stavbě podzemních staveb v městských aglomeracích jedno z nejdůležitějších kritérií, se kterými musí zhotovitel počítat.

Segmentové ostění je nedílnou součástí mechanizovaného tunelování. Je instalováno přímo za tunelovacím strojem pomocí erektoru. V dřívějších dobách se segmenty vyráběly z ocelolitinových materiálů, ale kvůli špatné těsnosti a drahým nákladům na jejich výrobu se vývoj přesunul k betonu. Prstence tvořené betonovými segmenty dnes patří k nejvíce využívanému typu ostění. Každý projekt je jiný tudíž i volba materiálů, složení betonové směsi a způsob těsnění je otázkou pro ty nejschopnější projektanty a inženýry, kteří mají za úkol navrhnout nejlepší možnou variantu, z hlediska statického, mechanického, estetického a také ekonomického. Trendem posledních let se stává v oblasti materiálu segmentů rozptýlená výztuž, která může nahrazovat klasické armo koše z oceli vkládané do forem. Má mnoho výhod oproti klasickému betonu s výztuží a to hlavně po ekonomické stránce.

V České republice je tato metoda ve svých počátcích. Při ražbě prodloužené trasy metra V. A v Praze byly použity dva zeminové štíty, vyrobené firmou Herrenknecht AG, které byly v naší zemi použity vůbec poprvé a zdárně se jim bez větších problémů podařilo realizovat celou ražbu trasy v rekordním čase.

2 Mechanizované ražení

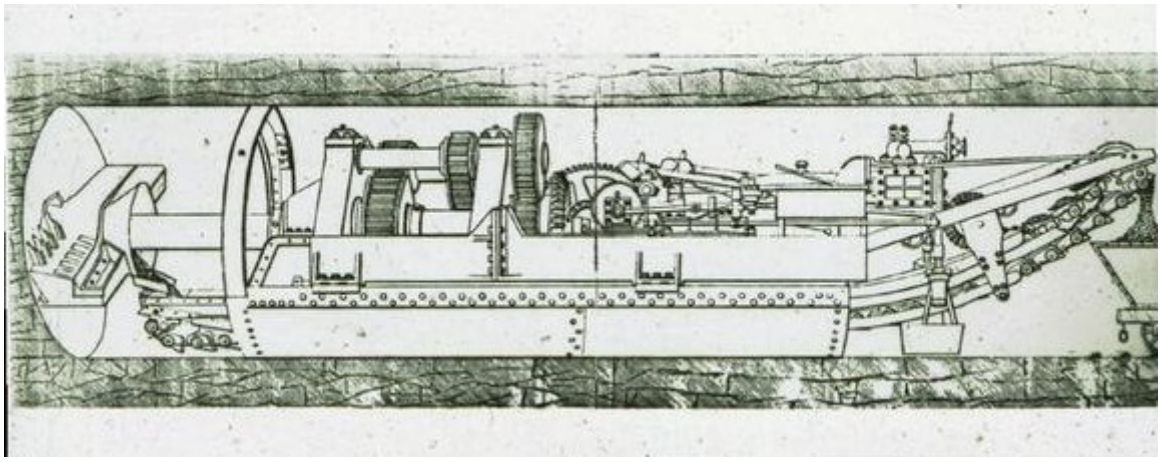
Principem mechanizovaného tunelování je kontinuální rozpojování horniny v celé čelbě tunelu bez pomoci trhacích prací. Vše je prováděno za pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů různých typů. Mezi hlavní výhody řadíme rychlost a bezpečnost.

Pro zajištění výrubu se používá segmentové ostění, které je skládáno do prstenců. Dříve se používaly segmenty z litinoocelových materiálů. V dnešní době se používají prefabrikované železobetonové segmenty nebo segmenty tvořené drátkobetonem.

2.1 Historický vývoj tunelovacích strojů a štítů

Velmi intenzivní vývoj zažívá tato metoda zejména v posledních třiceti letech. Historie plnoprofilových tunelovacích strojů sahá až k 1. polovině 19. století. Roku 1825 byl budován první tunel pomocí tunelovacího štítu pod Temží v Londýně. Jeho délka činila 460 metrů a byl dokončen v roce 1842. Štít byl tvořen železnou kazetovou konstrukcí a jeho pohyb zajišťovaly ruční lisy. Odpadala jakákoliv výdřeva a veškeré zednické práce se dělaly pod ochranou štítu. Stavba byla dokonce na 7 let přerušena díky dvojímu průvalu vody do tunelu. Po dokončení byl začleněn k londýnskému metru. V letech 1888 – 1890 byl realizován železniční tunel délky 1880 metrů poprvé pomocí zeminového štítu s přetlakem vzduchu o hodnotě 0,2 MPa. Ostění tvořily litinové tubingy. Zde uvedené tunely byly raženy pomocí nemechanizovaného štítu.

Po několika neúspěšných pokusech s nasazením mechanizovaných razících strojů, kdy se jim například zasekávaly dláta na řezné hlavě, a zbytek tunelu musel být vyražen konvenční metodou, přichází stroj Beaumont/English (obr. 1). V letech 1881–1882 byl tento razící stroj využit k ražbě průzkumné štoly pod kanálem La Manche. Tento stroj se pohyboval na kolejovém podvozku a měl dvouramennou vrtací hlavu s pevnými dláty, která se otáčela kolem své osy. V průběhu dvou let bylo vyraženo touto metodou necelých 4,5 km díla průměrnou rychlostí 15 metrů za den.

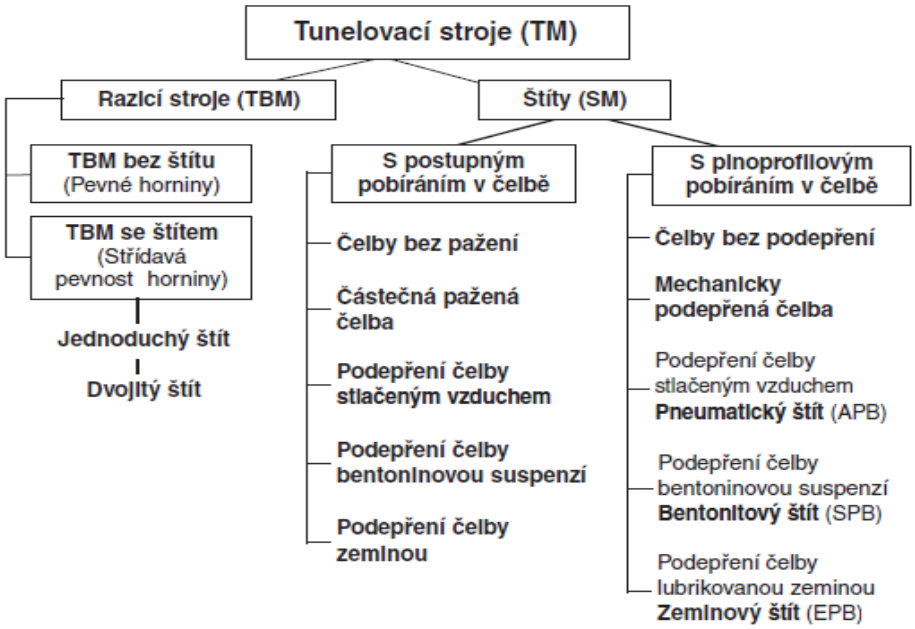


Obr. 1: Beaumont/English TBM [2]

Vývoj v následujících desetiletích pokračoval. Bylo představeno a nasazeno mnoho razících strojů, které měly větší i menší úspěch. Zásadní pokrok ve vývoji plnoprofilových mechanizovaných strojů přinesla 50. léta minulého století. Roku 1957 byl při ražbě stoky pod řekou Humber v Torontu nasazen stroj J. R. Robinsona, který osadil razící hlavu volně otočnými diskovými dláty. Tento typ dlát měl výrazně menší opotřebení a vyšší odolnost než dláta pevná. Stroj měl průměr 3,27 metrů a jeho postup byl v průměru 30 metrů za den v prostředí vápenců a pískovců. [1]

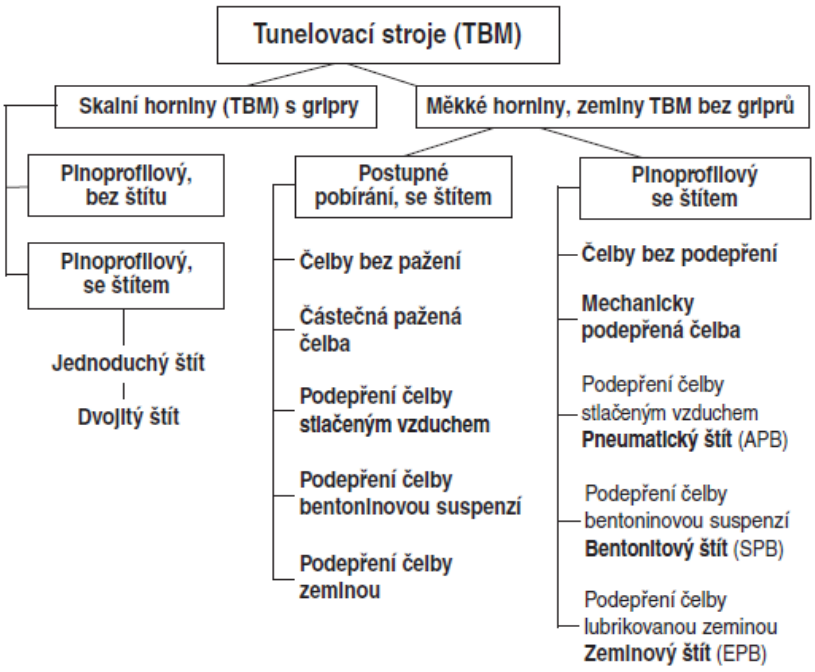
2.2 Tunelovací stroje

Rozlišujeme dva základní typy tunelovacích strojů. Razící stroje (TBM - Tunnel boring machine) a štíty (SM - Shield machine). Razící stroje používáme v pevných skalních horninách. V tomto případě není razící stroj nikterak chráněn vůči stabilnímu okolnímu horninovému masívu. Tunelovací stroje opatřené ochranným štítem tzv. štíty aplikujeme v málo pevných, poruchových zeminách a poloskalních horninách. Štít zde tvoří mechanickou ochranu pracoviště proti působení horninovému tlaku a nestabilnímu prostředí.



Obr.2: Evropské typové rozdělení tunelovacích strojů [1]

Typové rozdělení tunelovacích strojů je v dnešní době stále ještě nejasné. Rozlišujeme tzv. evropské a americké rozdělení. Dle evropského rozdělení jsou tunelovací stroje (TM) rozděleny na razící stroje a štíty. Toto typové rozdělení není však všemi akceptováno a v zahraničí jsou názory na význam slova TBM odlišné. Termínem TBM označují všechny tunelovací stroje (obr. 3). Dělí se tedy na razící stroje se štítem a razící stroje bez štítu. [1]



Obr. 3: Americké typové rozdělení tunelovacích strojů [1]

2.3 Základní rozdělení štítů

Mechanizované tunelovací stroje do málo pevných poruchových hornin a poloskalních hornin nazýváme štíty. Geologické poměry, ve kterých můžeme kupříkladu tyto mechanismy použít, jsou různé typy prachovců, pískovců, jílovců a jílovitých břidlic. Zeminové štíty rozdělujeme na:

- **štíty s postupným pobíráním v čelbě** rozpojují horninu postupně buď výložníkovou frézou nebo tunelbagrem. Tyto stroje mohou mít čelbu nepaženou, částečně paženou, podepřenou stlačeným vzduchem, bentonitovou směsí nebo samotnou zeminou,

- **štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě** byly technicky upraveny pro tunelování v nejrůznějších typech zemin a podskalních hornin, výrazně se uplatňují zejména v obtížných geologických podmínkách, například v zeminách silně nestabilních, silně propustných a zvodnělých.

Zeminové štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě rozdělujeme na dva základní typy. Štíty s nepodepřenou a podepřenou čelbou v celé ploše. Zeminové štíty s čelbou bez podepření můžeme využívat v zeminách a poloskalních horninách. Tedy v zeminách pevné až tvrdé konzistence, v nichž nehrozí nebezpečí závalu. V opačném případě, kdy štít razí profil v měkkých plastických až kašovitých zeminách, musí být opatřena celoplošná podpora čelby, aby nedošlo ke ztrátě její stability. Toto je zajištěno buď mechanicky, podepřenou čelbou nebo natlakovanými médii. Při mechanické podpoře čelby je zeminový štít na své čelbě uzavřen. V razící hlavě vystupují pouze loupací nože a nachází se zde malé štěrbiny, které umožňují vnikání do tunelovacího stroje. Druhý způsob, kterým můžeme stabilizovat čelbu je pomocí tlakových médií. Jedná se o zeminové štíty, pneumatické štíty a bentonitové štíty. Stabilizují čelbu a zabraňují vnikání přítoku vody do prostoru ražby. Tyto štíty v sobě mají zabudovanou přepážku, která odděluje prostor čelby, kde probíhá ražba pomocí razící hlavy. Přepážka dokonale těsní únik zeminy, bentonitové směsi nebo vzduchu. [1]

2.4 Druhy štítů

a) Pneumatický štít

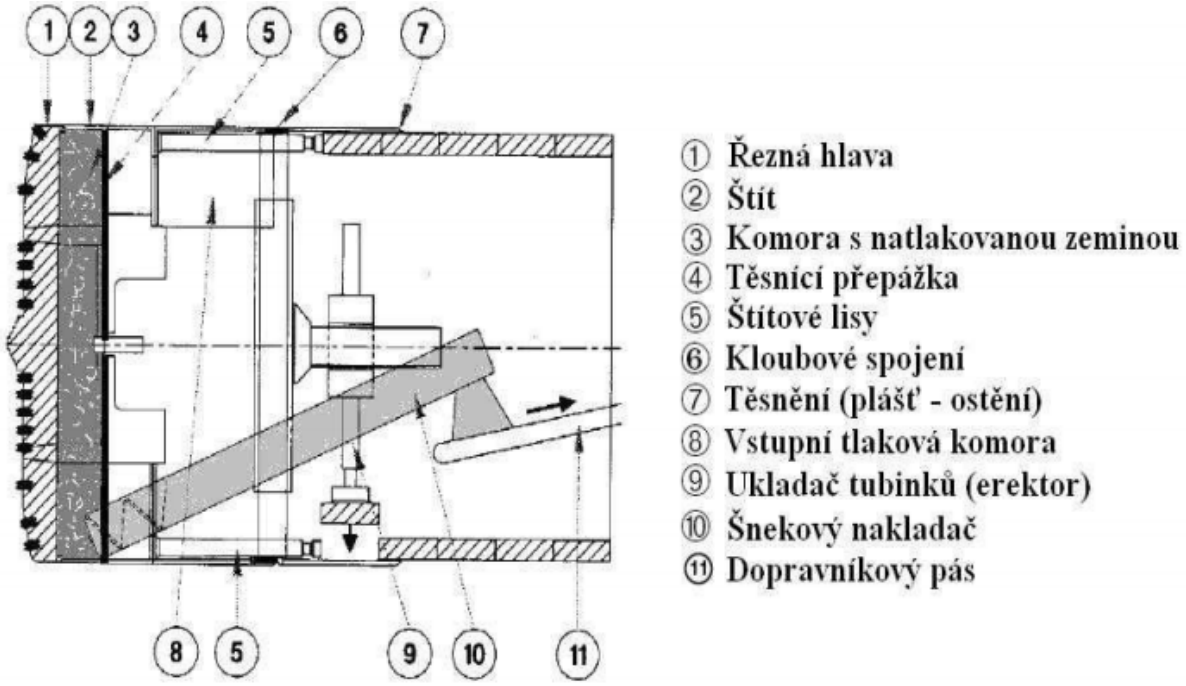
Pneumatický štít je vhodný do hrubozrnných zvodnělých zemin. Vzduchotěsná přepážka se nachází v břitové části štítu, takže pod přetlakem vzduchu je jen omezený prostor razící hlavy před čelem výrubu, zatímco pracovní prostor řízení stroje a výstavby ostění je v prostředí s normálním atmosférickým tlakem. [1]

b) Bentonitový štít

Bentonitový štít má podobné uspořádání jako pneumatický štít. V přetlakové komoře vytvořené vzduchotěsnou přepážkou se nachází natlakovaná bentonitová suspenze, v níž rozpojuje horninu rotující hlava. Tlak bentonitové suspenze vyvozený na čelo výrubu musí být vyšší, než je součet zemního a vodního tlaku. Existují dva druhy bentonitových štítů, které se liší v kontrole tlaku bentonitové suspenze. Japonský systém kontroly tlaku bentonitové suspenze tzv. slurry systém kontroluje tlak čerpadlem čerstvé bentonitové suspenze. Častějším způsobem kontroly tlaku suspenze je německý tzv. hydro systém, kdy se tlak kontroluje tlakem vzduchu na volnou hladinu suspenze. Výhoda bentonitu tkví v tom, že se odděluje od vytěžené horniny a můžeme ho tím pádem znovu použít. Bentonitové štíty jsou velmi komplexní tunelovací stroje, které lze využít například v propustných nesoudržných zeminách. [1]

c) Zeminový štít

Zeminový štít (obr. 4) pracuje na principu tlaku na čelo výrubu vytvořeného samotnou vytěženou zeminou. Přepážkou oddělená komora na čele štítu je trvale vyplněna rozpojenou zeminou. Pro vytvoření vhodné konzistence v komoře můžeme přidávat do zeminy vodu a stlačený vzduch pro vytvoření kašovité hmoty. Reakce vytvořená zeminou v komoře musí být větší než reakce od horninového masívu a podzemní vody před čelbou. Zeminový štít se používá převážně v poloskalních horninách a soudržných zeminách. Rubanina se průběžně odebírá šnekovým dopravníkem z tlakové komory. Zeminové štíty v dnešní době tvoří až 90% všech nasazených strojů s tlakovou kontrolou na čelbě. Z tohoto je tedy patrné, že patří k nejpoužívanějším plnoprofilovým štítům. [1]



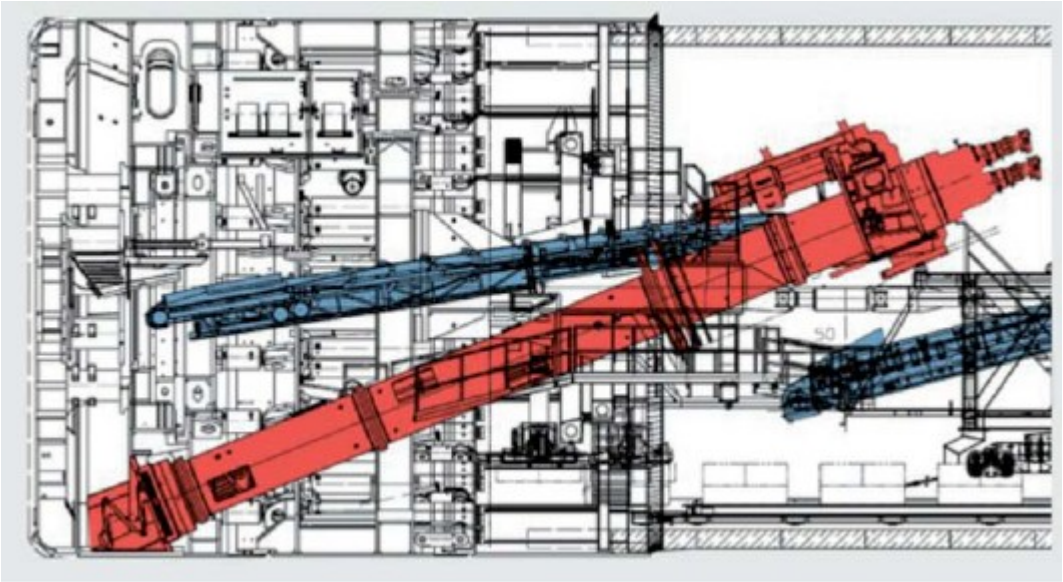
Obr. 4: Zeminový štít [1]

d) Kombinované štíty

Kombinovaný štít nám označuje více tunelovacích strojů v jednom. Stále častěji se při projektech setkáváme s obtížnější geologií a tak vyvstává otázka, zda nasadit více tunelovacích strojů, razit část projektu konvenčním způsobem např. novou rakouskou tunelovací metodou nebo použít kombinaci dvou tunelovacích strojů v jeden kompaktní, pro využití ve velmi obtížných a různorodých geologických podmínkách.

Znamená to použít kupříkladu **razící stroj (TBM) s jednoduchým štítem pro skalní podmínky v kombinaci se zeminovým štítem** v jednom kompaktním stroji (obr. 5). Tunelovací stroj pracuje ve dvou módech ražby. V módu pro ražení v zeminovém prostředí a v módu pro ražbu ve skalním prostředí. Nevýhodou ražby tímto strojem je časová náročnost na změnu módu, ve kterém bude probíhat ražba. Tento typ tunelovacího stroje je osazen dvěma dopravníky pro odtěžení rubaniny. Šnekový dopravník se používá při ražbě v zeminovém prostředí, tedy při ražbě zeminovým štítem. Pásový dopravník se používá při ražbě ve skalních podmínkách. Proces výměny probíhá tak, že se razí např. v módu zeminového štítu se šnekovým dopravníkem. V případě, že dochází ke změnám geologických podmínek, stáhne se šnekový dopravník tak, aby nezasahoval do odtěžovací komory a vysune

se přídavný pásový dopravník. Ať už z pásového dopravníku nebo ze šnekového dopravníku je rubanina přesypávána na stabilní pásový dopravník. [3]



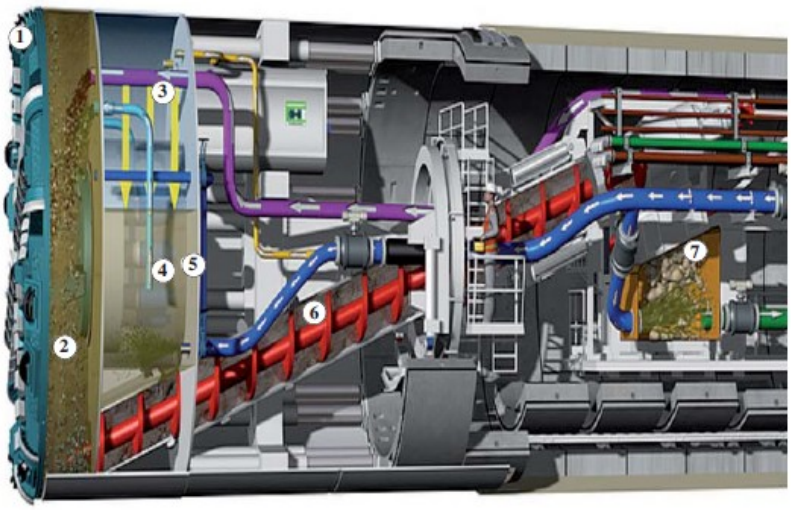
Obr. 5: TBM s jednoduchým štítem a zeminový štít [3]

Dalším typem kombinovaného štítu může být **razící stroj (TBM) s jednoduchým štítem a bentonitový štít**. Tento tunelovací stroj pracuje opět ve dvou módech. V módu pro zeminové prostředí a v módu pro skalní podmínky. Při ražbě v zeminovém prostředí jsou implementovány do stroje potrubí pro odtěžení rozplavené rubaniny s bentonitovou suspenzí. Pro odstranění rubaniny ve skalních podmínkách se používá pásový dopravník. V módu pro ražení ve skalních podmínkách musíme řeznou hlavu vystrojit pomocnými sběrači. Nevýhodou je opět časová náročnost v přepnutí módu mezi zeminovým a skalním prostředím.

Kombinace **bentonitového „hydro“ štítu se zeminovým štítem** má oproti předchozím kombinovaným štítům mnoho výhod. Hlavní výhodou je rychlost změny razícího módu. „U tohoto stroje je při změně módu nutno stáhnout pouze šnekový dopravník z odtěžovací komory a zaplnit zadní komoru částečně bentonitovou suspenzí a částečně tlakovým vzduchem. U obou typů ražeb je rubanina dopravována do rozplavovací jednotky, ve které se rozřeďuje přídavnou bentonitovou suspenzí tak, že lze vše dále dopravovat pouze potrubím. To přináší i úsporu místa ve stroji, které by jinak zabíral pásový dopravník, navazující na šnekový dopravník“. [1]

Kombinovaný štít nazývající se „**Variable Density TBM**“ patří mezi nejlépe technologicky navrhnuté kombinované štíty. Výhodou této technologie je eliminace času potřebného pro změnu módu ražby v různých geologických podmínkách. Další výhodou je jeho efektivní využití z hlediska nákladů.

Stroj je kombinací bentonitového „hydro“ štítu se zeminovým štítem a bez větších mechanických úprav může přepínat mezi čtyřmi různými druhy tunelování. Znamená to, že je stroj flexibilní vůči geologickým a hydrogeologickým změnám. Veškeré odtěžování rubaniny z čelby, je prováděno pomocí šnekového dopravníku, který je trvale osazen v odtěžovací komoře. Ten pobírá rubaninu z čelby v obou módech štítu. V bentonitovém módu dopravuje rubaniny do rozplavovací jednotky, odkud je čerpána potrubím ze stroje. [3]



Obr. 6: Variable Density TBM [1]

3 Segmentové ostění

Segmenty tvoří nedílnou součást řešení definitivní konstrukce ostění, při provádění mechanizovaných ražeb, ať už razícími stroji nebo zeminovými štíty. Ostění je budováno bezprostředně na místě ražby, přímo za tunelovacím strojem. Je tvořeno prstenci, které jsou složeny z jednotlivých prefabrikovaných, zpravidla železobetonových segmentů. Do požadovaných pozic se umisťují pomocí erektoru, což je hydraulické rameno v zadní části tunelovacího stroje. Segmenty jsou spojovány pomocí šroubů a prostor mezi jednotlivými dílci a okolním horninovým nebo zeminovým masívem je vyplněn výplňovou injektáží. [4]

Segmentové ostění tunelu musí tvořit po celou dobu své životnosti určité funkce. Hlavní funkcí ostění je trvalé vyztužení výrubu. Při ražbě plní funkci opory tunelovacího stroje, který je zapřen o kraj ostění lisy. Díky těmto lisům se může tunelovací stroj pohybovat vpřed. Poskytuje mu také stabilitu, aby nedocházelo k otočení stroje kolem své osy. Ostění musí zabraňovat průsakům podzemní vody do tunelu, tedy být nepropustné. [5]

3.1 Statický výpočet pro návrh ostění

Neexistuje univerzální metoda, kterou bychom mohli použít při každé situaci pro návrh segmentového ostění a to z toho důvodu, že každý projekt je ve své podstatě jedinečný a do návrhu nám vstupují odlišné faktory. Vycházíme tak především ze zkušeností projektantů a dodavatelů, kteří navrhovali nebo spolupracovali na předcházejících projektech tohoto typu. Před návrhem ostění bychom si měli uvědomit kritéria, které bude budoucí tunel splňovat. Především by nás měl zajímat druh provozu, který bude v tunelu aplikován. Dále jeho životnost a provozní požadavky. Požární bezpečnost, případně kritéria týkající se stykování ocelové výztuže segmentů. Měli bychom znát také seismicitu území i omezení týkající se geologie, hydrogeologie a podzemních staveb nacházejících se v blízkosti ražby. [5]

Při návrhu segmentu musíme zohlednit mnoho proměnných např. i transportní cyklus segmentu. Se segmenty je prováděno mnoho operací při transportu mezi výrobnou a erektorem. Segmenty jsou při tomto transportu vystavovány značným namáháním, které musíme zohledňovat při výpočtu jejich návrhu. Segmenty jsou vystaveny mnoha zatížením při sestavování pomocí erektoru. Při této operaci jsou segmenty zatíženy vlastní tíhou, kterou modifikujeme dynamickým součinitelem. Váhy segmentů se liší podle svých

rozměrů navržených v projektech. Příkladem mohou být segmenty na prodloužených jednokolejných tunelech metra V. A v Praze, kde byla maximální hmotnost segmentu 2996 kg. Dále se jedná o zatížení, které nám vznikají při stlačování izolace, při nárazech segmentů a v neposlední řadě o zatížení, které nám vzniká při spojování segmentů. Místům, kde jsou instalovány upínací systémy, bychom měli věnovat speciální pozornost. Může docházet k poškození segmentu vlivem lokálního nárůstu napětí. [1]

3.2 Základní parametry pro statické posouzení segmentů

a) Parametry charakterizující okolní masív

Při návrhu segmentového ostění je potřeba znát dokonale geologii a geologickou historii, ve které se bude nacházet. Geologie může být ovlivněna erozí, konsolidací nebo i tektonickými vlivy. Zásadní informací pro návrh ostění jsou fyzikální parametry masivu. Dynamické charakteristiky masívu nezanedbáváme, pokud se tunel nachází v seizmicky aktivní oblasti. Na ostění může působit hydrostatický tlak v podobě podzemní vody, se kterým musíme počítat při návrhu izolace mezi jednotlivými segmenty. V neposlední řadě musíme také počítat se smykovou pevností a tuhostí kontaktu mezi ostěním a masívem. [1]

b) Parametry betonu na segmenty

Vlastnosti železobetonu, drátkobetonu i ocelové výztuže jsou definovány platnými normami. [1]

c) Stálá zatížení

Mezi stálá zatížení řadíme vlastní tíhu konstrukce i tíhu pevného vybavení tunelu. Zatížení způsobené okolním masívem a konstrukcemi, které se nacházejí v blízkosti ostění. Musíme počítat také s hydrostatickým tlakem a zatížením, které vzniká při injektáži výplňového materiálu za rub ostění. [1]

d) Proměnlivá zatížení

Mezi proměnlivá zatížení, která působí na segmenty a musíme je tím pádem započítávat jako proměnné do výpočtu, se řadí dopravní zatížení uvnitř tunelu, zatížení působící na povrchu terénu, zatížení vzniklá během konstrukce. Velkým zatížením působí na ostění hydraulické

lisy, které jsou o něj opřeny při posunu stroje vpřed. Neměli bychom opomenout ani zatížení vzniklá během dopravy segmentu, což znamená jeho skladování, přemísťování i instalaci erektorem. [1]

e) Zvláštní zatížení

Mezi zvláštní zatížení, která mohou působit na navrhovaný tunel, můžeme přiřadit dopravní nehody, zemětřesení a exploze [1]

f) Kombinace zatížení

Jedná se o analýzu pomocí teorie dvou mezních stavů a umožní nám zajistit únosnost a použitelnost konstrukce. Pro oba mezní stavy jsou sestavovány kombinace zatížení.[1]

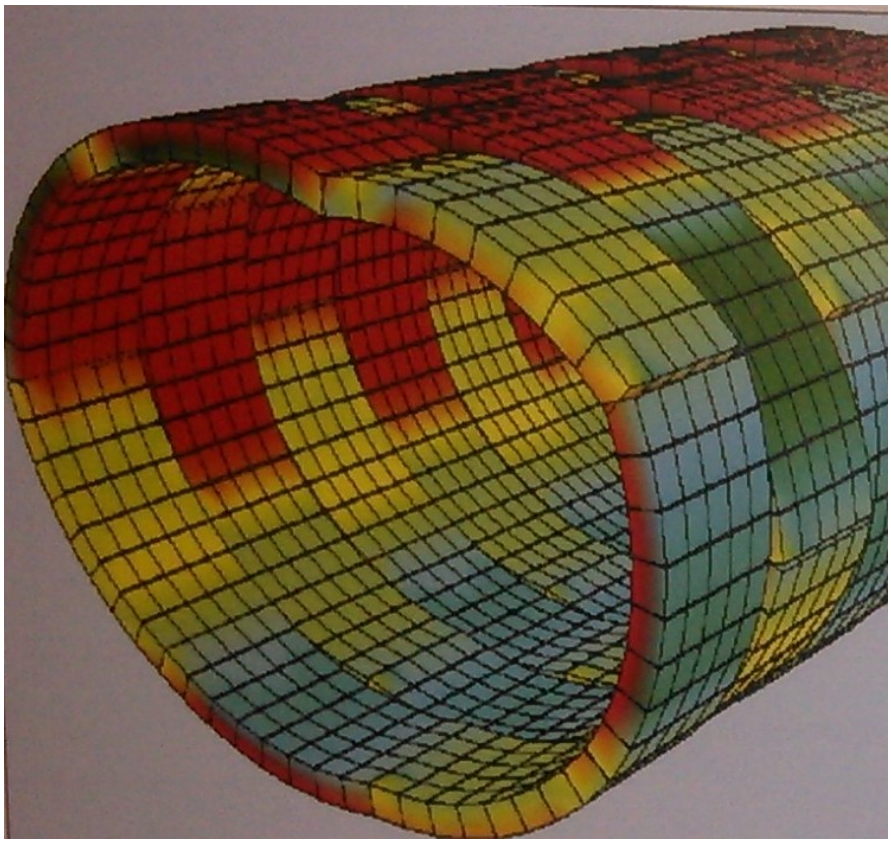
g) Mezní stav použitelnosti

Je zřejmé, že se ostění musí posoudit také na mezní stavy použitelnosti. Měli bychom zajistit, aby trhliny nebyly příliš rozevřené a návrh betonové směsi zohlednil okolní prostředí, ve kterém se ostění nachází. Okolní prostředí hraje v návrhu důležitou roli a např. v agresivnějším prostředí je omezení trhlin přísnější. Ostění navrhujeme podle mezního stavu omezení trhlin. [1]

3.3 Analytické řešení ostění

Jestliže řešíme ostění pomocí analytického řešení, považujeme okolní masív za spojitý či souvislý s odhlédnutím od možných, současně pozorovatelných diskrétních vlastností jeho struktury a lze jim stanovit vnitřní síly v ostění. Výhodou této metody je, že se může vyhodnotit vše v závislosti na čase. Pakliže dochází k deformaci ostění, umožňují modely redistribuci zatížení konstrukce (obr. 7). Při určování pevnostních či deformačních vlastností daného masivu se využívá široká škála materiálových modelů pro zeminy a horniny. Díky těmto metodám můžeme také detailně modelovat poměry na čelbě a fáze ražby. V dnešní době je nejpoužívanější metodou pro výpočet, metoda konečných prvků. Díky těmto metodám můžeme řešit dané příklady až ve třech dimenzích. Lze je použít pro ostění různé tuhosti, pro libovolnou hloubku, ve které se tunel nachází a také pro nehomogenní masivy. Při tvorbě modelů dochází k určitým zjednodušením, u kterých určité parametry nebo materiálové charakteristiky zanedbáváme a neuvažujeme o nich. Nezohledňujeme možné

tolerance v umístění segmentů. Zanedbáváme počáteční deformace po instalaci segmentů a každý segment není uvažován samostatně.



Obr. 7: Trojrozměrný model segmentového ostění [5]

3.4 Uspořádání a geometrie segmentů

a) Příčné uspořádání

Tento pojem nám definuje počet a rozložení segmentů v rámci jednoho prstence. Počet v jednom prstenci je závislý zejména na průměru tunelu. Často se snažíme o co nejmenší počet v rámci jednoho prstence z důvodu vyšší tuhosti a menší deformace ostění. Pro malý tunel o průměru 2 – 5 m je vhodný počet segmentů 4 až 5 + 1 nebo 5 až 6 + 0, pro střední tunel 5 - 8 m volíme 6 až 7 + 0 a pro větší průměr než je 8 m volíme 6 až 8 + 1 nebo 7 až 9 + 0. Toto označení nám určuje počty segmentů v prstenci. Tedy prstenec skládající se z počtu 5 + 1 určuje 5 segmentů stejného tvaru a délky + 1 segment uzavírací. [1]

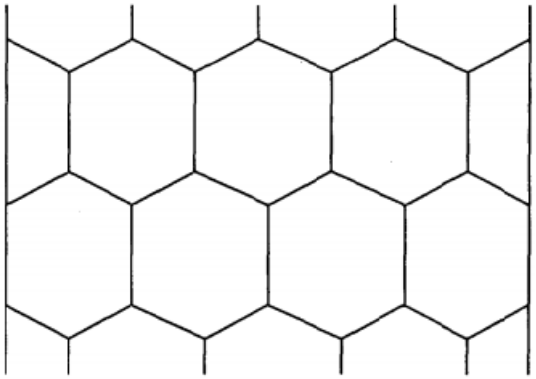
b) Podélné uspořádání

Podélné uspořádání udává tvar jednotlivých prstenců jdoucích za sebou a tvoří tak niveletu tunelu. Z hlediska podélného uspořádání rozdělujeme segmenty do skupin:

- s univerzálním prstencem,
- s pravostranným a levostranným prstencem,
- s neskoseným prstencem. [1]

c) Geometrie segmentů

Z hlediska geometrie rozlišujeme dva základní typy, mezi které se řadí obdélníkové a hexagonální segmenty (obr. 8). Obdélníkové segmenty se v dnešní době používají při stavbě dopravních tunelů. Hexagonální typ se využívá při stavbě hydrotechnických tunelů a jejich hlavní výhodou je provádění ražby během instalace ostění a menší počet segmentů v prstenci. [1]



Obr. 8: Hexagonální typ [7]

d) Uzavírací segment

Jedná se o segment, který se do ostění vkládá jako poslední a může se mu říkat i klenák (obr. 9). Jednou z možností zasunutí klenáku do ostění je ve směru normály, tedy na směr tunelu, kdy je sklon ložných spár upraven tak, aby bylo možné segment zasunout. Častěji se využívá klenák, který má sklon ložných ploch standardně ve směru ve směru normály, ale ty jsou ukloněny šikmo vůči podélné ose tunelu. Prvek je staticky stabilní, jelikož je v prstenci oboustranně zaklíněn.

Klenák může mít teoreticky stejnou délku jako základní segmenty, ale častěji se volí menší a to o polovinu nebo třetinu. Sklonění spáry klenáku lze stanovit v závislosti na velikosti tunelu, tloušťce ostění, délce a počtu segmentů v prstenci a velikosti klenáku. Pozice, ve které se tento segment nachází, může být libovolná v celém obvodu prstence, tudíž se může nacházet i v dolní části. [1]

Obr.9: Uzavírací segment [8]

3.5 Izolace segmentového ostění

Moderní segmentové ostění se těsní průběžnými těsnícími profily vyrobenými z elastomerů. Segmentová těsnění se v průběhu doby vyvíjela tak, aby odpovídala stále rostoucím požadavkům kladených na moderní tunelové stavitelství. Přes veškeré zkušenosti získané v průběhu více než 40 let je možno konstatovat, že ukončení tohoto vývoje nebylo dosud dosaženo. [5]

Nepropustnost ostění se dosahuje dvěma způsoby. Jednak samotnými segmenty a nepropustnou izolací (obr. 10), která je vložena mezi segmenty. Izolace je ve většině případů z elastomerů, což jsou pryžové těsnící pásky. Může být samozřejmě i z jiných materiálů, jako jsou bobtnající materiály. Izolace je obtažena okolo segmentu dvěma způsoby.

Může být obtažena okolo poloviny segmentu (jednovrstvý systém) nebo okolo celého segmentu (dvouvrstvý systém). [1]

Obr. 10: Segmenty osazené izolací [12]

Těsnění z pryžového materiálu vkládána do drážek v segmentu

a) Výroba

Segmentová pryžová těsnění se vyrábějí z elastomerů technologií vytlačování. Materiál se vulkanizací nevratně propojí, čímž dochází ke vzniku trvalých pružných vlastností. [5]

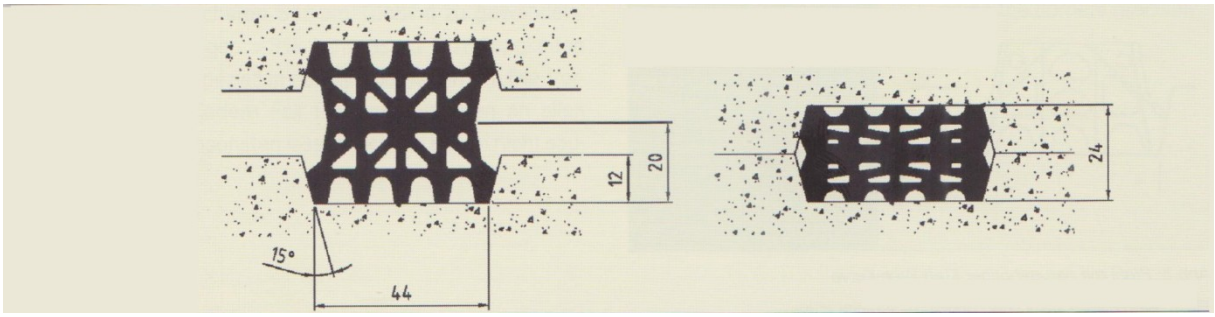
b) Konstrukce a materiál

Převážně se jako elastomer pro těsnicí rám používá EPDM. Tento syntetický kaučuk se vyznačuje vynikajícími vlastnostmi ve vztahu ke stárnutí a chemické odolnosti. Zvláště je v tomto ohledu třeba vyzdvihnout:

- vynikající odolnost vůči ozónu a kyslíku,
- vynikající odolnost vůči stárnutí při nepříznivých povětrnostních podmínkách,
- dobrá odolnost vůči vysokým teplotám, jak v suchém, tak i ve vlhkém prostředí,
- dobrá odolnost vůči nízkým teplotám,
- vysoká odolnost vůči trvalým deformacím,

- dobré mechanické vlastnosti a vysoká pružnost i při delším stárnutí,
- vysoká nepropustnost vody.

Aby bylo možno provést kompresi těsnicích profilů, jsou tyto profily opatřeny podélnými dutinami a žebry. Jen na základě nich je možno realizovat příslušnou deformaci profilů (obr. 11). Pro projektanta je důležitá skutečnost, že objem těsnění je menší, než minimální objem geometrie drážky. Pokud masivní průřez profilu těsnění překračuje minimální průřez geometrie drážky, dochází rychle k narůstající vratné síle. V extrémním případě dochází přitom k odlupování těsnění.



Obr.11: Izolace před/po stlačení [5]

Jako negativní vlastnosti je možno uvést nízkou odolnost vůči uhlovodíkům, minerálním olejům a malou odolností vůči ohni. Poslední vlastnost, tedy odolnost vůči ohni je možno výrazně zlepšit přísadami pro ochranu vůči ohni [5]

c) Montáž

Těsnicí rámy se nalepují na segmenty prostřednictvím lepidla doporučeného výrobcem. Úkolem těchto lepených spojů je především fixovat tyto rámy až do montáže. Při stavbě prstenců působí napětí již při minimálním kontaktu s těsnicím profilem. Maximální hodnoty dosahují tato napětí při montáži spojovacích prvků. Přitom nesmí docházet k velkoplošnému uvolnění rámu v podélné mezeře, ani v prstencové mezeře spoje, jinak by nebylo možno zajistit požadovaný dosed. Je třeba využít personál, který je vyškolený ve stavbě prstenců a dá rovněž pozor na usazení těsnění. Lepidlo, těsnicí materiál, druh lepeného spoje, případně i mazivo, je třeba považovat za součásti systému těsnění, který může optimálně fungovat jen tehdy, když jsou dodrženy specifikace dodavatele těsnění. [5]

Speciální profily

a) Kotvená těsnění

Kotvená těsnění se při betonování pevně a neoddělitelně spojují se segmentem (obr. 12). V tomto případě odpadají veškeré práce, které jsou obvykle potřebné pro přípravu a lepení těsnicího rámu. Způsobuje to dosáhnutí podstatně větší jistoty montáže při výrobě prstenců v důsledku až pětkrát vyšší pevnosti proti vytrhávání rámu v porovnání s kontaktním lepením. Vedle hospodářských efektů patří k výhodám i to, že se zde nepoužívají lepidla obsahující rozpouštědla a není potřeba žádný materiál na údržbu a opravu drážek, což je opět výhodné z hlediska zdraví a bezpečnosti práce.

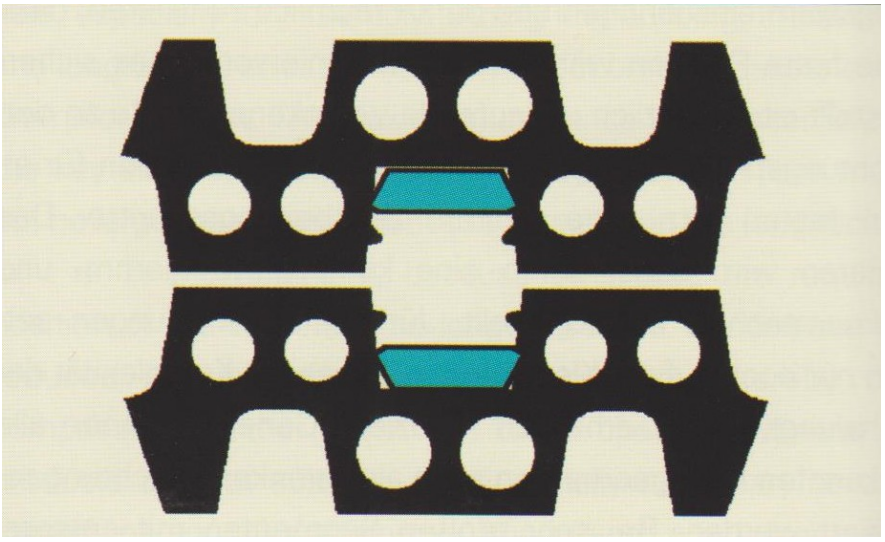
Obr. 12: Kotvené těsnění [5]

Skutečná výzva při použití kotvicích těsnění spočívá však v zásadně odlišné konstrukci bednění. Tento princip se zakládá na koncepci, při níž se těsnění umísťuje do rámu ještě před betonováním a tímto způsobem se zajišťuje jeho přesná poloha při betonování. Přídavné kotvící patky kolem těsnicích profilů určují po odstranění bednění jejich přesnou polohu, aniž by bylo třeba dalších provozních operací. Fixace je tak zajištěna kombinací spojovací a podtlakové techniky. Poslední vývoj se však omezuje pouze na spojovací techniku, čímž dochází ke snížení komplexnosti účinku. Všeobecně je možno realizovat všechny známé geometrie profilů. V současné době se odhaduje, že používání kotvících těsnění je možno realizovat bez problémů až po šířku drážky 36 mm. [5]

b) Těsnění s bobtnajícími materiály

Stále častěji - a to především v Asii - se používají těsnění, které mají schopnost bobtnání (obr. 13). V závislosti na konstrukci se tyto oblasti vyrábějí buď společným vytlačováním, nebo se používají pásy, které se vkládají těsně před stavbou prstenců a jsou schopny bobtnání. Tím se efektivně zamezuje jejich předčasnému nabobtnání. Tato těsnění musí i bez vlivu bobtnajícího materiálu splňovat specifické požadavky, aby se použitím bobtnajícího materiálu dosáhlo pouze vyšší bezpečnosti v rámci nerovnoměrností daných stavbou.

V současné době existuje mnoho různých druhů materiálů, které bobtnají při působení vody. Tyto materiály jsou zpravidla vyrobeny na bázi jiných elastomerů, než je samotné těsnění. Pouze několik málo bobtnajících materiálů se vyrábí na bázi upřednostňovaného elastomeru EPDM. Proto je obtížné dělat jakékoli prognózy týkající se chování těchto materiálu v rámci delšího časového úseku. Z tohoto důvodu mají také údaje o maximálním možném nabobtnání, ve vztahu k použití při provádění těsnění v rámci stavebních prací, jen malou vypovídací schopnost. Rovněž je důležitý tlak při bobtnání materiálu a stabilita těchto vlastností při opakovaných fázích bobtnání a následného sušení. [5]



Obr. 13: Pryžové těsnění s bobtnajícím páskem [5]

3.6 Materiály segmentového ostění

Ve stejnou dobu jako řízené zeminové štíty představeny v minulém století bylo rovněž vyvinuto vodotěsné tunelové ostění použitím litinových segmentů. Asi před čtyřiceti lety cena tvárné litiny pro tyto segmenty stoupla natolik, že se začaly paralelně vyrábět vyztužené betonové segmenty. Metoda výroby vyztužených betonových segmentů se postupem času vyvíjela a zdokonalovala. Jako těsnění se začal používat pryžový materiál. Tímto vývojem byly železné materiály postupně nahrazeny z trhu segmentového ostění. [5]

Základním stavebním materiálem moderního segmentového ostění je beton. V současné době se jako výztuž ostění používá nejvíce ocel. A to ve formě klasických armo košů, rozptýlené výztuže nebo v kombinaci obou předešlých případů. Jednotlivé typy vyztužení mají své výhody i nevýhody a při návrhu je potřeba zohlednit řadů vlivů, které nám budou působit na ostění po celou dobu jeho existence v tunelu. [1]

a) Klasické železobetonové segmenty

Klasický železobetonový segment se skládá z betonu a oceli. Beton se skládá ze stejných složek jako v případě jiných betonových konstrukcí. Pro různé konstrukce segmentů sestavujeme řadu specifických doporučení ke složení betonu. Jelikož budou segmenty v mnoha případech vystaveny účinkům agresivní podzemní vody, je třeba dbát na to, abychom tomu uzpůsobili i návrh segmentů. Cement by se měl používat základní a rychle tuhnoucí. Pro železobetonové segmenty nejčastěji navrhujeme a užíváme beton s označením C 30/37 a C 50/60. Výroba ocelových armokošů (obr. 14) probíhá v armovací hale, kde jsou jednotlivé části vázány na základě výkresů výztuže pro jednotlivé segmenty. Následně je armokoš přepraven a umístěn do betonářské formy v betonářské hale. Ocelová výztuž se může chránit nátěry, epoxy obalem, pokovením nebo může být katodicky chráněna. Musí být navržena tak, aby odolávala místním podmínkám a to zejména agresivitě okolního prostředí. Obvyklá hodnota krytí se pohybuje v rozmezí 20-30 mm. [1,9]

Obr. 14: Armovací koš pro segmenty [9]

b) Segmentové ostění s rozptýlenou výztuží

Segmentové ostění s rozptýlenou výztuží můžeme nazývat také jako segmentové ostění z drátkobetonu. Drátkobeton je nový konstrukční materiál, kterým se začíná nahrazovat standardní železobeton. Drátky jsou rovnoměrně rozptýleny a ztužují strukturu prostého betonu, který tak mění na houževnatý drátkobeton.

U drátků musíme zajistit, aby jejich délka byla přibližně trojnásobkem maximální velikosti zrna kameniva. Drátky bývají na svých koncích ohnuté nebo rozšířené (obr. 15). Nejběžnější je typ s ohnutými konci. Drátky ohýbáme na koncích nebo rozšiřujeme z důvodu zajištění dostatečné odolnosti vůči vytrhnutí drátku. Je to způsobeno deformováním ohnutého konce, až do zcela rovného tvaru, čímž se právě zvětšuje jeho odolnost proti vytrhnutí. Jeden ze způsobů jak dávkovat drátky do segmentů je pomocí slepení drátků lepidly, které jsou rozpustné vodou. Tyto svazky se během míchání rozlepí a rovnoměrně rozmístí v betonové směsi.

Obr. 15: Drátky jako rozptýlený výztuž [9]

Beton používaný při výrobě drátkobetonových segmentů by měl být třídy v rozmezí C 40 - C 60. Dávkování vláken se určuje pomocí teorie McKee, kdy minimální množství vláken v kg/m^3 betonu závisí na jejich délce a tloušťce. Kvalita vyztužení se určuje pomocí hustoty drátků, která se určuje podle vzdálenosti mezi jednotlivými vlákny. Velmi důležité je zajistit dobrou soudržnost drátků s betonem, dostatečnou zpracovatelnost směsi a hlavně rovnoměrné rozmístění drátků v betonové směsi.

Využívání drátkobetonu jako segmentového ostění tunelu je ve světě rostoucím trendem vzhledem k možným výhodám, které nabízí oproti klasickým železobetonovým segmentům. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit chování, trvanlivost, požární odolnost, jednoduchou výrobu a nižší spotřebu oceli. [9]

c) Plastová vlákna v železobetonu

Mezi plastové materiály přidávané do betonu můžeme zařadit polypropylénová vlákna. Neslouží jako nosná výztuž betonových konstrukcí, jelikož se při nízkém zatížení značně doformují, ale přidávají se do betonu z důvodu zvýšení požární odolnosti. Při vzniku požáru v tunelu se plastová vlákna roztavují a vzniká tak síť pórů, kudy může pronikat vzniklá vodní pára, čímž se zabrání odpryskům betonu.

d) Srovnání drátkobetonových a železobetonových segmentů

Cenové zhodnocení těchto dvou druhů segmentů vyznívá o něco lépe ve prospěch drátkobetonu. Ocelové drátky jsou sice dražší než klasická ocelová výztuž, ale nižší nároky na práci, skladování a manipulace s drátky nám zajišťují menší náklady než s klasickou

výztuží. Dochází také k úspoře vlastní oceli, což má pozitivní vliv na redukci emisí vznikajících při její výrobě. Počet poškozených segmentů při montáži je nižší.

U drátkobetonu při dosažení pevnosti betonu v tahu deformace nevzrostou skokově, ale díky rovnoměrně rozmístěným drátkům narůstá deformace pozvolna. Celková pevnost v tahu (ohybu) je výrazně nižší než u železobetonu. V druhém případě u železobetonových segmentů, dochází při dosažení pevnosti v tahu k plné aktivaci výztuže. Drátkobetonové ostění pro své vlastnosti využijeme spíše v podmínkách s nízkým ohybovám namáháním, kam kruhové ostění z prefabrikátů obecně patří. Pokud hrozí vznik většího ohybového namáhání, je nutné opatřit drátkobetonové segmenty i klasickou prutovou výztuží. [9]

3.7 Výroba segmentů

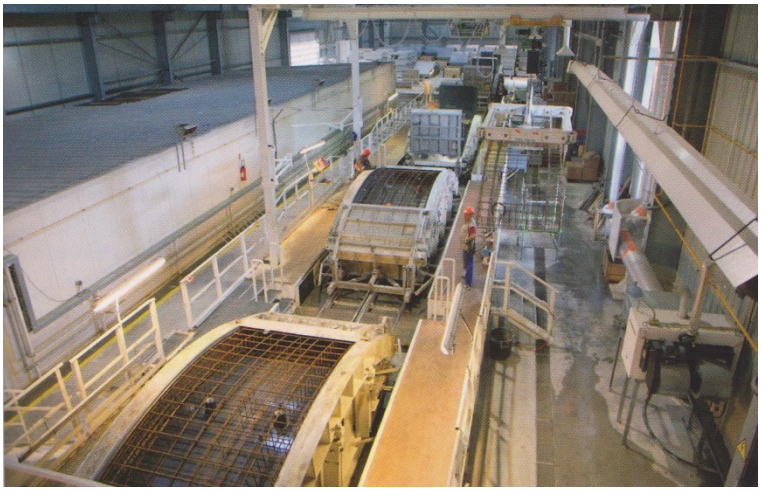
Výroba segmentů se musí provádět za kontrolovaných a stálých okolních podmínek, tj. základním předpokladem je výroba v uzavřených a vytápěných halách. Optimální výroba je taková, při níž je výrobní proces každého prstencovitého segmentu přibližně stejný. To se rovněž vztahuje na teplotu haly, teplotu čerstvého betonu, dobu vytvrzování a dobu skladování ve skladech pro vyzrávání. Základem pro všechny segmenty stejného typu tedy je, aby jejich deformace z procesu tvrdnutí a ze smršťování byly shodné. Tyto předpoklady ulehčují porovnatelnost kontrolních měření geometrie segmentů. [5]

Doba a množství výroby

Celkové výrobní množství stavebního projektu se vypočítá z délky tunelu, šířky segmentu a počtu segmentů na prstenec, přičemž některé z těchto segmentů mohou představovat speciální segmenty. Protože segmenty mají komplikovaný vnější tvar a musí být vyráběny v ocelových formách, je nezbytné předem stanovit, kolik jich je v tunelu třeba denně, a kolik jich tedy musí být vyrobeno. [5]

3.7.1 Oběžné (karuselové) zařízení

Jedná se o cyklické zařízení pro výrobu segmentů, v rámci něhož formy pro výrobu železobetonových segmentů procházejí několika stanicemi (obr. 16), aby v dané době jednoho cyklu byl vyroben alespoň jeden železobetonový segment. Výhoda tohoto typu zařízení spočívá v tom, že každou formu je možno použít více než jednou, tj. v rámci jednoho pracovního chodu je možno vyrobit několik železobetonových segmentů. Kapacita oběžného zařízení slouží pro přípravu odpovídajícího počtu forem, které jsou přizpůsobeny konkrétnímu projektu. [5]



Obr. 16: Oběžný typ výroby [5]

Hlavní funkce oběžného zařízení zahrnují:

- několik pracovních stanic pro otevírání forem, odbednění, instalace armatury a vestavěných součástí, betonážní stanice, různé stanice pro úpravu povrchu,
- dvě přepravní troleje pro transport forem do vytvrzovací komory a zpětný transport do pracovní linky,
- přepravní linka nebo převodní linka, včetně těsnicí stanice.

Tyto stanice disponují také pomocnými a pracovními prostředky, jako jsou upínací zařízení. Forma postupně dostane do různých pracovních stanic v následujícím pořadí. [5]

a) Vyztužovací stanice (vložení armatur)

Drátěné koše se dopravují ze skladu k přívodnímu vedení. Jednokolejnicová dráha s mechanickým upínacím zařízením zde koše převezme a transportuje k připravené formě v betonážní stanici pracovní linky. Armatura a vestavěné díly se následně instalují do formy. Po této operaci se provede kontrola rozměrů a tolerancí, včetně správné polohy vložené armatury. [5]

b) Betonážní stanice

Forma postupuje do betonážní stanice, v níž se naplní prostřednictvím zařízení umístěného mimo halu betonem. Beton se dopravuje pomocí koreček do trychtýře nad formou. Forma se naplní betonem a bezprostředně se setřese, aby se dosáhlo většího stupně zhutnění betonu. [5]

c) Stanice pro úpravu povrchu

V následujícím kroku se provádí úprava povrchu železobetonového segmentu (vnější strana) ve formě. Povrch se v této stanici ručně vyhlazuje a provádí se jeho konečná úprava. Kromě toho se odstraňuje přebytečný beton. [5]

d) Vytvrzovací stanice

Forma se prostřednictvím přepravní troleje dostává do vytvrzovací stanice za účelem odpovídajícího vytvrzení. Ve vytvrzovací komoře jsou formy tepelně zpracovány tak, aby byla dosažena co možná největší pevnost betonu. Kromě toho se spodní část forem ohřeje tak, aby se zvýšila teplota betonu a v důsledku toho se při odbednění dosáhlo vyššího stupně pevnosti betonu. Následně se forma přepraví pomocí přepravní troleje zpět do pracovní linky. [5]

e) Odbedňovací stanice

Poslední stanice, kterou musí projít železobetonové segmenty, je stanice pro odbedňování formy. Prostřednictvím podtlakového přístroje se provede odbednění segmentu, který se následně přepraví do další stanice. Po odbednění a transportu k přepravní lince se segment dostává k další stanici, kde se provede jeho očištění, nanese se na děj dělicí prostředek (oddělovač) a provede příprava k další betonážní operaci. [5]

f) Přepravní linka / transport do skladu

Přepravní linka se používá k pootočení železobetonového segmentu, např. o 180^0, aby se dostal do skladovací polohy (vnitřní stranou nahoru) pro 28 denní finální skladování. [5]

3.7.2 Stacionární zařízení pro výrobu segmentů

Stacionární zařízení pro výrobu segmentů se obvykle zřizuje ve výrobní hale, v níž se formy upevní k podlaze (obr. 17). I přes to dokáže zařízení vykonat všechny pracovní operace potřebné pro výrobu segmentů. Formy se plní na místě a jsou zde i odbedněny, aniž by musely projít fází transportu po ukončení tvrdnutí. Teprve pak se transportují prostřednictvím přepravní linky.[5]

Obr.17: Formy připevněné k podlaze [5]

Ke komponentům stacionárního zařízení pro výrobu segmentů patří:

- stacionární formy ve výrobní hale, kde jsou podrobeny pracovním operacím potřebným pro výrobu segmentů,
- vibrační systémy a systémy pro tepelné ošetření,

- skladovací oblast pro předběžné skladování železobetonových segmentů na dobu dvou až tří dnů,
- linka na dopravu betonu nebo přepravní linka a stanice pro nanesení těsnění. [5]

3.7.3 Popis forem pro segmenty

Formy se vyrábějí na základě geometrie prstence dané příslušným projektem. Koncepce forem umožňuje snadnou manipulaci a obsluhu, aby tak při provozu nedocházelo k jejím deformacím nebo poškozením. Koncepce výroby forem garantuje dodržení příslušných tolerancí segmentu v rámci trvání celého projektu. Každá forma je opatřena identifikačním číslem, které se skládá ze sériového čísla a typu formy. Štítek s těmito informacemi se nachází na dně formy. Tyto informace slouží k označení odpovídající železobetonového segmentu. Veškeré styčné plochy formy s betonem se mechanicky obrábějí s vysokou přesností, aby bylo možno dodržet přípustné tolerance. Povrchy forem včetně nelakovaných mechanických dílů se opatřují povrchovou antikorozní ochranou. Stykové plochy s betonem se zušlechťují bezbarvým antikorozním ochranným prostředkem, případně olejem. [5]

4 Instalace segmentového ostění

Prstenec složený ze samostatných segmentů se zbuduje postupně od osazení prvního segmentu s přikládáním dalších až po závěrečný specifického tvaru tzv. klenáku, který se vkládá ve směru podélné osy tunelu od stroje směrem k hotovému ostění. Segmenty se ukládají na předem stanovené místo pomocí erektoru, což je hydraulické rameno ovládané speciálně vyškoleným pracovníkem. Pro stabilizaci samotného segmentu se používají spojovací šrouby, kterými se dosáhne spojení segmentů k sobě. Poté aplikujeme výplňovou injektáž mezi vnější povrch segmentů a vyraženou horninu.

4.1 Systémy pro spojování segmentů

Jednotlivé segmenty mezi sebou spojujeme v podélném i příčném směru. Spojování provádíme z důvodu udržení přípustné tolerance při ukládání segmentů, k udržení vodní izolace ve stlačeném stavu a také k zajištění stability segmentu během usazování prstence. Životnost všech spojovacích materiálů by měla být obecně dimenzována tak, aby bylo dosaženo stejné životnosti jako ostění tunelu. [1]

a) Šroubové spoje

Na vnitřní straně ostění se nachází předem připravené kapsy, přes které jsou upevňovány šrouby nebo tyče se závitem. Ke spojení segmentů se používají rovné šrouby a zakřivené šrouby. Rovné šrouby jsou upevňovány z vnitřní strany segmentů a mohou být upevněny přímo do betonu nebo do ocelových desek instalovaných v segmentech. Zakřivené šrouby dovolují, aby byl prostor pro upevnění segmentu menší. Šrouby, které jsou instalovány do nátrubku, jsou natočeny šikmo vůči střednici tunelu. Šroub je našroubován do nátrubku, který se nachází ve druhém segmentu. Tento mechanismus nám umožňuje provádět upínací práce až po instalaci celého prstence. [1]

b) Kolíky, trny a jejich deriváty

Systém trnových spojů nabízí oproti šroubovým spojům mnoho výhod:

- jednodušší instalace segmentů,
- přesnější určení vzájemné polohy segmentů,
- vyšší smyková tuhost,
- bezpečnost personálu.

Tyto systémy mohou odebírat stupně volnosti a to z důvodu znemožněného pozdějšího odstraňování těchto systémů, což může vyústit v další přídavná napětí v ostění. [1]

4.2 Výplňová injektáž za rub ostění

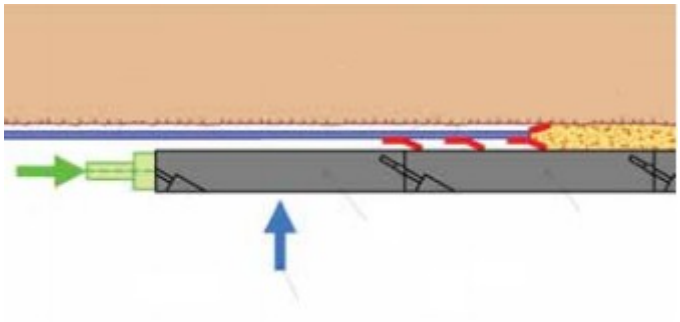
Výplňovou injektáž provádíme z důvodu, abychom vyplnily vzniklou mezeru mezi segmentovým ostěním a masivem. Z krátkodobého hlediska nám injektážní materiál zajišťuje usazení segmentu před konvergujícím masivem, čímž redukuje nebezpečí sednutí segmentu. Zamezuje se sedání povrchu minimalizací deformací okolního masívu. Z dlouhodobého hlediska zajišťuje injektážní materiál jednotnou vazbu mezi ostěním a okolním masívem. [1]

Injektáž je prováděna při ražbě a to buď skrz předem připravené otvory v segmentech nebo pomocí injektážních trysek, které se nachází v koncové části štítu. V prvním případě se jedná o tradiční postup využívaný před zavedením tlakového štítu s kontrolou na čelbě. Tomuto typu injektáže se také říká kontinuální způsob a lépe reguluje sedání okolního masivu. Tlak a množství injektovaného materiálu se liší podle podmínek, v nichž je projekt situován a je nutné je monitorovat během provádění konstrukce. Kvalitu provedené injektáže můžeme provádět pomocí jádrových vrtů, ovšem za cenu porušení segmentů. [10]

Složení injektážní směsi se určuje zkouškami a je třeba brát v úvahu ohleduplnost k životnímu prostředí. Směs by měla být dostatečně tekutá, aby dokonale vyplnila prostor vzniklého nadvýlomu. Měla by být přiměřeně vazká, aby nedocházelo k protékání směsi zpět. Doba tuhnutí musí odpovídat rychlosti ražby. [10]

Existují dva základní typy materiálů, kterými provádíme injektáž. Jedná se o jednosložkovou a dvousložkovou injektážní hmotu. Jednosložková injektážní hmota je na bázi cementových

malt, kde jsou hlavními složkami kamenivo, cement, voda a přísady upravující tuhnutí. Dvousložková injektážní hmota je na bázi gelů, kde hlavní přísady tvoří voda, cement, bentonit a gelovací přísada, která se přidává do směsi až v injektážní hlavici. Hlavními výhodami je její snadná doprava do tunelu čerpáním v potrubí a rychlé gelování směsi, které vede ke snížení rizika rozplavení podzemní vodou. K další výhodě patří úspora času. [11]



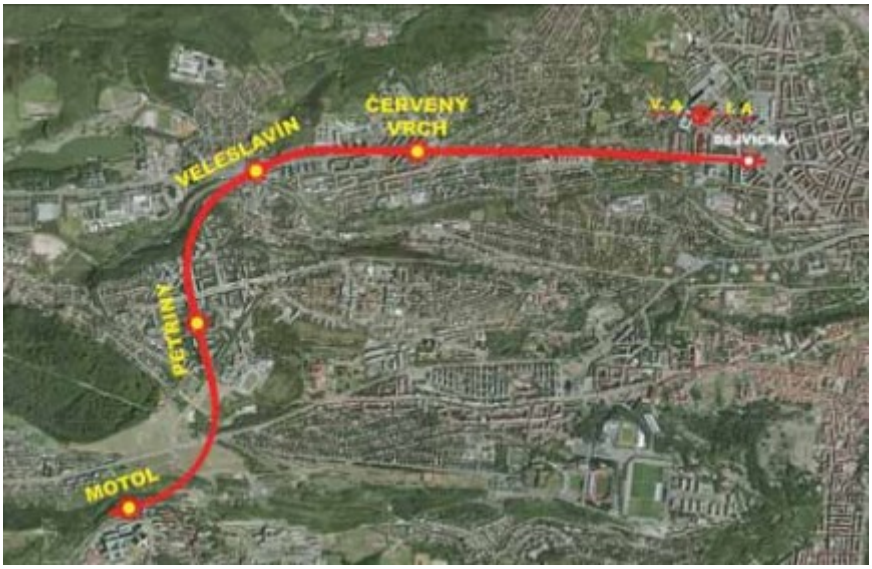
Obr. 18: Aplikace injektážní směsi [12]

5 Příklad z praxe- Ražení jednokolejných tunelů metra A v Praze

Jedná se o projekt prodloužení trasy metra A v Praze ze stanice Dejvická do stanice Motol. Pro ražbu byla použita technologie EPB, která se použila v České republice poprvé. S realizací ražby se začalo v dubnu roku 2011 a její dokončení trvalo přibližně 20 měsíců, kdy se razilo přes 8 km trasy tunelů. Zhotovitelem tohoto projektu se stala firma Metrostav a. s.

5.1 Umístění stavby a zastižená geologie

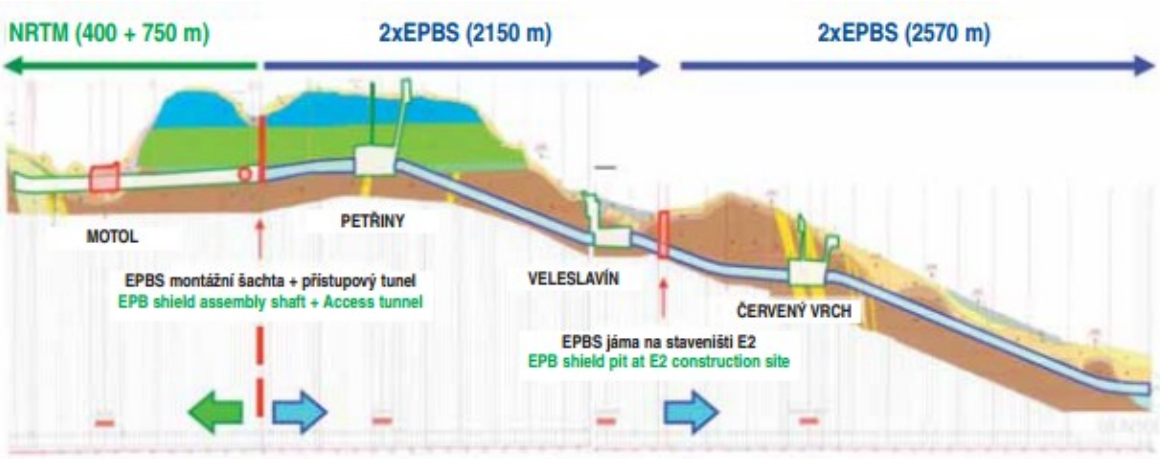
V tomto úseku se nacházejí tři ražené stanice (Petřiny, Veleslavín a Červený Vrch) a jedna hloubená stanice (Motol) (obr. 19) a (obr. 20). Zeminové štíty byly nasazeny na trase Dejvice - Petřiny a úsek Petřiny – Motol se razil pomocí nové rakouské tunelovací metody. [12]



Obr. 19: Trasa prodlouženého metra V.A. [12]

Geologie této části Prahy je složena převážně vrstvami prachovců, pískovců a jílovitých břidlic různého stáří a stupně zvětrání. V tomto prostředí byly již v Praze postaveno kilometry tunelů. Problémem při ražbách bylo vzájemné uložení vrstev. Z těchto důvodů byly ražby

v takové geologii často doprovázeny velkými přítoky vody shromažďované na pomezí vrstev prachovců a pískovců. Další část ražeb byla vedena v prostředí silně zvětralých, až rozložených břidlic doplněných o křemence. V poslední fázi ražeb byla významná část horninového prostředí tvořena kvartérními sedimenty.



Obr. 20: Podelný řez metra V. A [13]

Z hydrogeologického hlediska se jednalo o prostředí s výskytem zvodní. Zvodně se v kvarterních sedimentech nacházely v celém zájmovém území až před stanicí Dejvická. Úroveň ustálené hladiny podzemní vody se předpokládala v rozmezí cca 5 – 11 m. [13]

5.2 Použité štíty

Pro tento projekt byly vyrobeny dva zeminové štíty EPBM o průměru 6080 mm a délce stroje přesahující 100 m německou firmou Herrenknecht AG. Řezná hlava je rozdělena do tří celků pro usnadnění její demontáže po ukončení ražeb. Osazena je sedmnácti dvojitými valivými dláty a čtyřmi jednoduchými obrysovými dláty, které lze vysunout a zvětšit tak ražený průměr na 6100 mm. O pohon hlavy se stará šest hydraulických motorů s příkonem 1200 kW a šestnáct dvojic hydraulických pístů generuje maximální přítlak na čelbu 39000 kN. Aby nedocházelo k vnikání rubaniny nebo vody do hlavního ložiska, je tento systém chráněn ztrátovým kanálkovým mazáním. Jelikož je stroj dovážen po částech a k jeho složení dochází na staveništi, musela být vybudována speciální montážní šachta průměru 21 m a hloubky 34 m (obr. 21) a montážní komora sloužící jako dvoukolejný tunel, ve které docházelo ke kompletaci stroje. [14]

Obr. 21: Montážní šachta [15]

5.3 Segmentové ostění a jeho výroba

Ostění na prodloužené trase metra V.A je navrženo jako železobetonové prefabrikované. Prstence se skládají ze šesti segmentů, jež jsou označené jako A1, A2, A3, B, C a K. Vnější průměr prstence je 5800 mm, zatímco vnitřní průměr činí 5300 mm. Šířka prstence je 1500 mm a tloušťkou 250 mm. Beton je použit třídy C 50/60 XA2, XC3 - Cl 0,20 a výztuž je pevnosti B500 B. Jednotlivé segmenty vznikají ve stacionárních formách. Každá je přichycena k deskám, které jsou kotvené v podlaze pomocí tlumičů vibrací. Formy jsou vybaveny příložnými pneumatickými vibrátory. Denní produkci činní 54 segmentů a musí být dodrženy velmi přísné maximální výrobní odchylky. [14]

5.4 Výplňová injektáž

V tomto případě vznikalo volné mezikruží mezi zhotovenými segmenty a horninou o rozměru 13 cm, které bylo potřeba v co nejkratší době vyplnit. Jako injektážní směs se využívala dvousložková výplňová malta. Složka A se skládala z vody, cementu, bentonitu, plastifikační a stabilizační přísady. Promíchávala se na staveništi v přesných hmotnostních poměrech podle zvolené a předem odzkoušené receptury a pomocí potrubního vedení se čerpala do tanků umístěných v razícím štítu. Těsně před vyplněním prostoru za ostěním se dávkovala složka B, kterou je urychlovací přísada vedená ke stroji z kontejneru samostatným potrubím. Tímto je zajištěno, že malta co nejdříve ztuhne a získá své pevnostní vlastnosti co v nejkratší možné době. [14]

6 Stanovení zatížení působícího na tunel

Na následujících dvou případech zjistím vliv působící od zatížení zeminy, případně vody na fiktivním tunelu. Pro samotný výpočet je nutno znát rozměry navržených segmentů a parametry zeminového prostředí, ve kterém bude daný tunel situován. V obou případech je tunel umístěn v písčitém prostředí. V prvním případě je hladina podzemní vody nad terénem, z čehož lze usoudit, že se nachází např. pod řekou. Ve druhém případě jde o výpočet zatížení bez hladiny podzemní vody, tedy jen samotné zeminy vyvozující tlak na ostění.

6.1 Návrh segmentu

Průměr segmentového ostění: Do = 4,5 m

Šířka segmentu: b = 1,1 m

Tloušťka segmentu: t = 0,25 m

Poloměr těžiště: Rc = 2,125 m

Objemová tíha betonu: $\gamma_c = 25$ kN/m^3

6.2 Zeminové prostředí

Směrné normové charakteristiky zeminy jsou odhadnuty na základě neplatné normy ČSN 731001.

Nadloží: H = 10 m

Hladina podzemní vody: HPV = 1,5 m

Objemová tíha vody: $\gamma_w = 10$ kN/m^3

Objemová tíha zeminy: $\gamma = 18{,}5$ kN/m^3

Objemová tíha nasycené zeminy: $\gamma_{sat} = 20{,}5$ kN/m^3

Objemová tíha skeletu pod HPV:

$$\gamma_{su} = \gamma_{sat} - \gamma_w \qquad (1)$$

$$\gamma_{su} = 20{,}5 - 10 = 10{,}5 \text{ kN/m}^3$$

Úhel vnitřního tření: $\varphi = 34^0$

Součinitel bočního tlaku v klidu pro nesoudržné zeminy:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \qquad (2)$$

$$K_0 = 1 - \sin 34 = 0{,}49$$

Přitížení: $po = 20\ kN/m^2$

6.3 Výpočet zatížení

Všechny výpočty uvedené v příkladech a) i b) jsou provedeny na základě pokynů pro navrhování ostění tunelu, mezinárodní tunelovou asociací. [7]

a) Výpočet zatížení od zeminy a vody nacházející se nad úrovní terénu

Mrtvé zatížení:

$$g = b \cdot \gamma c \cdot t \qquad (3)$$

$$g = 1{,}1 \cdot 25 \cdot 0{,}25 = 6{,}88\ kN/m^2$$

- Reakce mrtvého zatížení u dna:

$$pg = \pi \cdot g \qquad (4)$$

kde:

π značí Ludolfovo číslo

g vypočtená hodnota na základě vzorce (3)

Výpočet podle vzorce (4):

$$pg = \pi \cdot 6{,}88 = 21{,}61\ kN/m^2$$

Vertikální tlak na korunu tunelu:

- Zemní tlak:

$$pe_1 = b \,.\, (po + \gamma_{su} \,.\, H) \tag{5}$$

$$pe_1 = 1{,}1 \,.\, (20 + 10{,}5 \,.\, 10) = 137{,}5 \text{ kN/m}^2$$

- Vodní tlak:

$$pw_1 = b \,.\, \gamma_w \,.\, Hw \tag{6}$$

$$pw_1 = 1{,}1 \,.\, 10 \,.\, 11{,}5 = 126{,}5 \text{ kN/m}^2$$

- $$p_1 = pe_1 + pw_1 \tag{7}$$

kde:

p_1 je součtem zemního a vodního tlaku na korunu tunelu ve vertikálním směru

Výpočet dle vzorce (7):

$$p_1 = 137{,}5 + 126{,}5 = 264 \text{ kN/m}^3$$

Vertikální tlak na dno tunelu:

- $$p_2 = p_1 + pg \tag{8}$$

kde:

p_2 je součtem zemního a vodního tlaku na korunu tunelu ve vertikálním směru s reakcí mrtvého zatížení u dna

Výpočet dle vzorce (8):

$$p_2 = 264 + 21{,}6 = 285{,}6 \text{ kN/m}^2$$

Boční tlak v koruně tunelu:

- Zemní tlak:

$$qe_1 = b \,.\, K_0 \,.\, [po + \gamma_{su} \,.\, (H + \frac{t}{2})] \quad (9)$$

$$qe_1 = 1{,}1 \,.\, 0{,}49 \,.\, [20 + 10{,}5 \,.\, (10 + \frac{0{,}25}{2})] = 68{,}08 \text{ kN/m}^2$$

- Vodní tlak:

$$qw_1 = b \,.\, \gamma_w \,.\, (Hw + \frac{t}{2}) \quad (10)$$

$$qw_1 = 1{,}1 \,.\, 10 \,.\, (11{,}5 + \frac{0{,}25}{2}) = 127{,}88 \text{ kN/m}^2$$

- $$q_1 = qe_1 + qw_1 \quad (11)$$

kde:

q_1 je součtem zemního a vodního bočního tlaku v koruně tunelu

Výpočet dle vzorce (11):

$$q_1 = 68{,}08 + 127{,}88 = 195{,}96 \text{ kN/m}^2$$

Boční tlak na dno v tunelu:

- zemní tlak:

$$qe_2 = b \,.\, K_0 \,.\, [po + \gamma_{su} \,.\, (H + Do - \frac{t}{2})] \quad (12)$$

$$qe_2 = 1{,}1 \,.\, 0{,}49 \,.\, [20 + 10{,}5 \,.\, (10 + 4{,}5 - \frac{0{,}25}{2})] = 92{,}14 \text{ kN/m}^2$$

- vodní tlak:

$$qw_2 = b \,.\, \gamma_w \,.\, (Hw + Do - \frac{t}{2}) \quad (13)$$

$$qw_2 = 1{,}1 \,.\, 10 \,.\, (11{,}5 + 4{,}5 - \frac{0{,}25}{2}) = 174{,}63 \text{ kN/m}^2$$

- $q_2 = qe_2 + qw_2$ (14)

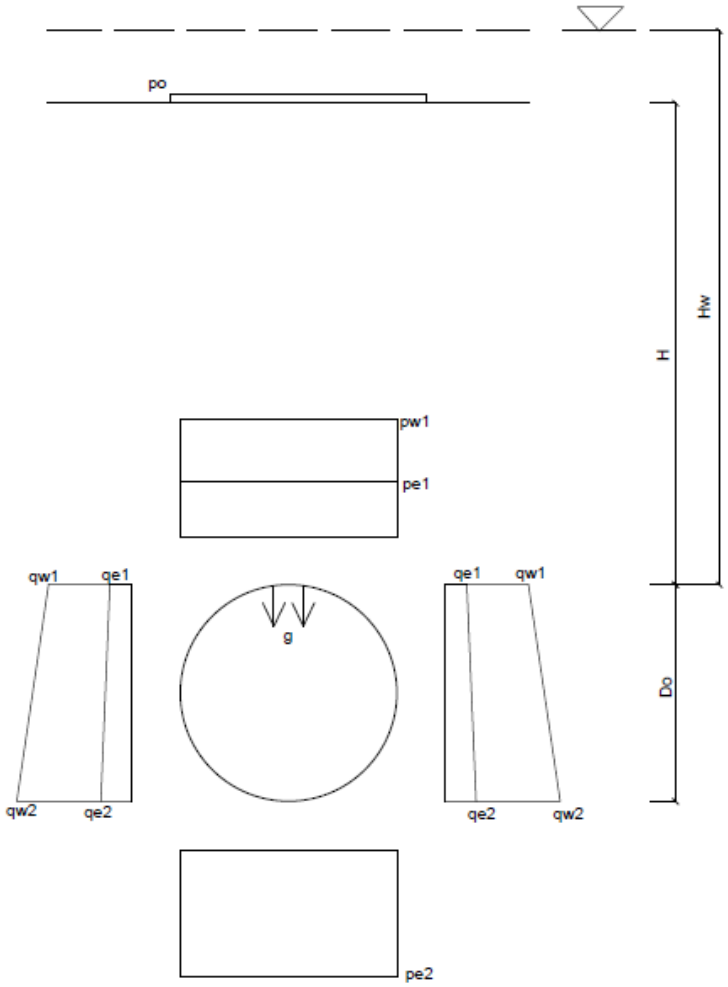
kde:

q_2 je součtem zemního a vodního bočního tlaku na dno tunelu

Výpočet dle vzorce (14):

$$q_2 = 92{,}14 + 174{,}63 = 266{,}77 \text{ kN/m}^2$$

Všechny vypočtené zatížení jsou schematicky znázorněny na (obr. 22).



Obr. 22: Schematické znázornění zatížení příkladu a)

b) Výpočet zatížení zeminy bez hladiny podzemní vody

Mrtvé zatížení:

Výpočet dle vzorce (3):

$$g = 1{,}1 \cdot 25 \cdot 0{,}25 = 6{,}88 \text{ kN/m}^2$$

- Reakce mrtvého zatížení u dna:

Výpočet dle vzorce (4):

$$pg = \pi \cdot 6{,}88 = 21{,}61 \text{ kN/m}^2$$

Vertikální tlak na korunu tunelu:

- Zemní tlak:

$$pe_1 = b \cdot (po + \gamma \cdot H) \qquad (15)$$

$$pe_1 = 1{,}1 \cdot (20 + 18{,}5 \cdot 10) = 225{,}5 \text{ kN/m}^2$$

- Vodní tlak:

$$pw_1 = 0 \text{ kN/m}^3$$

- Výpočet dle vzorce (7):

$$p_1 = 225{,}5 + 0 = 225{,}5 \text{ kN/m}^3$$

Vertikální tlak na dno tunelu:

- Výpočet dle vzorce (8):

$$p_2 = 225{,}5 + 21{,}61 = 247{,}11 \text{ kN/m}^2$$

Boční tlak v koruně tunelu:

- Zemní tlak:

$$qe_1 = b \,.\, K_0 \,.\, [po + \gamma \,.\, (H + \frac{t}{2})] \qquad (16)$$

$$qe_1 = 1{,}1 \,.\, 0{,}49 \,.\, [20 + 18{,}5 \,.\, (10 + \frac{0{,}25}{2})] = 111{,}74 \text{ kN/m}^2$$

- Vodní tlak:

$$qw_1 = 0 \text{ kN/m}^3$$

- Výpočet dle vzorce (11):

$$q_1 = 111{,}74 + 0 = 111{,}74 \text{ kN/m}^2$$

Boční tlak na dno v tunelu:

- Zemní tlak:

$$qe_2 = b \,.\, K_0 \,.\, [po + \gamma \,.\, (H + Do - \frac{t}{2})] \qquad (17)$$

$$qe_2 = 1{,}1 \,.\, 0{,}49 \,.\, [20 + 18{,}5 \,.\, (10 + 4{,}5 - \frac{0{,}25}{2})] = 154{,}12 \text{ kN/m}^2$$

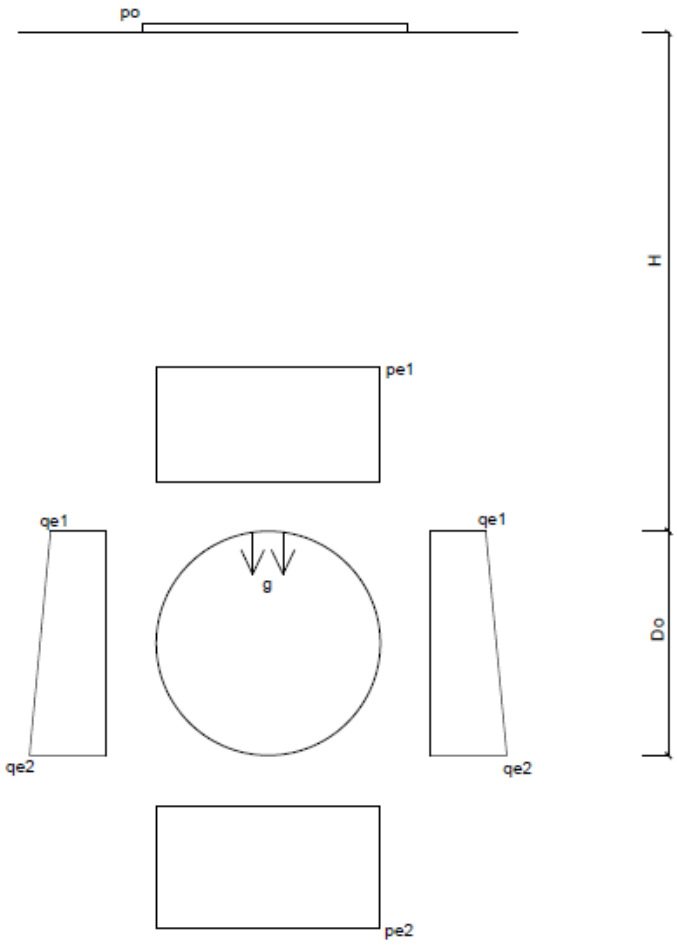
- Vodní tlak:

$$qw_2 = 0 \text{ kN/m}^3$$

- Výpočet dle vzorce (14):

$$q_2 = 154{,}12 + 0 = 154{,}12 \text{ kN/m}^2$$

Všechny vypočtené zatížení jsou schematicky znázorněny na (obr. 23).



Obr. 23: Schematické znázornění příkladu b)

Byl proveden ruční výpočet pro stanovení zatížení prstence od okolního prostředí na základě pokynů pro navrhování ostění tunelu, mezinárodní tunelovou asociací. Výpočet byl stanoven pro 2 varianty, ve kterých by se mohl fiktivní tunel nacházet. Na základě určených hodnot zeminového prostředí s nacházející se podzemní vodou i bez ní vyplývá, že zatížení způsobené v případě prvním, tedy vodou + zeminou je větší, než zatížení vyvozené na ostění složené z prstenců jen samotnou zeminou. Další výpočty pro stanovení vnitřních sil v segmentech ostění, by se musely provádět analytickým řešením.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nastínit segmentové ostění pro mechanizovanou ražbu, která je stále více upřednostňována před klasickými konvenčními metodami. Zeminové štíty tvoří drtivou část všech tunelovacích strojů, které se používají k rozpojování masivu.

Segmentové ostění z železobetonu nebo z drátkobetonu zaznamenalo během posledních let význačný vývoj a při provádění mechanizovaného ražení je tou nejlepší možnou alternativou zabezpečení výrubu. V dnešní době se návrh ostění neobejde bez analytického řešení, kdy můžeme pozorovat různé situace a chování segmentů, což dopomáhá k nejlepšímu možnému návrhu a předcházení nebezpečných situací. Technologie ochrany proti podzemní vodě nacházející se okolo tunelu je dosti propracovaná díky mnohaletému vývoji. Toto vše spolu tvoří dohromady s výplňovou injektáží, prováděnou po instalaci segmentů, téměř dokonalý soulad a vše je navrženo pro maximální bezpečnost, ekonomičnost a účelnost budoucího tunelu.

V České republice bylo poprvé použito ostění z železobetonu při ražbě prodlouženého metra V.A v Praze. Projekt realizován pomocí této metody splnil všechna svá očekávání a díky použitým moderním technologiím nedocházelo k sedání na povrchu v městské aglomeraci větším, než byly povoleny. V této chvíli dochází k realizaci nových železničních tunelů Ejpovice na modernizované trati Rokycany - Plzeň. Z tohoto můžeme usoudit, že se metody mechanizovaného tunelování začínají více prosazovat i v naší republice.

Z výpočtů zatížení na prstence ostění vyplývá, že zatížení způsobené nacházející se vodou a okolní zeminou je větší, než zatížení způsobené pouze zeminou. Způsob výpočtu vnitřních sil v ostění je složitější a vyžaduje analytické řešení např. pomocí MKP.

Vývoj mechanizovaného ražení i segmentového ostění jde stále kupředu a nové technologické postupy i materiály na sebe nenechají dlouho čekat.

8 Seznam použité literatury

[1] BARTÁK, Jiří. *Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR*. Vyd. 1. Praha: Česká tunelářská asociace ITA-AITES, 2014, 100 s. Dokumenty České tunelářské asociace ITA-AITES, sv. 7. ISBN 978-80-260-5957-8

[2] The 2010 Harding Lecture (Part 1). [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.tunnelsonline.info/features/the-2010-harding-lecture-part-1/image/the-2010-harding-lecture-part-1-4.html

[3] Multi-mode TBM Flexible machine technology for highly variable ground. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: https://www.herrenknecht.com/en/innovation/research-development/machines-components/multi-mode-tbm.html

[4] WP4: Využití vláknobetonu pro ostění tunelů. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/wp4-vyuziti-vlaknobetonu-pro-osteni-tunelu/

[5] Bielecki, R. *Mechanised tunnelling and segmental lining*. WSDTI. Hamburg 2009. ISBN: 978-3-00-025435-2.

[6] Numerické modelování železobetonového segmentového ostění. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z:http://www.betontks.cz/casopis/BETON_TKS_2009-05.pdf

[7] *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 3: Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. France: Elsevier Science Ltd, 2000. ISSN 0886-7798.

[8] Adéla staví tunel metra. Má ráda tvrdou skálu, v jílu postupuje pomalu. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-stavi-razici-stit-adela-a-tonda-tunel-metra-trasa-a-praha-pqk-/tec_reportaze.aspx?c=A120725_180252_tec_reportaze_rja

[9] Tunel: Časopis českého tunelářského komitetu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2012, roč. 21, č. 3. ISSN 1211–0728.

[10] *Zakládání: Odborný časopis*. Praha: Zakládání staveb, a.s, 2011, roč. 23, č. 1. ISSN 1212 – 1711.

[11] Segmentové ostění tunelů nového úseku pražského metra. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: https://www.metrostav.cz/cz/aktuality/aktualni_informace/detail?id=2259

[12] *Tunel: Časopis českého tunelářského komitetu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2010, roč. 19, č. 2. ISSN 1211–0728.

[13] *Tunel: Časopis českého tunelářského komitetu a slovenskej tunelárskej asociace ITA/AITES*. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2013, roč. 22, č. 1. ISSN 1211–0728.

[14] RAŽBA JEDNOKOLEJNÝCH TUNELŮ METRA V. A. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/tunely/razba-jednokolejnych-tunelu-metra-v.-a

[15] Metrem do Motola: Ražba trasy V A plnoprofilovým razícím štítem - TBM. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z:http://www.hornictvi.info/podzemi/tbm/tbm.htm

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Beaumont/English TBM 5

Obrázek 2: Evropské typové rozdělení tunelovacích strojů 6

Obrázek 3: Americké typové rozdělení tunelovacích strojů 6

Obrázek 4: Zeminový štít 9

Obrázek 5: TBM s jednoduchým štítem a zeminový štít 10

Obrázek 6: Variable Density TBM 11

Obrázek 7: Trojrozměrný model segmentového ostění 15

Obrázek 8: Hexagonální typ 16

Obrázek 9: Uzavírací segment 17

Obrázek 10: Segment osazené izolací 18

Obrázek 11: Izolace před/po stlačení 19

Obrázek 12: Kotvené těsnění 20

Obrázek 13: Pryžové těsnění s bobtnajícím páskem 21

Obrázek 14: Armovací koš pro segmenty 23

Obrázek 15: Drátky jako rozptýlený výztuž 24

Obrázek 16: Oběžný typ výroby 26

Obrázek 17: Formy připevněné k podlaze 28

Obrázek 18: Aplikace injektážní směsi 32

Obrázek 19: Trasa prodlouženého metra V.A. 33

Obrázek 20: Podelný řez metra V.A 34

Obrázek 21: Montážní šachta 35

Obrázek 22: Schematické znázornění zatížení příkladu a) 40

Obrázek 23: Schematické znázornění příkladu b) 43