

**T A
Č R**

Program **Doprava 2020+**

**IMPLEMENTACE NOVÉ TECHNOLOGIE MONOLITICKÉHO OSTĚNÍ
TUNELŮ RAŽENÝCH TBM VE STAVEBNÍM INŽENÝRSTVÍ
(PROJEKT TAČR CK3000045)**

**Metodika: Nová technologie monolitického ostění tunelů ražených
TBM**



12/2025

Název: Implementace nové technologie monolitického ostění tunelů ražených TBM ve stavebním inženýrství

Zpracovatel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6
HOCHTIEF CZ a.s., Plzeňská 16/3217, 150 00 Praha 5

Autoři:

Ing. Petr Víték, Ph.D.
Ing. Pavel Ruzicka Ph.D.
doc. Ing. Jan Valentin Ph.D.
Ing. Libor Mařík
Ing. Šárka Pešková, Ph.D.
prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc.
Ing. Marcel Jogl, Ph.D.
Ing. Michal Mára, Ph.D.
Ing. Martin Válek, Ph.D.
prof. Ing. Miroslav Petrtýl DrSc.
prof. Ing. Bc. Radoslav Sovják, Ph.D., LL.M.

Oponenti: Oponent č. 1: doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
Oponent č. 2: Ing. Martin Srb, Ph.D.

Výstup projektu: TAČR CK03000045-V1 Nová technologie monolitického ostění tunelů ražených TMB

Datum: 12. 2025

OBSAH

1. ŘEŠITELSKÝ TÝM	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2. PŘEDMĚT A CÍLE METODIKY	5
3. POUŽITÉ ZKRATKY	6
4. POUŽITÁ TERMINOLOGIE	6
4.1. Geotechnické podmínky	6
4.2. Geotechnický typ horninového masivu	6
4.3. Kvazihomogenní celek	6
4.4. Ostění z monolitického lisovaného betonu	6
4.5. Funkce ostění	7
4.6. Blok betonáže (prstenec) ostění	7
4.7. Samonosnost horninového masivu	7
4.8. Systém „ostění – hornina“	7
4.9. Životní cyklus tunelového ostění	7
5. TYPY TUNELOVACÍCH STROJŮ	7
5.1. Stroj typu Open TBM (otevřené tunelovací stroje)	7
5.2. Stroj typu Shielded TBM (štíťové tunelovací stroje)	8
5.3. Stroj typu EPB TBM (Earth Pressure Balance TBM)	8
5.4. Slurry TBM (bentonitový štít)	9
5.5. Mixshield TBM	9
5.6. Gripper TBM	9
5.7. Tunelovací stroj pro ostění z lisovaného betonu	10
5.8. Shrnutí typů stroje TBM podle podmínek použití	11
6. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU	12
6.1. Požadavky na provádění geotechnického průzkumu	12
6.1.1. Metody průzkumu prováděného z povrchu území	12
6.1.2. Vrtné metody průzkumu	12
6.1.3. Laboratorní zkoušky a analýzy	13
6.1.4. Geotechnická měření in-situ	13
6.1.5. Geodetické metody	13
6.2. Fáze výstavby	13
6.3. Fáze provozování	14
6.4. Vyhodnocení stávajícího stavu	14
7. ZÁKLADNÍ PRINCIPY NOVÉ TECHNOLOGIE	15
7.1. Požadavky na provádění geotechnického průzkumu	15
7.2. Fáze výstavby	15
7.3. Fáze provozování	16
8. POROVNÁNÍ OBOU TYPŮ OSTĚNÍ A JEJICH PROVÁDĚNÍ	16
8.1. Ostění z prefabrikovaných dílců (tybinků)	16
8.2. Lisované ostění z drátkobetonu	17
8.3. Porovnání obou technologií	18
9. PODMÍNKY PRO NASAZENÍ OSTĚNÍ Z LISOVANÉHO BETONU	21
9.1. Geotechnické podmínky	22
9.2. Horninový tlak a zatížení ostění	23
9.3. Principy návrhu a statického posouzení ostění	26
9.3.1. Obecný přístup k návrhu ostění	26

9.3.2. Nutné vstupní hodnoty statického výpočtu a možnosti jejich zajištění	27
9.3.3. Základní metody stanovení zatížení horninovým tlakem	27
9.3.4. Doporučený postup návrhu	28
9.4. Možnosti sledování kvality horninového masivu (GTM).....	28
9.4.1. Možnosti sledování kvality horninového masivu při ražbě TBM	28
9.4.2. Informace zjištěné z rubaniny	29
9.4.3. Vizuální sledování čelby	29
9.4.4. Geofyzikální a geotechnické metody	29
9.4.5. Specifika geotechnického sledování při použití TBM	29
9.5. Možnosti omezení vzniku nadvýrubů a jejich sledování	29
9.5.1. Možnosti omezení vzniku nadvýrubů při TBM ražbě	29
9.5.2. Přesné řízení tlaků na čelbě	29
9.5.3. Geotechnický monitoring a zpětná vazba	30
9.5.4. Geologický průzkum (před- a v průběhu výstavby)	30
9.5.5. Volba vhodného typu tunelovacího stroje	30
9.5.6. Školení a zkušenost obsluhy TBM.....	30
9.6. Omezení přítoků podzemní vody do prostoru betonáže	30
9.7. Vhodný typ tunelovacího stroje	31
9.8. Limity rychlosti postupu ražení	31
9.9. Možnosti provádění doprovodných opatření při ražbě	32
9.9.1. Injektáž horninového masivu	32
9.9.2. Zmrazování horninového masivu	33
9.9.3. Kotvení a jehlování horninového masivu	34
10. POŽADAVKY NA BETON A OSTĚNÍ	34
10.1. Požadované vlastnosti betonové směsi	34
10.2. Dodávka a výroba betonové směsi	34
10.2.1. Předpoklady návrhu	34
10.2.2. Standardní míchací proces	35
10.2.3. Optimalizace přimíchávání drátků	35
10.3. Požadavky na návrh a přísady do betonu	36
10.4. Ukládání a zhutňování a ošetřování po odbednění	36
11. ZKOUŠENÍ A KONTROLA KVALITY	37
12. ZAJIŠTĚNÍ VODONEPROPUSTNOSTI OSTĚNÍ	37
13. DOPORUČENÉ NORMY A PŘEDPISY	37
13.1. Normy	37
13.2. Technické kvalitativní podmínky MD ČR	38
13.3. Technické podmínky MD ČR	38
14. ZÁVĚR	39
15. LITERATURA	40

1. PŘEDMĚT A CÍLE METODIKY

Předmětem projektu je vypracování metodiky pro postup provádění, výrobu a možnost použití technologie monolitického tunelového ostění z lisovaného betonu při ražení podzemních staveb pomocí tunelovacích strojů TBM. Tato metoda je v zahraničí nazývána jako ECL (Extruded Concrete Lining) nebo SENS (Shield Extruded NATM System) a byla použita např. v Japonsku při výstavbě vysokorychlostních železničních tunelů Akima Tunnel (Hokuriku Shinkansen) délky 3 805 m o průřezu 10,70 m x 9,92 m nebo tunelu Sanbongi Hara.

Předmětem metodiky není popis konstrukčních úprav tunelovacího stroje, hlavní principy této úpravy jsou však pro srozumitelnost provádění nové technologie výstavby monolitického ostění z lisovaného betonu při ražbě tunelů pomocí tunelovacích strojů uvedeny.

Při provádění monolitického ostění z lisovaného betonu je do prostoru mezi obnaženým lícem výrubu a vnitřním ocelovým bedněním během ražby postupně pod tlakem čerpán a lisován vysoce plastický beton tak, že je celý prostor mezi bedněním a lícem výrubu (včetně případných nadvýrubů) betonovou směsí beze zbytku vyplněn. Podepření horninového masivu prakticky okamžitě po provedení záběru na délku jednoho prstence bednění a aktivace ostění úplným vyplněním všech případných nadvýrubů pomáhá zmírnit negativní vliv tunelování v okolí výrubu, omezuje degradaci horninového masivu vlivem změny geostatické napjatosti způsobené výrubem a omezuje vznik deformací nadloží. Pokud není použit tunelovací stroj typu gripper, štítové lisy tunelovacího stroje posouvají štít vpřed tlakem na speciálně upravené čelo bednění posledního bloku betonáže. Tento princip je v rámci projektu ověřen, optimalizován a dále modifikován. Při vyčerpání zdvihu štítových lisů dojde k jejich stažení a přesunu jednoho „prstence/bloku“ bednění ze zadního konce sestavy vpřed pod ochranu výsuvného teleskopu, kde proběhne betonáž.

Výsledné ostění má stejné geometrické parametry jako segmentové tunelové ostění, výhoda spočívá v několika aspektech:

- Úplným vyplněním prostoru mezi lícem výrubu a bedněním prstence dochází k okamžité aktivaci ostění a tím ke snížení deformací horninového masivu, resp. nadloží tunelu.
- Pro přenesení vnitřních sil je využita celá tloušťka ostění, která je určena skutečným lícem výrubu a geometrickým tvarem posuvného bednění. Oproti použití segmentového ostění lze počítat s větší, než teoretickou tloušťkou ostění.
- Oproti použití ostění z prefabrikovaných dílců dochází k výraznému zkrácení doby mezi provedením výrubu a aktivací ostění.
- Dochází ke snížení rizika poruchy ostění vlivem výrobních a montážních imperfekcí, které v kombinaci s vysokými silami štítových lisů mohou způsobit u běžného segmentového ostění značné poruchy (asymetrické působení lisů na tybinky, koncentrace napětí v příčných i podélných ložných spárách tybinků apod.).
- Úplná eliminace podélných a částečně i příčných spár mezi monoliticky betonovanými prstenci, která má vliv na zlepšení hydroizolační funkce tunelového ostění i statickou funkci prstence (kontinuální podepření horninovým masivem).
- Snížení finančních nároků na příslušenství potřebné při provádění segmentového ostění (spojovací kolíky, vodící tyče, šroubové spoje apod.) i na případné sanace ostění v místě poškození nebo netěsností.
- Menší nároky na prostor pro výrobu, ošetřování a ukládání prefabrikovaných dílců před jejich transportem do tunelu a osazením v ostění.

- Pro vyztužení ostění lze použít pouze drátkobeton, což klade zvýšené nároky na dimenzování, má však pozitivní vliv z hlediska omezení vzniku trhlin a obecně životnost ostění.
- Oproti segmentovému ostění se eliminuje významný a nepříznivý zatěžovací stav segmentů přitlakem stroje při ražbě. Čerstvý beton se neporuší trhlinami, naopak dojde k jeho zhutnění. Požadovaný tlak se přenesení do formy, která je na uvedené zatížení dimenzovaná.

2. POUŽITÉ ZKRATKY

GTP	geotechnický průzkum
GTM	geotechnický monitoring
KZP	kontrolní zkušební plán
TBM	tunelovací stroj (Tunnel Boring Machine)
TMS	Tunnel management systém

3. POUŽITÁ TERMINOLOGIE

3.1. Geotechnické podmínky

Geotechnické podmínky postihují jak geologické a hydrogeologické vlastnosti horninového masivu, tak jeho chování při ražbě podzemního díla konkrétních rozměrů předpokládanou tunelovací metodou. Zohledňují geostatickou napjatost v hloubce vedení díla pod povrchem, strukturní skladbu masivu, výšku nadloží, orientaci diskontinuit vzhledem ke směru ražby a velikosti dílčích výrubů s ohledem na vznik nadvýrubů a riziko závalu, dobu stability nezajištěného výrubu, velikost přítoků podzemní vody, rozpojitelnost, vrtatelnost, míru abraze s ohledem na opotřebení vrtného náčiní apod. Jsou zaměřeny nejen na vlastní horninový masiv, ale i na konkrétní podmínky z hlediska tunelování.

3.2. Geotechnický typ horninového masivu

Geotechnický typ definuje charakteristické společné vlastnosti určité části horninového masivu, ke kterým patří např. jeho struktura, vrstevnatost a puklinatost, vzdálenost, rozevření, orientace a typ výplně puklin, geotechnické parametry, propustnost a chování při kontaktu s vodou apod.

3.3. Kvazihomogenní celek

Kvazihomogenní celek je oblast horninového masivu s charakteristickým chováním (reakcí) na ražbu podzemního díla daných tvarů a rozměrů konkrétní tunelovací metodou. Může být tvořen jedním, nebo více geotechnickými typy. Kromě vlastností horninového masivu hraje při stanovení kvazihomogenního celku svou roli i výška nadloží, rozměry a tvar podzemního díla, předpokládaná doba stability nezajištěného výrubu a obecně faktory, které ovlivňují interakci podzemního díla a horninového masivu při provádění i po zajištění jeho stability ostěním.

3.4. Ostění z monolitického lisovaného betonu

Ostění je do výrubu instalováno po provedení „záběru“ razícího stroje. Ostění z monolitického betonu se instaluje se do výrubu, ve kterém ještě zpravidla probíhá deformace. Tomu odpovídá zatížení horninovým tlakem, kterému je ostění v rané fázi svého vzniku po odbednění vystaveno. V období, než je mladý beton ostění schopen přenést na něj působící zatížení, přebírá nosnou funkci konstrukce bednicí formy. Podíl ostění na celkové nosné funkci systému „ostění-hornina“ závisí na míře samonosnosti horninového masivu. Z dlouhodobého hlediska pak na agresivitě prostředí a schopnosti ostění agresivním účinkům prostředí vzdorovat. Jedná se o jednoplášťové ostění s trvalou funkcí a požadovanou životností 100 let.

3.5. Funkce ostění

Jedná se o schopnost ostění při dodržení technicko-kvalitativních požadavků přenášet po celou dobu životnosti tunelu veškerá předpokládaná zatížení, zajistit tvarovou stálost a dostatečný prostor z hlediska průjezdného průřezu, instalovaných zařízení a vestavěných konstrukcí.

3.6. Blok betonáže (prstenec) ostění

Jedná se blok monolitického ostění z lisovaného betonu, který je betonován v jednom pracovním cyklu tunelovacího stroje. Ostění může být v závislosti na geotechnických podmínkách buď z nevyztuženého betonu nebo drátkobetonu. Jednotlivé bloky betonáže jsou od sebe oddělené příčnou pracovní spárou, u které je předpokládána vodotěsnost. Příčná spára musí být v rámci betonovaného prstence v horní i dolní části průběžná, což zajišťuje technologický postup výstavby. V případě železničních tunelů se v České republice blok betonáže nazývá „tunelový pás“ a je z důvodu údržby a evidence vad značen podle příslušných předpisů investora nebo správce tunelu.

3.7. Samonosnost horninového masivu

Samonosnost horninového masivu je jeho schopnost přenášet při ražbě podzemního díla daných rozměrů v daných geotechnických podmínkách určitou část nebo celé zatížení horninovým tlakem. Samonosnost horninového masivu je v předstihu nebo při ražbě zvyšována doprovodnými opatřeními, ke kterým patří zlepšování vlastností masivu (např. injektování, zmrazování, vakuování), šetrné rozpojování horninového masivu s minimalizací vzniku nadvýrubů (např. volbou optimální délky záběru) a v dobrých geotechnických podmínkách vyztužením nosného horninového prstence systémovým kotvením.

3.8. Systém „ostění-hornina“

Systém „ostění-hornina“ je základní nosný systém tunelu, který zajišťuje dostatečnou únosnost a tvarovou stálost výrubu v průběhu ražby i po uvedení tunelu do provozu. Rozdělení schopnosti přenášet zatížení mezi ostění a horninu závisí na stupni samonosnosti horninového masivu. V případě horninového masivu s vysokou samonosnou funkcí přenáší větší část zatížení horninový masiv. V případě horninového masivu bez samonosné funkce přenáší veškeré zatížení tunelové ostění. Únosnost systému a volba vhodného okamžiku instalace ostění závisí na geotechnických vlastnostech horninového masivu, rozměrech podzemního díla a technologickém postupu výstavby (viz např. Fenner-Pacherova křivka).

3.9. Životní cyklus tunelového ostění

Životním cyklem tunelového ostění je časové období od vzniku záměru přes návrh, realizaci a užívání až po jeho odstranění a recyklaci. Po této době se již nepředpokládá, že by dílo bylo schopné dál plnit svou funkci.

4. TYPY TUNELOVACÍCH STROJŮ

Základní typy tunelovacích strojů (TBM) se dělí podle jejich nasazení v daných geotechnických podmínkách a podle požadavků na zajištění stability výrubu a deformace nadloží. Každý typ je optimalizován pro specifické nasazení stroje v konkrétních geotechnických podmínkách.

4.1. Stroj typu Open TBM (otevřené tunelovací stroje)

Jedná se o tunelovací stroje, které nemají čelní štít ani speciální mechanismy pro zajištění stability čelby. Horninový masiv je odebírán přímo z čelby pomocí řezných nástrojů (např. skalní fréza). Materiál je z čelby odtěžován dopravníkem nebo kolovou/kolejovou dopravou. Z hlediska geotechnických podmínek

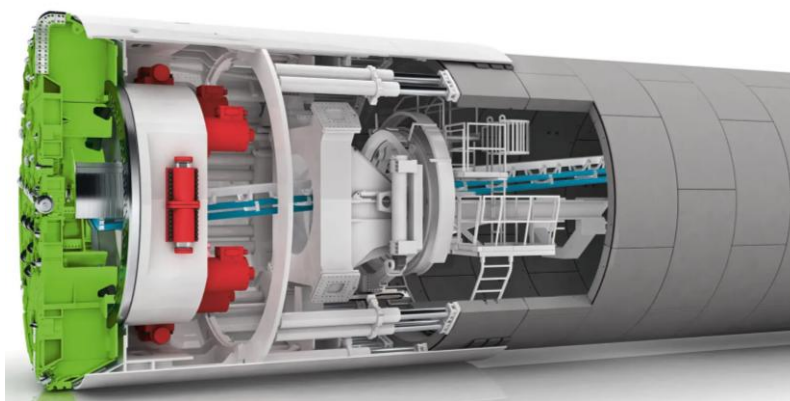
je stroj určený do pevné a stabilní horniny s vysokou samonosností (např. nezvětralé vyvřeliny, pevné metamorfované nebo sedimentární horniny). Výhodou těchto strojů je jednoduchost a nízké provozní náklady. Nevhodné jsou pro nestabilní nebo zvodnělé prostředí.

4.2. Stroj typu Shielded TBM (štítové tunelovací stroje)

Jedná se o tunelovací stroje, které mají štít chránící čelbu a líc nezajištěného výrubu. Pro zajištění stability čelby se používají různé systémy. Stroj je určený pro mírně zvodnělé nebo nestabilní horniny, které vyžadují dodatečnou stabilizaci.

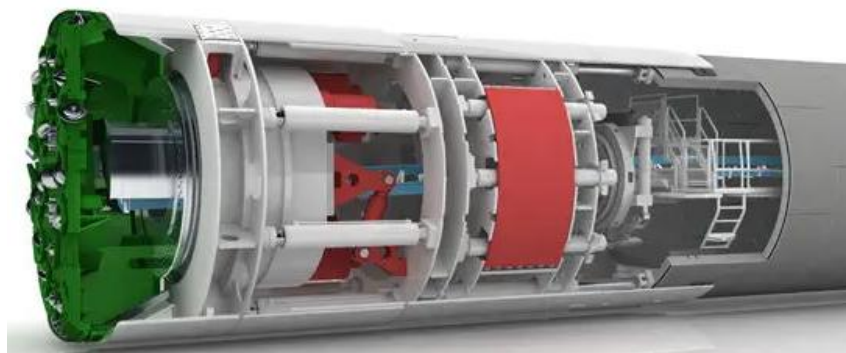
Rozlišují se dva druhy těchto strojů:

- Single Shield TBM: Prefabrikované ostění se montuje za pláštěm štítu, v době montáže ostění je ražba přerušena



Obrázek 1: Schéma tunelovacího stroje typu Single Shield TBM

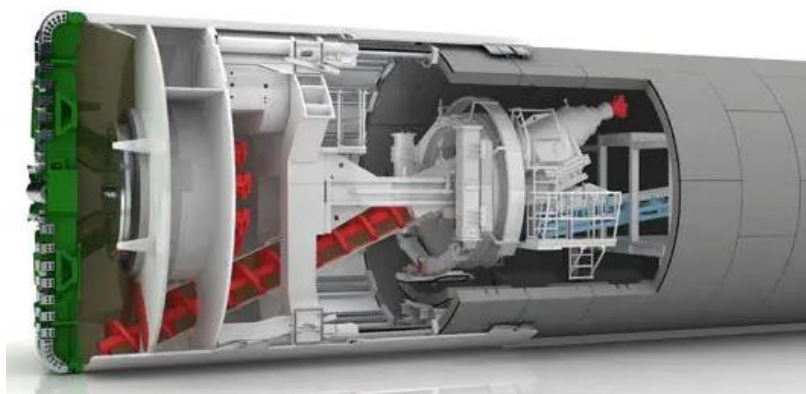
- Double Shield TBM: Umožňuje plynulé ražení a současně montáž prefabrikovaného ostění. Kombinuje pevnou čelbu a ochranu pro nestabilní podmínky.



Obrázek 2: Schéma tunelovacího stroje typu Double Shield TBM

4.3. Stroj typu EPB TBM (Earth Pressure Balance TBM)

Tunelovací stroje typu EPB jsou speciální stroje navržené pro ražení tunelů v měkkých, nestabilních, nebo zvodnělých zeminách, jako jsou jíly, písky, šterky, nebo zeminy s nízkou pevností. Klíčovou vlastností těchto strojů je schopnost udržovat stabilitu čelby tunelu řízením tlaku zeminy v komoře na čele stroje. Zemina je na čelbě rozpojována pomocí řezných nástrojů umístěných na rotační hlavě stroje. Pro zlepšení plasticity a snížení míry abraze zeminy v komoře může být do zeminy přidáván pěnový, polymerový nebo bentonitový „kondicionér“. Pro odtěžování rubaniny z komory se používá šnekový dopravník. Pro zajištění stability výrubu se standardně používá ostění z prefabrikovaných dílců instalované co nejbližší za čelbou.



Obrázek 3: Schéma tunelovacího stroje typu EPB TBM

4.4. Slurry TBM (bentonitový štít)

Tunelovací stroje typu Slurry TBM jsou stejně jako EPB TBM vhodné pro nasazení v měkkých, nestabilních, nebo zvodnělých zeminách, jako jsou jíly, písky, štěrky, nebo zeminy s nízkou pevností. Pro stabilizaci čelby se používá bentonitová suspenze. Zemina je na čelbě rozpojována pomocí řezných nástrojů umístěných na rotační hlavě stroje, mísí se s bentonitovou suspenzí a následně je čerpána do separační jednotky, kde dochází k oddělení bentonitu a vytěžené rubaniny. Bentonitová suspenze se opět používá pro zajištění stability čelby. Pro zajištění stability výrubu se standardně používá ostění z prefabrikovaných dílců instalované vzhledem k minimální samonosnosti horniny co nejbližší za čelbou.



Obrázek 4: Schéma tunelovacího stroje typu Slurry TBM

4.5. Mixshield TBM

Tunelovací stroj typu Mixshield TBM je univerzální tunelovací stroj navržený pro komplexní a nehomogenní geologické podmínky, včetně vysokého tlaku podzemní vody a horninového tlaku. Umožňuje ražení v zeminách v prostředí písků, jílu nebo zemin s úlomky skalních hornin. V uzavřeném módu kombinuje vlastnosti stroje EPB TBM a Slurry TBM, což umožňuje efektivní a bezpečné ražení i v náročných geotechnických podmínkách. Při ražbě v otevřeném módu umožňuje ražení v pevných a stabilních horninách.

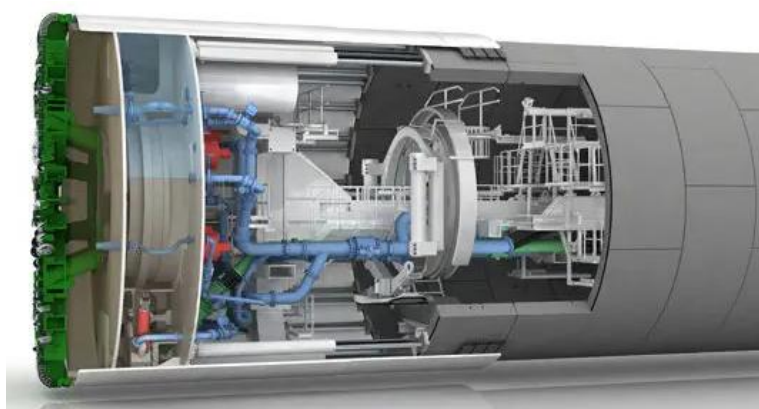
4.6. Gripper TBM

Tunelovací stroje typu Gripper jsou určeny zejména pro pevné horniny s vysokou samonosností, kde není potřeba výrazná stabilizace čelby tunelu ani okamžitá instalace ostění. Tento typ stroje se pohybuje díky hydraulickým ramenům nazývaným grippery, které se rozpírají do boků o stěny výrubu a poskytují oporu pro přítlak řezné hlavy. Řezná hlava je vybavená diskovými dlaty, která rozpojují horninový masiv přítlakem a rotací dlat. Po dokončení každého kroku se grippery zasunou, přesunou vpřed, znovu

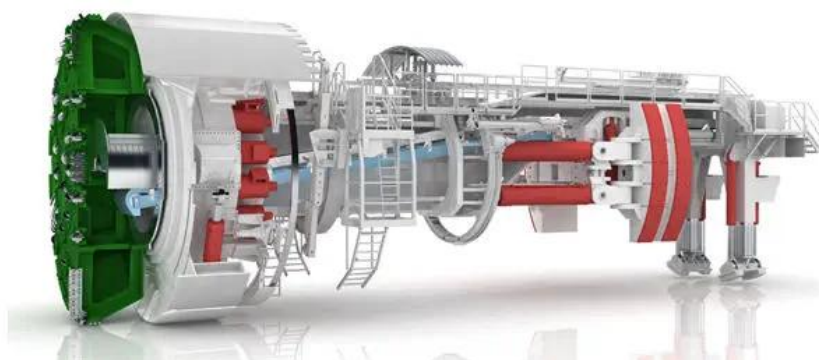
rozepřou a proces se opakuje. Stroje lze užívat i v tunelech bez ostění. Rozpojená hornina padá na dno výrubu, odkud je vynášena rotující částí stroje a nakládána na pásový dopravník, který vede od čela stroje až na povrch území. Tunelovací stroje typu gripper jsou ideální pro dlouhé tunely v horských oblastech, kde je hornina pevná a má dostatečnou stabilitu pro to, aby líc nezajištěného výrubu zůstal vzhledem k vysoké samonosnosti horniny dlouhodobě stabilní. Stroje se obvykle používají v prostředí s nízkými přítoky vody do výrubu, protože konstrukce stroje neumožňuje zajištění stability výrubu jako typy TBM se štítem.

Mezi hlavní výhody použití patří vysoká efektivita a rychlost ražby v pevných horninách, nízké náklady na instalaci ostění, protože ho není nutné vždy použít a jednodušší konstrukce ve srovnání se štítovými TBM, což snižuje pořizovací a provozní náklady.

Tunelovací stroj není vhodný do prostředí tvořeného nestabilními, zvodněnými nebo měkkými horninami, ve kterém by mohlo po provedení záběru dojít ke kolapsu čelby nebo nezajištěného líce výrubu. V případě nutnosti stabilizace líce výrubu je nutné použít doprovodná opatření srovnatelná s konvenční ražbou, např. pomocí NRTM. Jedná se např. o stabilizaci líce výrubu stříkaným betonem, vyztužením ocelovými rámy a sítěmi, vyztužení nosného prstence horniny v okolí výrubu radiálním kotvením apod., což může zpomalit rychlost ražby a prodloužit dobu výstavby.



Obrázek 5: Schéma tunelovacího stroje typu Mixshield TBM



Obrázek 6: Schéma tunelovacího stroje typu Gripper TBM

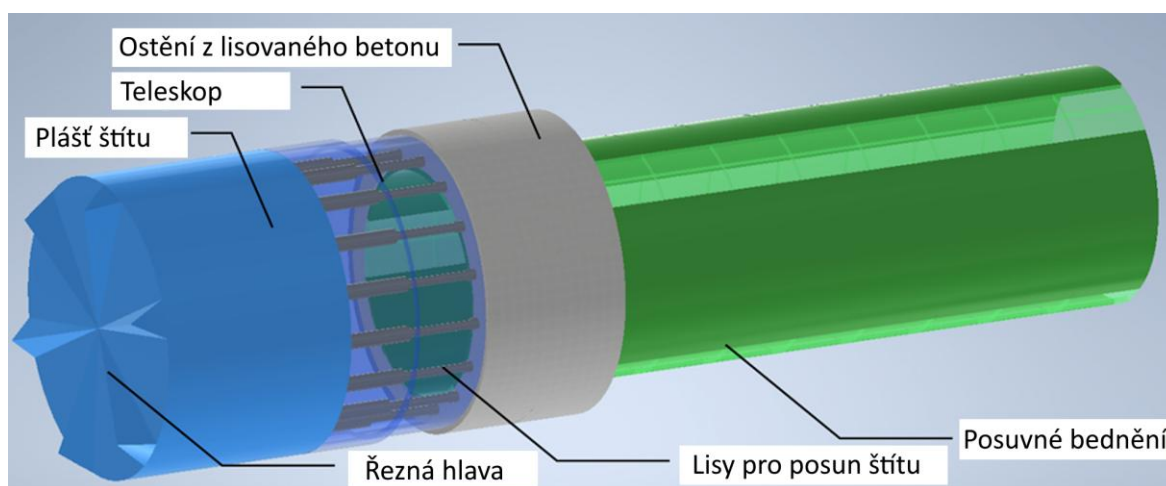
4.7. Tunelovací stroj pro ostění z lisovaného betonu

Pro použití ostění z lisovaného betonu je vhodné použít typy tunelovacích strojů určených do takových geotechnických podmínek, ve kterých je zajištěna stability líce výrubu do okamžiku, než je po provedení záběru vyplněn prostor mezi lícem výrubu a bednicí formou betonovou směsí. Standardní konstrukci

tunelovacích strojů je nutné doplnit o teleskop, zařízení pro dopravu a ukládání betonu a systém překládané bednicí formy, která v časovém úseku bezprostředně po betonáži přebírá nosnou funkci ostění až do okamžiku, než ostění z lisovaného betonu dosáhne požadované únosnosti. Proto se předpokládá délka bedněného úseku v řádu nižších jednotek délky betonovaného prstence.

Pod pojmem „teleskop“ je uvažován ocelový prstenec kruhového tvaru, který se vysouvá z pláště stroje, zamezuje pádu horniny z líce výrubu do prostoru betonáže prstence ostění a pomocí instalované hydroizolační fólie omezuje přítoky vody do betonovaného úseku s cílem zamezit změně konzistence betonu a zaplavení betonovaného prostoru. Hydroizolační fólie má v průběhu technologického postupu výstavby pouze dočasnou funkci, neboť následně přebírá hydroizolační funkci vodotěsný beton ostění. Po posunu a ustavení bednění do betonovaného úseku zajištěného pomocí teleskopu a hydroizolační fólie je zahájena betonáž příslušného prstence.

Po vyplnění volného prostoru betonovou směsí se teleskop postupně zasouvá zpět do pláště stroje a zároveň pokračuje tlakové plnění betonem, dokud se nezaplní celý prostor mezi formou a výrubem. Tlak plnění je větší než tlak podzemní vody ve výrubu. Následně pokračuje ražba, kdy pomocí sil vyvozených hnacími lisami stroje, které zajišťují přítlak řezné hlavy a posun stroje, dojde ke slisování betonu vysokým tlakem (až 5 MPa) a tím dokonalé aktivaci ostění do horninového masivu. Čelo bednicí formy příslušného bloku betonáže je upraveno tak, aby do něj bylo možné vložit vnitřní těsnicí pás, který zaručí vodotěsnost příčné spáry mezi jednotlivými bloky betonáže. Použití stroje se předpokládá do tlaku podzemní vody 5 atmosfér. Schéma razícího stroje pro ostění z lisovaného betonu ukazuje **Obrázek 6**.



Obrázek 7: Schéma úpravy razícího stroje pro použití ostění z lisovaného betonu

4.8. Shrnutí typů stroje TBM podle podmínek použití

Tabulka 1: Přehled použití tunelovacích strojů v závislosti na geotechnických podmínkách

Typ TBM	Geotechnické podmínky	Příklady použití
Open TBM	Tvrdé, stabilní horniny	Horský tunel v žule
Gripper TBM	Tvrdé, samonosné horniny	Dlouhé tunely v horských oblastech
Shielded TBM	Mírně nestabilní horniny	Městské tunely
EPB TBM	Měkké, vlhké sedimenty	Metro v jílovitých oblastech
Slurry TBM	Zvodnělé písky a štěrky	Podzemní přechod pod řekou
Mixshield TBM	Proměnlivé geologické podmínky	Přechod mezi skalními a sypkými horninami

5. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU

Popis stávajícího stavu je zaměřen na požadavky na geotechnický průzkum, fáze výstavby a dosaženou kvalitu tunelu po jeho uvedení do provozu.

5.1. Požadavky na provádění geotechnického průzkumu

Geotechnický průzkum pro projektování tunelů ražených tunelovacími stroji je klíčový pro zajištění bezpečnosti, efektivity a optimalizace projektu. Průzkum se zaměřuje na detailní poznání geologických, hydrogeologických a geotechnických podmínek, které ovlivňují návrh a funkci stroje. Tunelovací stroj je citlivý na změny vlastností hornin, jako je přechod z měkkých do tvrdých hornin, přítomnost zlomů a tektonických poruch. Průzkum proto musí být zaměřený na zjišťování informací o vrstevnatosti, směrech diskontinuit, jejich orientaci vzhledem k raženému dílu nebo rozevření a výplni diskontinuit. Dalším z důležitých faktorů ovlivňujících návrh typu tunelovacího stroje a případná rizika při provádění je přítomnost podzemní vody v horninovém masivu a její tlakové poměry. Podzemní voda ovlivňuje v závislosti na kvalitě a typu horninového masivu stabilitu čelby i líce výrubu tunelu a podmiňuje výběr typu stroje (např. tunelovací stroje typu EPB, Slurry Shield apod.). Důkladné hydrogeologické modelování je zásadní pro předpověď možných přítoků a tlaku podzemní vody.

Velkým nebezpečím pro ražení tunelovacími stroji je přítomnost dutin, kaveren a obecně krasových jevů, které se mohou nacházet nejen přímo v trase tunelu, ale i v jeho blízkém okolí. Váha tunelovacího stroje může způsobit jeho propadnutí, nebo vychýlení z projektovaného směru, což jsou obtížně řešitelné situace, které vyžadují nasazení zvláštních opatření a mohou způsobit výrazné časové ztráty v harmonogramu výstavby.

Z hlediska opotřebení řezných nástrojů, odhad potřeby jejich výměny a tím i rychlosti ražby je důležitým parametrem míry abraze (abrazivity) horninového masivu. K hodnocení abrazivity hornin se jako standardizovaná zkouška používá Cercharův test, který je rychlý, relativně jednoduchý a široce využívaný k odhadu nákladů na údržbu a výměnu řezných nástrojů při ražbě nebo vrtání.

Metody geotechnického průzkumu lze rozdělit podle způsobu provádění na:

- Průzkum prováděný z povrchu zemí
- Vrtný průzkum
- Laboratorní zkoušky a analýzy
- Geotechnická měření in-situ
- Geodetická měření sledovaných veličin

5.1.1. Metody průzkumu prováděného z povrchu území

- Geologické mapování, tj. analýza povrchových geologických podmínek, identifikace horninových jednotek, diskontinuit a zlomů.
- Geofyzikální metody, jako např. seismická refrakce a reflexe pro určení rozhraní mezi horninami a identifikaci anomálií, elektrická odporová tomografie určená zejména pro detekci změn vlhkosti a poruchových zón nebo gravimetrie a magnetometrie pro analýzu hlubších struktur, hustotních změn a identifikaci dutin v horninovém masivu.

5.1.2. Vrtné metody průzkumu

- Průzkumné vrty určené k vzorkování jádra pro stanovení petrofyzikálních vlastností hornin, zjištění četnosti, případně orientace diskontinuit a stupně zvětrání v závislosti na hloubce pod úrovní terénu. Cílem průzkumných vrtů je zajišťování vzorků pro provádění laboratorních zkoušek.

- Hydrogeologické vrtý pro zjištění úrovně hladiny podzemní vody, jejího chemického složení a tlakových poměrů.
- Dilatometrické a presiometrické testy prováděné in-situ pro stanovení deformačních parametrů horninového masivu.

5.1.3. Laboratorní zkoušky a analýzy

- Stanovení mechanických vlastností hornin (pevnost v tlaku, smyku, tahové pevnosti).
- Petrografické a mineralogické analýzy.
- Permeabilita a porozita hornin.
- Stanovení abrazivity horniny - Cercharův test, který měří schopnost horniny opotřebovávat kovový hrot při kontrolovaném tření po povrchu horninového vzorku. Výsledkem testu je bezrozměrný Cercharův index abrazivity (CAI), který kvantifikuje abrazivní vlastnosti horniny – viz **Tabulka 2**.

Tabulka 2: Hodnocení výsledků Cercharova testu pro stanovení abrazivity prostředí

CAI	Abrazivita horniny	Dopady na nástroje
0,0–0,5	Velmi nízká	Minimální opotřebení
0,5–1,0	Nízká	Menší opotřebení
1,0–2,0	Střední	Střední opotřebení, běžné v praxi
2,0–4,0	Vysoká	Výrazné opotřebení
> 4,0	Velmi vysoká	Extrémní opotřebení, nutnost časté výměny

5.1.4. Geotechnická měření in-situ

- Lugeonův test (tlaková vodní zkouška) k posouzení propustnosti horninového masivu a stanovení očekávaných přítoků podzemní vody do výrubu. Hodnocení horninového masivu se provádí pomocí Lugeonovy hodnoty (LU), která je definovaná jako množství vody v litrech, které při tlaku 1 MPa proteče jedním metrem vrtu za minutu. Lugeonova hodnota poskytuje informaci o propustnosti horninového masivu při hodnocení podle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**
- Čerpací zkoušky pro zjištění propustnosti hornin a interakce s podzemní vodou.
- Deformační a pevnostní zkoušky pro určení parametrů ovlivňujících interakci mezi TBM a horninovým masivem.

Tabulka 3: Interpretace výsledků Lugeonova testu

0–1	Hornina je prakticky nepropustná
1–5	Nízká propustnost, vhodné pro podzemní stavby
5–10	Střední propustnost, je třeba zvážit hydroizolační opatření
10–25	Vysoká propustnost, mohou být nutná injektážní opatření
>25	Extrémně vysoká propustnost, typická pro poruchové zóny nebo krasové horniny

5.1.5. Geodetické metody

- Precizní měření a monitorování deformačních změn horninového masivu a povrchové stability.

5.2. Fáze výstavby

Tunelovací stroje se používají pro výstavbu silničních, dálničních i železničních tunelů. Ve městech se pak jedná i o traťové tunely metra nebo kolektory. Použití tunelovacího stroje TBM je obvykle ekonomicky a technicky výhodné pro středně dlouhé až dlouhé tunely, přičemž optimální délka tunelu závisí na

konkrétním projektu a geotechnických podmínkách. Nasazení TBM je výhodné u tunelů o délce přibližně 2 km a více. U kratších tunelů bývá efektivita vynaložení nákladů nižší kvůli vysokým počátečním investicím do tunelovacího stroje a dlouhé době potřebné pro montáž a demontáž stroje i výstavbu jeho zázemí. U kratších tunelů bývají náklady na přípravu a transport stroje v poměru k celkové délce tunelu a jeho ceně nepřiměřeně vysoké. Hlavním důvodem jeho nasazení je pak zpravidla minimalizace rizika spojeného s ražbou nebo ohrožením objektů v nadloží v případě použití konvenčních metod ražení.

Pro ražbu tunelovacími stroji se podle geotechnických podmínek používají typy uvedené v kap. 5. Jejich nasazení je možné od tvrdých skalních hornin až po zvodnělé sedimenty, přičemž zásadní roli nehraje ani výška nadloží. Pro zajištění stability výrubu se při ražbě v dobrých geotechnických podmínkách může použít i jednoplášťové ostění ze stříkaného betonu. V případě složitých geotechnických podmínek se pro zajištění stability výrubu používají zpravidla prefabrikované dílce (tybinky). Jejich hlavní výhodou je okamžitá únosnost i vodotěsnost. Jejich variabilita je vzhledem ke konstrukci stroje omezená pouze na volbu stupně vyztužení. Tloušťka segmentu je v celé trase ražené jedním typem stroje konstantní. Známé jsou i případy dvouplášťového ostění, kdy je první vrstva „primárního“ ostění tvořena prefabrikovanými segmenty, druhá vrstva sekundárního ostění je tvořena monolitickým betonem. Pokud je primární ostění navrženo bez nároků na vodotěsnost a jeho základní funkcí je vzdorovat horninovému tlaku, může být mezi primární a sekundární ostění vložena mezilehlá hydroizolace.

Vzhledem k tomu, že tunelovací stroje jsou nasazovány na ražení tunelů větších délek, lze předpokládat, že se v trase mohou vyskytovat geotechnické anomálie (tektonické poruchy, náhlé změny geologických podmínek, krasové jevy), na které bude muset být konstrukce tunelovacího stroje i ostění připravena. V případě neočekávaných geotechnických podmínek je nutné tyto úseky překonat s použitím doprovodných opatření, nebo dokonce konvenčními tunelovacími metodami.

5.3. Fáze provozování

V porovnání s konvenčně raženými tunely, jejichž průřez může být do jisté míry přizpůsoben tvaru dopravního prostoru, jsou tunely ražené pomocí TBM zpravidla vždy kruhové. S tím souvisí využitelnost takto vzniklého prostoru, a to zejména pod vozovkou nebo železničním svrškem. V případě použití prefabrikovaných tybinků je nutné zajistit vodotěsnost v příčných i podélných spárách, ve kterých jsou spojované jednotlivé tybinky do prstenců a prstence vzájemně k sobě. Při výrobě prefabrikátů jsou kladeny vysoké nároky na přesnost formy i osazovaných výztužných košů. Neméně důležité je vytvoření drážek pro osazení těsnění. V případě jednoplášťových ostění musí být schopna přenášet veškerá zatížení, zajistit vodonepropustnost konstrukce i její požadovanou požární odolnost. U dvouplášťových ostění je základní funkcí sekundárního ostění zajistit především užitnou funkci tunelu a společně s hydroizolačním souvrstvím i vodonepropustnost. Z provozního hlediska jsou tunely vybaveny podle jejich funkce, tj. vozovkou nebo jízdní dráhou, kabelovody dalšími instalacemi technologického vybavení tunelů souvisejícího se zajištěním bezpečnosti provozu.

5.4. Vyhodnocení stávajícího stavu

Ve všech případech použití tunelovacích strojů i typů ostění se jedná o ověřené technologie ražení tunelů v různých geotechnických podmínkách s odpovídajícím typem ostění. V případě ostění z prefabrikovaných dílců je nutno zajistit výrobu dílců, jejich skladování v blízkosti zařízení staveniště, a kontinuální dopravu do podzemí.

6. ZÁKLADNÍ PRINCIPY NOVÉ TECHNOLOGIE

6.1. Požadavky na provádění geotechnického průzkumu

Použití monolitického ostění z lisovaného betonu je možné pouze v takových geotechnických podmínkách, ve kterých hornina vykazuje takový stupeň samonosnosti, který umožní provést záběr, instalaci bednění a čerpání betonové směsi do bednění, aniž by došlo k ohrožení stability líce výrubu nebo betonáže prstence z lisovaného betonu. Po úspěšném zaplnění prstence bednění betonovou směsí přenáší horninový tlak v počáteční fázi po betonáži vlastní konstrukce bednicí formy. Po dosažení požadované pevnosti betonu již zatížení přenáší vybetonovaný prstenec ostění. Určitou komplikací mohou být přítoky do prostoru betonáže a vznik nadvýrubů s vypadáváním bloků horniny do prostoru betonáže. K omezení tohoto rizika slouží speciálně k tomu určený válcový teleskop.

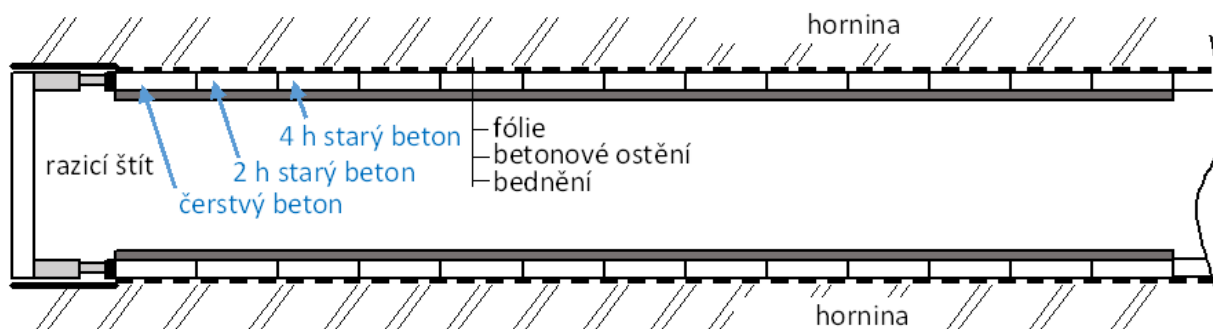
Geotechnický průzkum musí být proto zaměřený na zjištění:

- pevnostních charakteristik všech geotechnických typů v trase tunelu s cílem získání parametrů horninového masivu, které umožní stanovit zaručenou dobu samonosnosti nezajištěného líce výrubu.
- strukturní analýzy horninového masivu se stanovením orientace diskontinuit k ploše výrubu a možností určení rizika vzniku nestabilních horninových bloků, které by mohly vypadnout při posunu tunelovacího stroje do prostoru betonáže, nebo které vypadly již v prostoru řezné hlavy a tvoří nadvýrub, který bude nutné lisovaným betonem vyplnit. Nadměrné odchylky od projektované tloušťky ostění je sice možné lisovaným betonem vyplnit, mají však negativní vliv na statickou funkci ostění (proměnná tuhost má vliv na průběh vnitřních sil v ostění) i na vznik nežádoucích trhlin.
- hydrogeologických poměrů v trase podzemního díla, zejména se zaměřením na velikost předpokládaných přítoků do čelby a tlak podzemní vody s ohledem na dimenzování teleskopu a zajištění dočasné funkce hydroizolační fólie pro bezproblémovou betonáž prstence z lisovaného betonu.

6.2. Fáze výstavby

Pro použití ostění z lisovaného monolitického betonu je nutné provést úpravu konstrukčního řešení tunelovacího stroje, která umožní instalaci ocelového bednění za částí L1 stroje, vestavbu teleskopu pro podepření horninového masivu po provedení výrubu a zařízení pro instalaci vodonepropustné membrány, která zamezí přítoku podzemní vody do prostoru, ve kterém bude probíhat betonáž. Vodonepropustná membrána neslouží jako trvalá hydroizolace, která zajišťuje vodonepropustnost po dobu životnosti ostění, ale slouží pouze k zamezení přítoků do oblasti betonáže ostění, aby nedošlo ke změně konzistence betonu a zhoršení jeho parametrů.

Po odbednění je nutné ostění ošetřovat pro omezení vzniku trhlin nejen s ohledem na vysychání betonu, ale i proti teplotnímu šoku mladého betonu, ve kterém ještě probíhá hydratace s vývinem hydratačního tepla. Při dostatečné době, kdy je ostění chráněno bednicí formou není nutné ochranu proti teplotnímu šoku provádět. Doba ošetřování je určena na základě typu betonu a vývoje hydratačního tepla v čase. Po uvolnění formy lze povrch nastříkat voskem proti odpařování vody a vysychání betonu.



Obrázek 8: Schéma razicího stroje - časový postup betonáže

6.3. Fáze provozování

Ve fázi provozování nová technologie zajišťuje plnohodnotnou funkci ostění, tj. jak z hlediska zajištění stability výrubu, tak z hlediska zajištění užité funkce tunelu. Vzhledem k monolitickému provádění prstence ostění jsou eliminována rizika průsaků v ložných spárách prefabrikovaných prstenců u klasické ražby TBM i zvýšená koncentrace napětí v ložných spárách spojená s drcením betonu. Vzhledem k lisování betonu se předpokládá vysoká kvalita ostění, ale i v případě zjištění průsaků způsobených sníženou kvalitou betonu je možné provést sanaci např. těsnící injektáží přímo v místě lokálního průsaku. Monolitický způsob betonáže dále odstraňuje problémy spojené s použitím prefabrikovaného ostění v místě směrových a výškových oblouků, které je nutné řešit např. speciální geometrií prefabrikovaných segmentů ostění a natáčením prstence v závislosti na velikosti oblouku.

7. POROVNÁNÍ OBOU TYPŮ OSTĚNÍ A JEJICH PROVÁDĚNÍ

7.1. Ostění z prefabrikovaných dílců (tybinků)

Ostění z prefabrikovaných dílců patří ke standardnímu způsobu zajištění stability výrubu i užité funkce tunelu při ražení pomocí tunelovacích strojů TBM. Prstenec ostění zpravidla tvoří sestava 5+1 (5 standardních dílců + klenák) nebo 6+0 dílců, jejichž tloušťka se pohybuje podle průměru tunelu a geotechnických podmínek od 250 mm do 600 mm, délka v podélném směru tunelu je zpravidla v rozmezí od 1,0 m do 1,5 m. Prefabrikace s použitím velmi přesných forem v optimálním prostředí z hlediska zrání i ošetřování betonu po odbednění umožňuje použití betonů pevnostních tříd C40/50 až C 50/60 podle ČSN EN 206. Výztuž segmentů může být tvořena buď ocelovými pruty nebo ocelovými vlákny (drátkobeton, SFRC), přičemž pro zvýšení požární odolnosti je možné přidat i PP vlákna. Ostění z prefabrikovaných segmentů je navrhováno na životnost 100 let. Ostění je navrhováno z betonu odolného proti průsakům, vodotěsnost je tak zajištěna materiálem segmentů a těsněním příčných i podélných spár mezi segmenty pružným, elastomerovým těsněním, které je vsazeno do k tomu určených drážek na styčných plochách segmentů. Celková vodotěsnost ostění je závislá na těsnosti spár, tj. velmi přesném osazení segmentů v příčném i podélném směru a sevření spár. Při ražení tunelu je z technologických důvodů průměr výrubu větší, než vnější průměr ostění. Proto je nutné takto vzniklý prostor co nejdříve po smontování prstence vůči horninovému masivu aktivovat výplňovou injektáží. Účelem injektování je jednak zajištění lepší statické funkce ostění (kontinuální podepření po celém jeho obvodu), jednak zamezení proudění podzemní vody podél tunelového ostění a omezení deformací výrubu, které se v případě nízkého nadloží a nepříznivých geotechnických podmínek mohou negativně projevit na inženýrské síti nebo obecně objekty v zóně ovlivněné ražbou tunelu.

7.2. Lisované ostění z drátkobetonu

Lisované ostění v kombinaci s ražením tunelů pomocí tunelovacích strojů je speciální aplikací monolitického jednoplášťového ostění, která představuje při jejím nasazení vždy individuální přístup. Kromě speciální úpravy konstrukce tunelovacího stroje se jedná především o komplexní hodnocení geotechnických podmínek v celé trase tunelu, neboť lze předpokládat, že konstrukční řešení stroje nebude umožňovat použití jak technologie segmentového ostění, tak ostění z lisovaného betonu. Předmětem posouzení bude zejména hodnocení samonosnosti horninového masivu v období od provedení záběru do plného vybetonování prstence ostění a dále posouzení hydrologických poměrů s ohledem na tlak a očekávané množství přítoků. V případě, že v průběhu ražby dojde k zastižení neočekávaných geotechnických nebo hydrologických podmínek, pro které technické řešení není navrženo, dojde k přerušení ražby a nutnosti provádění doprovodných opatření, které zajistí zlepšení prostředí do pro ražbu přijatelných mezí.

Dimenzování monolitického ostění z lisovaného betonu je vázáno na možnost vyztužení pouze pomocí ocelových vláken. Volba tloušťky ostění vychází z možnosti nadimenzovat ostění pro očekávaný nejnejpříznivější stav na délce tunelu. Zvýšení nebo snížení únosnosti ostění podle očekávaných, resp. skutečně zastižených geotechnických podmínek lze v trase tunelu uskutečnit úpravou množství drátků nebo změnou pevnostní třídy betonu.

Oproti segmentovému ostění vzniká lisováním betonu homogenní prstenec bez pracovních spár, čímž se minimalizuje riziko průsaků i imperfekcí spojených s montáží segmentů prefabrikovaného ostění. Ostění je navrženo jako odolné proti průsakům, což je u standardních monolitických ostění charakterizováno přísnějšími podmínkami pro odchylku od projektované, teoretické tloušťky ostění. To je dáno snahou o zamezení náhlé změny tloušťky ostění a s ní spojenou změnou tuhosti ostění i nerovnoměrným vývinem hydratačního tepla v rané fázi výroby ostění. V případě nadvýrubů dojde k jejich výplni betonem lisovaného ostění. To je z hlediska aktivace ostění a minimalizace deformace nadloží pozitivní, z hlediska vzniku a rozvoje trhlin může být problematické.

Použití drátkobetonu s vysokou pevností má pozitivní vliv na omezení vzniku trhlin od smršťování a obecně od objemových změn. Proto je v případě ostění z lisovaného betonu vždy nutné přípustné odchylky od předepsané tloušťky stanovit pro konkrétní případ použití v projektové dokumentaci. Příčné spáry mezi jednotlivými prstenci je nutné těsnit pomocí vnitřních těsnících pásů. Vzhledem ke krátkému časovému intervalu od provedení výrubu po betonáž prstence lisovaného ostění je nutné stanovit jeho zatížení pomocí matematického modelování opět pro konkrétní případ použití, zejména se zohledněním původní geostatické napjatosti před provedením výrubu a deformačních charakteristik horninového masivu.

Vyztužování betonu drátky (drátkobeton) má oproti klasické prutové výztuži pozitivní vliv na omezení vzniku a šíření trhlin, a tím může přispět ke zvýšení životnosti železobetonové konstrukce. Drátkobeton zvyšuje houževnatost a reziduální pevnost betonu, což přispívá k delší životnosti konstrukce, zejména v prostředích, kde je životnost ovlivněna korozí výztuže pronikáním agresivních látek trhlínami. Pokud umožňuje s ohledem na únosnost náhradu prutové výztuže, zkracuje dobu výstavby a snižuje náklady spojené s dopravou a vázáním výztuže.

Ocelové drátky (vlákna) jsou rovnoměrně rozptýleny v betonové matici, což zajišťuje všesměrné vyztužení. Tato orientovaná výztuž se aktivuje již při vzniku mikrotrhlin a brání tak jejich prodlužování a rozevírání. Drátkobeton má nižší objemové změny od smršťování a je schopen lépe odolávat tahovému napětí způsobenému smršťováním a jinými vynucenými deformacemi, čímž omezuje vznik smršťovacích trhlin a deformací. Ocelová vlákna "přemostují" vzniklé trhliny a umožňují přenos tahového napětí i po jejich vzniku. Díky tomu je drátkobeton houževnatější a vykazuje vyšší zbytkovou (reziduální) pevnost v

tahu i po objevení viditelných trhlin. Oproti prutové výztuži se snižuje riziko koroze související s životností konstrukce. Koroze je spuštěna vniknutím agresivních látek (především chloridů a CO_2) trhlinami k výztuži železobetonové konstrukce. Tím, že drátkobeton omezuje šířku trhlin (nebo je v počátečních fázích zcela eliminuje), zpomaluje nebo omezuje přístup agresivních látek k ocelové výztuži. Vzhledem k odlišnému působení prutové a rozptýlené výztuže je i vliv na únosnost a životnost konstrukce jiný a v případě drátkobetonu méně škodlivý. Drátkobeton rovněž vykazuje zlepšenou houževnatost a schopnost odolávat tahovému napětí i po vzniku trhliny, což zvyšuje odolnost drátkobetonu vůči dynamickým účinkům, rázům a vibracím. To je důležité pro dlouhou životnost namáhaných konstrukcí, kdy se vlivem dopravy v tunelu přenáší technická seismická do jeho ostění.

7.3. Porovnání obou technologií

První porovnání je provedeno s ohledem na možnosti vyztužení, neboť segmentové ostění umožňuje použití prutové výztuže i drátkobetonu, zatímco lisovaný beton vyžaduje zpravidla použití pouze drátkobetonu. Výjimku tvoří pouze tunely ražené v hornině s vysokou samonosnou funkcí bez výrazných přítoků podzemní vody, které umožňují za razícím štítem umísťovat samonosnou prutovou výztuž a použít standardní bednicí vůz známý z konvenčně ražených tunelů. Takový stroj ale nebude s vysokou pravděpodobností vzhledem ke geotechnickým podmínkám České republiky možné v našich podmínkách použít a jeho nasazení by bylo reálné spíše v geologických podmínkách severských zemí. Hodnocení použitelnosti jednotlivých materiálů a technologií výstavby je provedeno pro různá kritéria přehledně v následujících tabulkách.

Porovnání obecného vyztužování prutovou výztuží a drátky (vláknobeton)		
Aspekt	Prutová výztuž	Drátkobeton
Typ výztuže	Svařování a montáž komplikovaných armokošů. Velká pracnost, nutnost přesného vázání.	Vlákna se přidávají přímo do betonové směsi.
Doba výroby	Pomalá kvůli ruční montáži armokošů do bednění před každou betonáží.	Značné zrychlení výroby! Odpadá montáž výztuže, což je výrazný časový úsek.
Pracnost	Vysoká spotřeba pracovní síly a nutnost kvalifikovaných vazačů (rizika plynoucí z „lidského faktoru“).	Snížení pracnosti a počtu pracovníků.
Kvalita, riziko vzniku chyby	Riziko chybného uložení výztuže (posun při betonáži/vibraci) nebo nedokonalého zhutnění za hustou výztuží (vznik "stínů").	Rovnoměrná kvalita po celém objemu, eliminace rizika posunu výztuže a zjednodušení čerpání i zhutňování.

Porovnání vyztužování prutovou výztuží a drátky (tybinky x lisované ostění)		
Aspekt	Segmenty (tybinky)	Lisovaný drátkobeton
Odolnost proti vzniku trhlin	Trhliny vznikají při aktivaci prutové výztuže; šířka trhlin je regulována průměrem a vzdáleností prutů.	Omezení vzniku a šířky trhlin (včetně smršťovacích). Ocelová vlákna "přemostňují" trhliny, což zvyšuje spolehlivost a trvanlivost ostění.
Houževnatost	Po dosažení mezní pevnosti prutů následuje obvykle křehčí porušení.	Výrazně vyšší houževnatost (schopnost pohlcovat energii po vzniku první trhliny)
Namáhání	Složitý návrh výztuže pro zachycení různých namáhání (doprava, montáž	Všesměrové vyztužení je ideální pro složité a nepředvídatelné namáhání

	erektořem, tlak lisů, finální horninový nebo hydrostatický tlak).	(např. při montáži, bodovém zatížení, rázovém namáhání, asymetrickém namáhání apod).
Životnost (vodonepropustnost)	Větší šířka trhlin může usnadnit pronikání vody a agresivních látek k výztuži s negativními dopady na únosnost a životnost ostění.	Vyšší odolnost proti průsakům vody (důležité pro vodotěsné ostění) díky omezení šířky a četnosti trhlin.

Obecné porovnání obou technologií je provedeno podle více kritérií.

Aspekt	Segmentové ostění (S)	Lisované ostění (L)	Výhoda
Technická vyspělost	Osvědčená a dominantní technologie používaná po celém světě. Standardizované procesy a materiály ověřené celou řadou aplikací v různých geotechnických podmínkách.	Specializovaná, méně rozšířená. Vyžaduje speciální konstrukci tunelovacího stroj TBM a použití speciálního bednění (posuvnou formu).	(S)
Rychlost instalace	Cyklický proces. Čas se prodlužuje v souvislosti s osazováním a spojováním segmentů v příčném i podélném směru a nutností injektáží výplně nadvýrubu za ostěním (aktivace ostění).	Kontinuální proces. Eliminace montážního cyklu spojeného se skladbou segmentů do prstenců a spojováním prstenců v podélném směru i výplň nadvýrubu betonem ostění odstraňuje nutnost provádění injektáže. To vede k teoreticky nejvyšší rychlosti postupu.	(L)
Logistika	Složitý proces od výroby segmentu přes jeho deponování na meziskladech až po uložení do ostění. Vyžaduje nepřetržitou dopravu a manipulaci s objemnými a těžkými segmenty po povrchu zemí i v tunelu.	Jednoduchá. Logistika je redukována na dovoz betonu mixy. Možnost optimalizace polohy betonárny v rámci lokality. Zásadní úspora času zejména u dlouhých tunelů.	(L)
Vodotěsnost	Vodotěsnost provedení segmentů je dána optimálním prostředím pro jejich výrobu. Vodotěsnost ostění jako celku je závislá na kvalitě materiálu těsněných vložek a na přesném osazení jednotlivých segmentů do prstenců v příčném i podélném směru. To může být problematické zejména ve směrových a výškových obloucích vedení trasy. Spáry mezi segmenty představují kritická místa s rizikem obtížně sanovatelných průsaku.	Výsledkem je monolitický prstenec ostění bez podélných spár (ve směru tunelu. Příčné spáry mezi bloky betonáže (monolitickými prstenci) je možné těsnit vnitřními těsnicími pásy. Vzhledem ke stáří betonu jednotlivých po sobě betonovaných prstenců lze očekávat určitou míru spojení betonu prstenců i v podélném směru. Technologie vytváří minimální počet pracovních spár a těsné spojení s horninou zajišťuje vynikající vodotěsnost.	(L)
Materiál	Používá se drátkobeton nebo standardní beton s prutovou výztuží s běžnou dobou tuhnutí bez nároků na rychlý nárůst pevnosti. To umožňuje optimalizovat recepturu směsi pro podmínky prefabrikace.	Nasazení technologie vyžaduje speciální recepturu s požadavky na dobrou čerpatelnost a rychlý nárůst pevnosti s ohledem na zajištění rychlosti ražby a délku bedněného úseku.	(S)

Nároky na výrobu ostění	Vyztužování a betonáž probíhá v řízených podmínkách výrobní haly s možností přizpůsobení procesu výroby požadavkům na výsledný výrobek s přesně definovaným tvarem i pevnostními parametry.	Výroba probíhá v prostředí tunelu se všemi riziky, které tento způsob betonáže přináší (tvorba nadvýrubů, nutnost těsnění betonovaného prostoru proti vodě, riziko odpadávání úlomků horniny do bnetonovaného prostoru, nutnost speciální úpravy tunelovacího stroje, ošetřování prstence po odbednění (teplota, vlhkost). Skutečná tloušťka ostění závisí na skutečném tvaru výrubu.	(S)
Stabilita výrubu	Stabilita výrubu je zajištěna typem a konstrukcí tunelovacího stroje pro konkrétní geotechnické podmínky. Segmentové ostění je schopné okamžitě přenášet zatížení, pro které je dimenzované. Není vyžadována vysoká samonosnost horninového masivu.	Stabilita výrubu na čelbě je zajištěna typem a konstrukcí tunelovacího stroje, stabilita líce výrubu musí umožnit časovou prodlevu potřebnou pro betonáž ostění. Nasazení technologie je tak limitované kvalitou horninového masivu a hydrogeologickými poměry (tlakem podzemní vody)	(S)
Geotechnická rizika	Segmenty jsou velmi robustní při přenášení očekávaných zatížení a jsou flexibilní vůči proměnlivým geotechnickým podmínkám. Dimenzování segmentů je při konstantní tloušťce možné prutovou výztuží nebo ocelovými vlákny (drátkobeton).	Lisované ostění je technologicky náročnější a má velmi přísné požadavky na stavební materiály a řízení procesu výroby. Metoda je efektivní pouze v takových geotechnických podmínkách, kdy je doba betonáže ostění a případně tuhnutí betonu kratší než doba potřebná pro zajištění stability výrubu a zachycení významné deformace masivu. To vyžaduje přesnou prognózu geotechnických podmínek před čelbou a provádění geotechnického monitoringu, což má při ražbě TBM své limity.	(L)
Investiční náklady	Střední až vysoké (v závislosti na délce tunelu, logistice a prefabrikaci). Jedná se o standardní technologii s dobře stanovitelnou cenou za výrobu segmentů, logistikou i výrobou a provozem tunelovacího stroje. Menší citlivost na změnu očekávaných geotechnických podmínek.	Potenciálně nižší na velmi dlouhých úsecích s relativně „homogenním“ prostředím, díky úspoře času, vyloučením výplňové injektáže a snazší logistikou spojenou s výrobou a dopravou směsi do tunelu. Lze očekávat vyšší náklady spojené s vývojem a úpravou vybavení TBM pro potřeby použití lisovaného betonu. Vyšší citlivost na změnu očekávaných geotechnických podmínek a provádění případných doprovodných opatření.	(S/L)

8. PODMÍNKY PRO NAsAZENÍ OSTĚNÍ Z LISOVANÉHO BETONU

Nasazení tunelovacích strojů je obecně podmíněno celou řadou technicko-ekonomických a časových faktorů. Patří k nim:

A. Geologické a hydrogeologické podmínky

A.1 Typ horniny: tunelovací stroje jsou navrženy pro různé typy horninového masivu, jako jsou např. tvrdé vyvřelé horniny, měkké sedimenty, nebo i proměnné geologické podmínky. Pro tvrdé horniny se používají stroje typu Hard Rock TBM. Pro měkké horniny a proměnné geologické podmínky se volí stroje typu EPB (Earth Pressure Balance) nebo Slurry TBM.

A.2 Přítomnost a režim podzemní vody: V oblastech s vysokou hladinou podzemní vody je nutné použít tunelovací stroj, který zajišťuje stabilitu čelby a minimalizuje riziko průsaků (např. Slurry TBM).

A.3 Stabilita horniny: V nestabilních podmínkách, kde hrozí tvorba nadbýrubů nebo bez včasného podepření kolaps výrubu, jsou tunelovací stroje výhodné díky možnosti prakticky okamžitého zajištění stability výrubu.

B. Délka a průměr tunelu

Použití tunelovacích strojů je ekonomicky efektivní při dlouhých tunelech (obvykle délky větších než 2 km), kde vysoké počáteční náklady do tunelovacího stroje a jeho montáže vyváží rychlost ražby nebo snížení rizik při výstavbě oproti konvenčním tunelovacím metodám. Průměr tunelu určuje konstrukční typ a velikost TBM. Stroje jsou vyráběny v různých průměrech, od menších pro traťové tunely metra nebo kolektory o průměru cca 3 až 6 metrů až po obrovské stroje pro silniční nebo železniční tunely o průměru 10 až 15 metrů.

C. Logistika a přístupnost staveniště

C.1 Prostor pro provoz TBM: Potřeba místa pro montáž TBM a jeho podpůrných systémů, ke kterým patří např. zdroj elektrické energie, pásové dopravníky, větrání, odvod vody, doprava materiálů z a do tunelu.

C.2 Přístup k portálu (montážní komory): V některých oblastech může být problém dopravit a nainstalovat těžký a rozměrný tunelovací stroj do prostoru portálu tunelu nebo jeho doprava šachtami do podzemních montážních a startovacích komor, ve kterých se předpokládá montáž a zahájení ražby.

D. Environmentální a urbanistické faktory

D.1 Dopady na povrch území: tunelovací stroje jsou preferovány v městských oblastech, kde je nutné omezit hluk, vibrace a minimalizovat negativní projevy ražby na povrchu území, ke kterým patří především sedání povrchu nebo ovlivnění režimu podzemní vody

D.2 Doprava rubaniny: Logisticky náročné v hustě osídlených oblastech, kde je nutné efektivně dopravovat velké množství materiálu z prostoru portálů nebo šachet na dočasné nebo trvalé deponie.

E. Časový harmonogram výstavby

E.1 Rychlost ražby: tunelovací stroj dokáže při dlouhých tunelech v porovnání s konvenčními tunelovacími metodami zajistit vysokou rychlost ražby. Při stanovení rychlosti ražby je nutné zohlednit technologické přestávky na údržbu stroje a prognózu použití doprovodných opatření v geotechnických podmínkách, které neumožňují ražení standardními postupy.

E.2 Přípravné práce: Zprovoznění tunelovacího vyžaduje v porovnání s konvenčními tunelovacími metodami delší přípravu (doprava a montáž stroje, příprava zázemí), což může prodloužit okamžik zahájení samotné ražby.

F. Náklady a finanční možnosti

F.1 Počáteční investice: Tunelovací stroje jsou drahé a počáteční náklady musí vyvážit rychlost, kvalita a bezpečnost ražby jak s ohledem na práce prováděné v podzemí, tak omezení negativních vlivů ražby na objekty v nadloží.

F.2 Provoz a údržba: Náklady na provoz a údržbu stroje a jeho součástí jsou zpravidla vyšší, než u mechanizace používané při konvenčním ražení.

G. Zajištění stability tunelu

Nasazení tunelovacího stroje umožňuje okamžitou instalaci ostění, což je výhodné v nepříznivých geotechnických podmínkách nebo v případě, kdy je nutné minimalizovat deformace nadloží (městská zástavba, inženýrské sítě citlivé na deformace apod.). Tloušťka ostění je v trase tunelu konstantní a musí umožnit stupněm a způsobem vyztužení jeho funkční použití ve všech očekávaných geotechnických podmínkách a z nich plynoucích zatíženích.

H. Zkušenosti a dostupnost technologií

H.1 Dostupnost stroje: Tunelovací stroje musí být často vyráběny na zakázku, což může ovlivnit jak časový harmonogram výstavby, tak ekonomickou náročnost jejich nasazení. Tunelovací stroje je možné pro zakázku po repasi nebo úpravě pro konkrétní použití pronajmou. V případě tunelovacího stroje pro použití monolitického ostění z lisovaného betonu se bude v první fázi jednat o prototyp, který zatím nebyl při ražbě tunelů použit a v jeho ceně budou zahrnuty i investice do jeho vývoje. Opakované použití tohoto typu stroje na jiné stavbě formou pronájmu bude záviset na vhodných geotechnických podmínkách a ochotě investora nebo zhotovitele technologii ostění z lisovaného betonu použít.

H.2 Zkušenosti týmu: Použití tunelovacích strojů vyžaduje kvalifikovaný personál a zkušenosti s provozem této technologie v konkrétních geotechnických podmínkách. Zkušenost týmu má vliv na rychlost ražby, výši nákladů na provoz a údržbu a celkově na úspěšnost projektu.

Pro rozhodování o způsobu ražby tunelovacím strojem nebo konvenčními tunelovacími metodami je nutné tyto faktory vyhodnotit. Při nasazení tunelovacího stroje s použitím ostění z lisovaného betonu hrají zásadní roli dále uvedená kritéria nebo okrajové podmínky.

8.1. Geotechnické podmínky

I když technologie ražení tunelů pomocí tunelovacích strojů umožňuje jejich nasazení v širokém spektru geotechnických podmínek, technologie používající pro ostění lisovaný beton má svá specifika a omezení. Jedná se především o zvýšené požadavky na samonosnost horninového masivu, která musí zaručit stabilní líc výrubu v době od provedení výrubu až po zabetonování celého prstence monolitického ostění. V okamžiku vyplnění prostoru záběru betonem přebírá nosnou funkci konstrukce podpírající líc výrubu v první fázi bednicí forma prstence, následně po dosažení požadované pevnosti betonu již vlastní ostění. V počáteční fázi betonáže před vyplněním celého prostoru záběru betonem bude stabilitu nezajištěného výrubu zajišťovat teleskop vysunutý do prostoru nezajištěného výrubu. Po úplném naplnění prostoru betonovou směsí se teleskop postupně zasune, kdy se zároveň uvolněný prostor po teleskopu vyplní betonem a účinkem lisů dojde v horninovém masivu k plné aktivaci nově provedeného prstence. V tuto chvíli také končí dočasná funkce hydroizolační fólie, neboť tlak betonu neumožňuje promísení směsi s

vodou. Čerstvě vybetonovaný a kativovaný prstenec (společně s podpůrnou funkcí bednicí formy) bude před začátkem tuhnutí betonu zajišťovat stabilitu výrubu podle hydraulických principů (nestlačitelnost směsi sevřené mezi líc výrubu a tuhý prstenec formy bednění). K odbednění dojde až po požadovaném nárůstu pevnosti lisovaného betonu, jejíž časový průběh pozitivně ovlivňuje tlak lisů.

Pro zamezení přítoků podzemní vody do betonovaného prostoru slouží hydroizolační fólie, která je po svaření navlečena do teleskopu a průběžně s jeho zasouváním čerpaným betonem dotlačena k hornině. I když tato úprava razicího stroje může za určitých podmínek zajistit omezení přítoků podzemní vody do prostoru betonáže prstence z lisovaného betonu, jsou druhým významným aspektem omezujícím nasazení tohoto postupu výstavby hydrogeologické podmínky, a především velikost hydrostatického tlaku. Tlakový režim podzemní vody může nasazení ostění z lisovaného betonu výrazně zkomplikovat a bude vyžadovat použití doprovodných opatření (těsnící injektáže), která mohou mít negativní vliv na rychlost ražby a cenu díla.

Třetím zásadním faktorem je strukturní stavba horninového masivu. I při vysoké samonosnosti horninového masivu může být např. jeho tektonické porušení nebo nepříznivá orientace diskontinuit vzhledem k výrubu příčinou vytváření nestabilních bloků horniny, které mohou vypadávat do prostoru betonáže prstence ostění z lisovaného betonu. Přítomnost bloků horniny v betonu prstence je nežádoucí jak s ohledem na jeho statickou funkci, tak i z hlediska vodonepropustnosti ostění, která je zajištěna pouze kvalitou betonu a prstence jako celku. Beton ostění musí být homogenní a nesmí obsahovat úlomky horniny. Tento problém částečně řeší funkce teleskopu, který stabilizuje horninu za pláštěm razicího stroje v první fázi po provedení výrubu. Lze předpokládat, že k případnému vypadávání horninových bloků bude docházet již při vlastním rozpojování horninového masivu řeznou hlavou a případně v oblasti pláště štítu v oblasti L1.

Konstrukčně nebude zřejmě možné vyvinout hybridní stroj s možností použití prefabrikovaného ostění z tybinků a monolitického ostění z lisovaného betonu s možností přepínání těchto dvou „módů“ podle skutečně zastížených geotechnických podmínek. Proto je technologie lisovaného monolitického ostění použitelná v relativně „homogenním“ prostředí, které splňuje výše uvedené požadavky na výši hydrostatického tlaku a stabilitu líce výrubu bez větších nadvýrubů a vypadávání bloků horniny.

Protože tunelovací stroje jsou vzhledem poměrně vysoké pořizovací ceně a zajištění zázemí pro jeho provoz nasazovány zpravidla u tunelů v délce řádu kilometrů, je nutné geotechnický průzkum zaměřit na zjišťování podmínek vhodných pro ražbu tímto typem stroje v celé délce trasy tunelu. V případě zastížení anomálií bude nutné provádět předstihová doprovodná opatření, která zlepší kvalitu horninového masivu tak, aby bylo možné rizikovým úsekem projít. Bude se jednat zřejmě především o stabilizační nebo těsnící injektáže, které zvýší samonosnost a vodotěsnost horninového masivu. Aby byla technologie použití ostění z lisovaného betonu časově i ekonomicky konkurenceschopná s nasazením standardních typů tunelovacích strojů, mělo by být takových anomálií v trase tunelu minimum.

8.2. Horninový tlak a zatížení ostění

Ražba pomocí moderních tunelovacích metod souvisí s využitím samonosnosti horninového masivu. Počátky jiného přístupu k vnímání horninového tlaku a obecně horninového masivu jako součásti nosného systému ostění-hornina jsou spojovány s ražbou tunelů pomocí Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) a empirickými poznatky získanými při ražbě tunelů s používáním nových prvků zajištění stability výrubu. K těm patřilo zejména systémové kotvení s prakticky okamžitým zajištěním líce výrubu stříkaným betonem. Tyto poznatky vedly pro stanovení zatížení působícího na tunelové ostění postupně k opuštění klenbových teorií a jejich nahrazení modernějšími metodami. Ty vycházely z poznatku, že tlak na ostění se za určitých předpokladů zmenší v případě, že je umožněna určitá deformace ostění a tím i

horninového masivu. Tento princip je znám i z hornictví, kde používaná korýtková výztuž umožňuje prokluz v zámcích a část zatížení tak může přenášet horninový masiv v okolí výrubu. Proto byl pojem „horninová klenba“ postupně nahrazen pojmem „nosný horninový prstenec“, který se vytváří v okolí výrubu a který je při ražbě případně různým způsobem zesilován a vyztužován. Na rozdíl od principu horninové klenby, pod kterou hornina působí na ostění pouze jako zatížení, se nosnému horninovému prstenci přisuzuje i určitá míra nosné funkce, jak už z názvu vyplývá.

Tento princip názorně ukazuje tzv. Fenner-Pacherova křivka, která znázorňuje závislost velikosti reakce horninového masivu na deformaci výrubu, resp. horninového masivu. Z křivky je patrné, že do určité hodnoty deformace výrubu klesá horninový tlak působící na ostění. Vlivem deformace a porušením geostatické napjatosti dochází v okolí výrubu nejen k přeskupení napětí, ale i k postupnému rozvolňování horninového masivu, a tím ke zhoršování jeho geotechnických parametrů. Tvar křivky a okamžik, ve kterém dosahuje její průběh minima tlaku p , závisí na geotechnických parametrech horninového masivu a schopnosti masivu zajistit po určitou dobu výrub bez zajištění stabilní.

V případě, že je ostění do výrubu vsazeno příliš brzy nebo je jeho tuhost příliš velká (bod A křivky), nedojde v horninovém masivu k optimálnímu přeskupení napětí a masiv není odpovídajícím způsobem zapojen do nosného systému „ostění-hornina“. V takovém případě se zatížení ostění blíží hodnotě primární geostatické napjatosti. Pokud je naopak ostění do výrubu vsazeno příliš pozdě, nebo je jeho tuhost malá (bod C křivky), může dojít k nadměrnému namáhání horninového prstence, který je koncentrací napětí drcen, nebo dochází k jeho rozvolňování a tím ke ztrátě nosné funkce, která může v extrémním případě vést až ke kolapsu ostění s následným zavalením tunelu.

Nalezení optimálního okamžiku vsazení ostění do výrubu a jeho správné tuhosti (bod B křivky) je exaktně obtížné, je ale možné na základě měření deformací horninového masivu při ražbě prostředky geotechnického monitoringu. Možnost optimalizace okamžiku instalace tunelového ostění do výrubu a řízení jeho tuhosti je obecně spojeno spíše s konvenčními tunelovacími metodami. Technologie ražby pomocí tunelovacích strojů má v tomto směru omezené možnosti, neboť rychlost ražby je v porovnání s konvenčními tunelovacími metodami vysoká, ostění je zpravidla instalováno hned za pláštěm stroje a tuhost ostění zpravidla neumožňuje větší deformace horninového masivu jak před čelbou, tak po provedení výrubu na jeho líci. V případě ostění z prefabrikovaných dílců je určitá deformace horninového masivu ještě možná v časovém intervalu mezi osazením ostění a jeho aktivací výplňovou injektáží mezi lícem výrubu a rubem ostění. V případě ostění z lisovaného betonu je aktivace ostění součástí technologie a beton je tlakem lisů zatlačen do všech nadvýrubů i puklin v horninovém masivu okamžitě po zahájení lisování betonu.

Tloušťka ostění je v případě ostění z lisovaného betonu celé délce tunelu dána průměrem řezné hlavy a lícem ostění definovaným tvarem bednění. Odchytky od teoretické tloušťky jsou tvořeny případnými nadvýrubu. Únosnost ostění je tak možné v případě ražby pomocí tunelovacích strojů řídit pouze stupněm vyztužení ostění a pevnostní třídou betonu. Výztuž ostění z lisovaného betonu je možná pouze pomocí ocelových drátků, přičemž množství drátků na objem betonu má své limity.

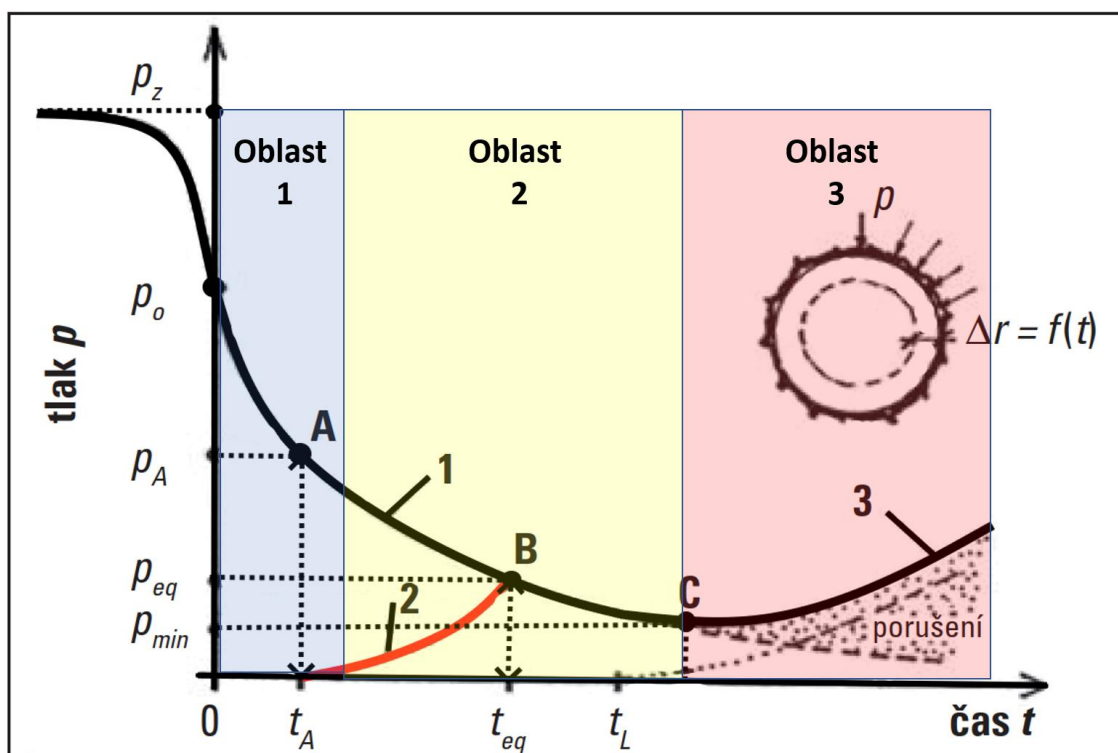
Fenner-pacherovu křivku je možné z hlediska vývoje horninového tlaku rozdělit do tří oblastí.

Oblast 1 je charakteristická zvýšeným tlakem na ostění a jeho vložení je v případě možnosti řízení deformace masivu vyžadováno v souvislosti s požadavkem na omezení deformace nadloží. Oblast 1 je rovněž charakteristická pro použití tunelovacích strojů, neboť jejich rychlost ražby je vysoká a zpravidla používané jednoplášťové prefabrikované ostění má okamžitě požadovanou únosnost a tím i tuhost.

Oblast 2 je charakteristická spíše pro ražbu pomocí konvenčních tunelovacích metod s členěním výrubu a s dvouplášťovým ostěním, kdy od provedení záběru do plného zajištění výrubu ostěním a kotvením

uplyne v porovnání s ražbou tunelovacími stroji výrazně delší časový interval. Svou roli hraje i skutečnost, že primární ostění není po nástřiku na líc výrubu tuhé a v období největších deformací horninového masivu je jeho tuhost nízká. S ustalováním deformací masivu tuhost i únosnost primárního ostění narůstá. Sekundární ostění je pak betonováno až po ustálení deformací nebo po výrazném snížení rychlosti deformace primárního ostění. To je v případě ražby pomocí tunelovacích strojů možné pouze v případě dvouplášťového ostění. Ten je však spíše výjimkou, než pravidlem.

Oblast 3 byla charakteristická spíše pro klasické tunelovací metody, kdy postup výstavby, způsob rozpojování a zejména mala rychlost podepření horninového masivu obezdívkou způsoboval rozvolnění horninového masivu v okolí výrubu, ztrátu jeho samonosné funkce a nutnost použití masivní obezdívky, která byla schopna vzdorovat horninovému tlaku porušeného horninového masivu (klenbové teorie). V případě moderních konvenčních nebo kontinuálních ražeb se jedná spíše o havarijní scénáře.



Obrázek 9: Fenner – Pacherova křivka

Pokud je v určité fázi ražení výrub podepřen ostěním, případně jsou vlastnosti horninového masivu zlepšeny doprovodnými opatřeními, dojde v něm k obnovení rovnovážného stavu, zatížení výrubu se dále nezvětšuje a postupně dojde k uklidnění deformací. Čím dříve je ostění do výrubu vsazeno, tím větší zatížení na něj působí, neboť tím větší reakce ostění je potřeba k obnovení rovnovážného stavu. Pokud bychom zanedbali přetváření horninového masivu ještě před čelbou výrubu, byl by v čase „nula“ po provedení výrubu potřebný odpor ostění rovnající se původní geostatické napjatosti v místě výrubu.

S postupujícím časem od provedení výrubu a s narůstající deformací horninového masivu zatížení ostění klesá, ale pouze do kritického bodu označeného na křivce jako „C“, za kterým dochází vlivem nadměrné deformace a změny napjatosti v okolí výrubu k degradaci horninového masivu, zhoršení jeho geotechnických parametrů a v důsledku toho opět k nárůstu horninového tlaku.

Pokud by v optimálním čase nebylo do výrubu vsazeno ostění potřebné tuhosti nebo nebyla včas provedena doprovodná opatření, mohlo by v závislosti na kvalitě horninového masivu a velikosti raženého díla dojít až ke kolapsu tunelu a zavalení výrubu. Křivka reakce horninového masivu na postup ražby má na obvodě výrubu v různých bodech odlišné tlakové i deformační parametry. Její průběh závisí na kvalitě horniny, velikosti a tvaru profilu tunelu, výšce nadloží apod.

V oblasti čelby dochází při ražbě tunelu k všesměrnému přeskupování napětí, zatímco ve větší vzdálenosti od čelby je možné tento proces redukovat na dvourozměrný problém. V praxi to znamená, že ke změně napjatosti horninového masivu dochází ještě před čelbou tunelu, tj. před provedením záběru. Původní geostatická napjatost poklesne na určitou nižší hodnotu. K dalšímu poklesu dochází v intervalu od provedení záběru po instalaci ostění.

V případě použití prefabrikovaného ostění z tybinků je ostění schopné okamžitě přenášet na něj působící zatížení. V případě betonáže monolitického ostění z lisovaného betonu dochází v čase k nárůstu pevnosti a tím i tuhosti betonu. Dokud není ostění dostatečně tuhé, přebírá jeho nosnou funkci jeho ocelová bednicí forma. V počáteční fázi po odbednění může být monolitické ostění stále dostatečně „měkké“, aby bylo schopné bez výrazného poškození (vzniku trhlin nadkritické šířky a hloubky a případně podrcení) přenášet stále probíhající deformace.

V principu může dojít z hlediska provádění ostění do deformujícího se výrubu ke třem situacím:

- A. V ideálním případě dochází se zvyšováním tuhosti monolitického ostění ke snižování jeho deformací a dosažení rovnovážného stavu. Ostění je do výrubu vsazeno v pravý okamžik, má ideální tuhost a působící zatížení nevede k dosažení mezního stavu únosnosti nebo použitelnosti s tím, že je zajištěna i jeho vodonepropustnost.
- B. Pokud je ostění vsazeno příliš brzy, resp. je tunel ražen v horninovém masivu s malou samonosností, dochází rychle k enormnímu namáhání ostění horninovým tlakem vedoucím k jeho poškození. Jako opatření k minimalizaci tohoto rizika je při ražbě pomocí TBM zpravidla prováděna zpevňující injektáž horninového masivu. V extrémních případech se výrub zajistí konvenčními metodami ražby se stabilizací líce výrubu primárním ostěním ze stříkaného betonu, vyztužení nosného horninového prstence radiálními kotvami apod.
- C. Třetí situace je vzhledem k rychlosti ražby pomocí tunelovacích strojů spíše teoretická. Pokud by bylo ostění vsazeno do výrubu příliš pozdě, nebo by nemělo dostatečnou tuhost, mohlo by dojít vlivem rozvolnění horniny k poškození nosného horninového prstence v okolí výrubu a ztrátě jeho stability. V případě použití ostění z monolitického lisovaného betonu by k této situaci mohlo dojít v případě, že by bednicí forma, která přebírá do doby náběhu pevnosti betonu ostění jeho nosnou funkci, nebyla dostatečně nadimenzovaná a došlo by k jejímu kolapsu. Následně by došlo i k poškození ostění, neboť by ještě nedosáhlo požadovaných pevnostních parametrů.

Vývoj horninového tlaku na ostění z lisovaného betonu může být limitujícím faktorem použití navrhované tunelovací metody, neboť ostění není možné vyztuzit prutovou výztuží a k dispozici je pouze použití vláknobetonu. Použití lisovaného betonu však umožňuje oproti monolitickým betonům používaným u sekundárního ostění konvenčně ražených tunelů dosahovat vyšších pevností i jejich rychlejšího náběhu.

8.3. Principy návrhu a statického posouzení ostění

8.3.1. Obecný přístup k návrhu ostění

Primárním cílem návrhu jednoplášťového monolitického ostění z lisovaného betonu je zajistit dlouhodobou bezpečnost a provozuschopnost tunelu včetně:

- přenesení stálého zatížení (vlastní tíhy ostění, provozní zatížení),
- přenesení a rozdělení tlaků od okolní horniny a podzemní vody,
- splnění mezních stavů použitelnosti (omezení vzniku trhlin, průhybů, hloubka průsaku apod.),
- zajištění odolnosti vůči havarijním a speciálním zatížením (požár, náraz vozidla, seizmika atd.).

8.3.2. Nutné vstupní hodnoty statického výpočtu a možnosti jejich zajištění

- Geometrické parametry — rozměry kruhového průřezu tunelu, výška nadloží, vzdálenost od podzemních a povrchových objektů v nadloží (inženýrské sítě, křížení s jinými podzemními díly, podsklepení povrchových objektů, jejich citlivost na deformace způsobené ražbou).
- In-situ napětí — vertikální a horizontální složky napětí, které mohou být významné zejména u tunelů s vysokým nadložím nebo při ražbě v prekonsolidovaném horninovém masivu.
- Geotechnické parametry horninového masivu s ohledem na použité konstitutivní vztahy matematického modelu horninového masivu a jeho interakce s tunelovým ostěním.
- Hydrogeologické podmínky — úroveň hladiny podzemní vody, režim podzemní vody v okolí výrubu/ostění.
- Vlastnosti betonu a výztuže, pevnostní a deformační parametry, časový náběh pevnosti v daných podmínkách postupu výstavby.
- Postup výstavby — průběh ražby, doba mezi provedením výrubu, zajištěním jeho stability pláštěm stroje, teleskopem a dokončením jednoplášťového ostění z lisovaného betonu, které postupně přebírá svou statickou funkci. Poměr předpokládaného náběhu působení zatížení především horninovým a hydrostatickým tlakem a náběhu pevnosti nově vybetonovaného ostění.

8.3.3. Základní metody stanovení zatížení horninovým tlakem

Při ražbě pomocí tunelovacích strojů je zjišťování deformačních projevů ražby na horninový masiv a stanovení zatížení horninovým tlakem problematické, neboť možnost mapování projevů horninového tlaku nebo tvorby nadvýrubů je na čelbě nebo lici výrubu velmi omezená.

A. Analytické metody

Používají se zejména v nižších stupních projektové dokumentace pro první představu o chování tunelového ostění v horninovém masivu.

- Kirschovy řešení (kruhový průřez v nekonečné elastické pružině) pro odhad rozložení napětí.
- Winklerův model, kdy se ostění modeluje jako nosník na pružném podloží s tuhostí pružin odpovídající tuhosti horninového prostředí v okolí výrubu. Tato metoda se užívá v počátečních fázích návrhu pro rychlé odhady deformačního chování ostění a stanovení vnitřních sil v ostění. Metoda je vhodná právě pro kontinuální ražbu pomocí TBM s jednoplášťovým monolitickým ostěním, neboť není schopná postihnout členění výrubu nebo interakci primárního a sekundárního ostění u konvenčně ražených tunelů.

B. Convergence-Confinement metody (C-C)

Tyto metody analyzují vzájemnou interakci mezi deformací výrubu (konvergence) a tuhostí „podpory“ tvořené horninovým masivem. Jsou velmi užitečné pro posouzení fází výstavby a volby vhodného okamžiku dočasného podepření (např. teleskop) a konečné podpory (lisované ostění) do výrubu (viz Fenner-Pacherova křivka). Používá se zejména při ražení pomocí TBM v měkkých horninách.

C. Numerické metody

Umožňují matematické modelování a volbu vhodných konstitutivních vztahů pro optimální vystižení vlastností horninového masivu a jeho reakce na ražení. Vyžadují mnohdy zjištění speciálních vstupních parametrů a kladou tak zvýšené nároky na rozsah geotechnického průzkumu i ověřování výsledků modelování na základě geotechnického monitoringu prováděného v průběhu výstavby. Podle charakteru řešeného problému se provádí volba 2D nebo 3D modelu.

8.3.4. Doporučený postup návrhu

- 1) **Sběr dat:** geotechnický a hydrogeologický průzkum, strukturní stavba horninového masivu, in-situ měření, laboratorní zkoušky pro zjištění potřebných parametrů výpočtu, geometrické vztahy (velikost výrubu, výška nadloží atd.).
- 2) **Předběžný návrh:** rychlé zjištění chování ostění pomocí analytických výpočtů (Winkler, Kirsch) pro odhad velikosti deformací a vnitřních sil v ostění.
- 3) **Volba koncepčního řešení** s ohledem na zajištění požadované funkce podzemní stavby a rizika spojená s její výstavbou i provozováním.
- 4) **Zpřesnění chování horninového masivu i tunelového ostění** pomocí numerického modelování: 2D/3D FEM s kalibrací parametrů. Provádění parametrických studií s cílem zjištění citlivosti modelu na změnu okrajových podmínek nebo geotechnických parametrů. Cílem je zpřesnění prognózy chování horninového masivu, stanovení velikostí deformace nadloží a namáhání tunelového ostění pro předpokládané zatěžovací stavy a jejich kombinace.
- 5) **Statické posouzení průřezu:** návrh výztuže podle ČSN EN1992 pro ULS a SLS, kontrola vzniku trhlin s ohledem na požadavek vodonepropustnosti ostění.
- 6) **Detailní návrh** konstrukční řešení v daných geotechnických podmínkách pro konkrétní typ stroje
- 7) Požadavky na rozsah a obsah projektu **geotechnického monitoringu** prováděného v průběhu výstavby pro ověření předpokladů statického výpočtu, možnosti řízení tunelovacího stroje a případně po uvedení tunelu do provozu.

8.4. Možnosti sledování kvality horninového masivu (GTM)

Sledování kvality horninového masivu při ražbě tunelů pomocí tunelovacích strojů TBM je klíčové pro bezpečnost, efektivitu a optimalizaci postupu ražby. Vzhledem ke specifické technologii TBM je nutné geotechnický monitoring upravit tak, aby získával informace v reálném čase nebo téměř v reálném čase a poskytoval podklady pro rozhodování o provozu stroje a bezpečnosti výrubu.

8.4.1. Možnosti sledování kvality horninového masivu při ražbě TBM

Zásadní informace poskytuje sám tunelovací stroj:

- Krouticí moment řezné hlavy
- Rychlost rotace
- Síla v lisech zajišťujících přitlak na řeznou hlavu a posuv stroje
- Tlak v komorách (u EPB/Slurry TBM)
- Spotřeba energie
- Vibrace a zrychlení

Tyto parametry umožňují odhad vlastností horninového masivu (např. pevnost, abrazivita, homogenita) a detekci změn geologických poměrů.

8.4.2. Informace zjištěné z rubaniny

- Analýza vzorků odebraných z dopravníku
- Zrnitost, vlhkost, plasticita, přítomnost vody nebo plynu.
- Odběr vzorků pro geotechnické zkoušky

8.4.3. Vizualní sledování čelby

- Vizualně při zastavení stroje po přístupu na čelbu
- Průzory v řezné hlavě stroje (stroje typu hard-rock)
- Kamery na řezné hlavě nebo v tlakové komoře (u EPB/Slurry TBM)

V praxi existují zařízení pro vizuální inspekci čelby, ale jejich použití je omezeno podmínkami (zejména u tlakového režimu).

8.4.4. Geofyzikální a geotechnické metody

- Georadar, ultrazvuk, seizmika, mikrovlnné sondy.
- Měření před čelbou pomocí zařízení montovaných na TBM.
- In-situ testy při průchodu stroje (např. pressiometry, cone penetration tests v měkkých horninách).
- Konvergenční měření (deformace výrubu)
- Inklinometry
- Extenzometry
- Hydrogeologické měření (tlaky, přítoky vody)
- Seismické a akustické sledování (mikroseizmika)

8.4.5. Specifika geotechnického sledování při použití TBM

- Omezený přístup k čelbě na rozdíl od klasické NRTM, kde je čelba přístupná.
- Vysoká rychlost postupu: vyžaduje automatizované a kontinuální měření.
- Nutnost časné detekce změn: předcházení haváriím a neplánovaným prostojům.
- Komplexnost zařízení: TBM poskytuje řadu dat – potřeba jejich integrace a analýzy v reálném čase.

8.5. Možnosti omezení vzniku nadvýrubů a jejich sledování

Vznik nadvýrubů při ražbě tunelů tunelovacími stroji (TBM) představuje zásadní problém, protože může vést k nepřípustným poklesům povrchu, resp. nadloží tunelu, k nestabilitě výrubu, poruchám ostění nebo zvýšeným nákladům. Nadvýrub je objem horniny nebo zeminy, který je odtěžen nad projektem požadovaný tvar tunelu. U TBM ražby může vznikat například:

- v oblasti čelby,
- podél horniny mezi ostěním a výrubem,
- nevhodnou volbou řezných nástrojů nebo řezného režimu.

8.5.1. Možnosti omezení vzniku nadvýrubů při TBM ražbě

- Optimalizace konstrukce TBM a řezné hlavy
- Vhodné dimenzování řezné hlavy pro daný geologický profil.
- Použití rozšiřitelných řezných nástrojů jen tam, kde je to nezbytné.
- U Earth Pressure Balance (EPB) a slurry TBM je důležité správné řízení tlakových parametrů.

8.5.2. Přesné řízení tlaků na čelbě

- Zajištění rovnováhy mezi tlakem v čelbě (např. zemní tlak, suspenzní tlak) a napětím horninového masivu.

- Použití senzorů pro monitoring tlaku v předpolí – tlak nesmí být příliš vysoký (eroduje okolní zeminu) ani příliš nízký (čelba se bortí).

8.5.3. Geotechnický monitoring a zpětná vazba

- U moderních TBM lze využívat automatizovaná měření deformací čelby a výrubu.
- Včasné vyhodnocení umožňuje úpravu provozních parametrů.

8.5.4. Geologický průzkum (před- a v průběhu výstavby)

- Detailní znalost geologického prostředí a klasifikace horninového masivu umožňuje předvídat chování horniny.
- U poruchových zón mohou být nasazena předběžná opatření (např. injektáže, zmrazení).

8.5.5. Volba vhodného typu tunelovacího stroje

- Při ražbě ve zvětralých horninách nebo nestabilních sedimentech je vhodné použít EPB nebo slurry TBM.
- TBM s mechanickým rozpojováním (Hard Rock TBM) se používá v kompaktní hornině, kde je nadvýrub méně pravděpodobný – zde hraje roli přesná kalibrace řezných nástrojů.

8.5.6. Školení a zkušenost obsluhy TBM

Ergonomie řízení stroje, zkušenosti obsluhy a přesné dodržování provozních protokolů je klíčové.

Literatura:

Doporučení DAUB (Deutsches Ausschuss für unterirdisches Bauen)

- Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines
Tento dokument poskytuje metodiku pro výběr vhodného typu TBM na základě geotechnických podmínek. Zaměřuje se na minimalizaci rizik, včetně nadvýrubů, prostřednictvím správné volby stroje a technologických parametrů.
- Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground

Doporučení pro výpočet tlaku na čelbě při ražbě v měkkých zeminách. Správné nastavení tlaku je klíčové pro stabilitu čelby a omezení nadvýrubů.

Směrnice ITAtech (International Tunnelling and Underground Space Association)

- Guideline for Use of Rock Classification Systems for Ground Support on TBM Tunnels
Tato směrnice navrhuje upravenou metodologii výběru podpěrného systému pro tunely ražené TBM, využívající klasifikační systémy Q a RMR. Správná klasifikace horninového masivu pomáhá předcházet nadvýrubům.
- Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings
Směrnice poskytuje doporučení pro návrh segmentového ostění tunelů, včetně tolerancí a konstrukčních parametrů, které ovlivňují přesnost výrubu a minimalizaci nadvýrubů.

8.6. Omezení přítoků podzemní vody do prostoru betonáže

Vzhledem k tomu, že přítoky podzemní vody do oblasti tunelovacího stroje s prostorem pro betonáž mohou negativně ovlivnit kvalitu betonové směsi a její parametry, je nutné přítokům v každém případě zabránit. Toho lze primárně docílit těsníci injektážemi, které je možné provádět po zastavení stroje přes vrtací hlavu. Menší přítoky podzemní vody o nízkém tlaku je možné zajistit pomocí hydroizolační fólie, která je pomocí speciálního zařízení (součást tunelovacího stroje) instalována před betonáží na líc

výrubu. Líc výrubu musí splňovat požadavky na pokládku fólie (křivost a drsnost povrchu), aby při betonáži nedošlo k jejímu poškození.

8.7. Vhodný typ tunelovacího stroje

Volba typ tunelovacího stroje úzce souvisí s vlastnostmi horninového masivu a jeho reakcí na ražbu. V případě ražení tunelů pomocí tunelovacích strojů typu Hard-rock ve stabilním horninovém prostředí, které zpravidla nevyžaduje ani stabilizaci líce výrubu pomocí prefabrikovaných dílců je bezproblémové a umožňuje použití monolitického lisovaného ostění bez zásadních problémů v konstrukčním řešení tunelovacího stroje. Bednicí forma pro monolitické ostění z lisovaného betonu je další součástí „návěsu“ tunelovacího stroje.

Vzhledem k tomu, že v mimořádné příznivých geotechnických podmínkách bude zřejmě pro ražbu zvolen tunelovací stroj typu Gripper, bude nutné pro lisování betonu použít speciální lisy, neboť nebude možné využít sílu lisů pro posun tunelovacího stroje (rozepření o boky výrubu). Případně bude pro zajištění přítlaku řezné hlavy štítu a posun stroje použito klasických lisů, které se budou opírat o již vybetonovaný prstenec a zajistí tak jeho slisování. V takovém případě již nepůjde o tunelovací stroj typu Gripper, ale o alternativní konstrukční typ.

V případě zhoršených geotechnických podmínek, kdy je horninový masiv nestabilní a lze očekávat přítoky vody do prostoru betonáže monolitického ostění je nutná speciální úprava tunelovacího stroje, která zajistí okamžitou stabilizaci výrubu (teleskop) a instalaci dočasné hydroizolační membrány, která ochrání prostor betonáže ostění před přítoky vody a změnou konzistence (rozplavením) betonové směsi.

8.8. Limity rychlosti postupu ražení

Provádění monolitického ostění z lisovaného betonu nesmí být důvodem pro omezení rychlosti ražení tunelovacím strojem. Předpokládaný postup ražby tunelu pomocí TBM je 20 m/den. Předpokládá se nasazení při ražbě jednokolejných tunelů metra nebo železničních tunelů.

Jednokolejný tunel metra má poloměr světlého líce ostění 2,65 m, při tloušťce ostění 300 mm je teoretická plocha výrubu 27,34 m² a objem betonu ostění 5,28 m³ na běžný metr tunelu. Při délce záběru 1.5 m je objem prstence 7.92 m³.

Tabulka 4: Teoretické parametry výrubu a ostění tunelů

Teoretické parametry tunelů	Poloměr výrubu [m]	Plocha výrubu [m ²]	Objem betonu ostění [m ³ /m]
Tunely VRT do 230 km/h	5,00	78,54	9,14
Tunely VRT do 350 km/h	5,30	88,25	9,71
Tunely Metro	2,95	27,34	5,28

Jednokolejný železniční tunel pro rychlost do 230 km/h má poloměr vnitřního líce ostění 4,7 m a při tloušťce ostění 300 mm plochu výrubu 78,54 m² na běžný metr tunelu. Při rychlosti 200 km/h až 350 km/h se poloměr zvětšuje na 5,0 m, plocha výrubu se zvětšuje na 88,25 m² na běžný metr tunelu. Teoretický objem betonu ostění pak je 9,14 m³, resp. 9,71 m³ na běžný metr tunelu. To je při délce záběru 2 m 18.28 m³, resp. 19.42 m³ na prstenec. Pro výplň prstence mezi lícem výrubu a pláštěm formy bednění lisovaným betonem je potřeba zohlednit i předpokládanou velikost nadvýrubu, tj. prostorů vzniklých při ražbě tunelu nad teoretickým obrysem líce výrubu. Velikost nadvýrubu závisí na typu tunelovacího stroje a kvalitě horninového masivu (strukturní

stavba, orientace diskontinuit ke směru ražby, samonosná funkce atd.). Odborná literatura uvádí předpokládané velikosti nadvýrubů jako procento z objemu výrubu. Následující tabulky ukazují vztah mezi teoretickou a skutečnou spotřebou betonu tunelového ostění z lisovaného betonu po vyplnění předpokládaných nadvýrubů. To je třeba zohlednit při plánování kontinuální dodávky betonové směsi a návrhu délky bednění jednoho bloku betonáže ostění.

Tabulka 5: Výpočet objemu nadvýrubu a skutečného objemu lisovaného betonu ostění

Typ tunelovacího stroje	Nadvýrub z objemu výrubu		Tunely VRT do 230 km/h			Tunely VRT do 350 km/h			Tunely Metro		
	Min. [%]	Max. [%]	Nadvýrub [m ³ /m]		Celkový objem betonu ostění [m ³ /m]	Nadvýrub [m ³ /m]		Celkový objem betonu ostění [m ³ /m]	Nadvýrub [m ³ /m]		Celkový objem betonu ostění [m ³ /m]
			min.	max.		min.	max.		min.	max.	
Open TBM (bez štítu)	2	5	1,57	3,93	13,07	1,77	4,41	14,12	0,55	1,37	6,64
Shielded TBM (se štítem)	3	8	2,36	6,28	15,43	2,65	7,06	16,77	0,82	2,19	7,47
Earth Pressure Balance (EPB)	4	7	3,14	5,50	14,64	3,53	6,18	15,89	1,09	1,91	7,19
Slurry Shield TBM (Mixshield)	3	6	2,36	4,71	13,85	2,65	5,30	15,00	0,82	1,64	6,92

8.9. Možnosti provádění doprovodných opatření při ražbě

Doprovodná opatření slouží ke zlepšení vlastností horninového masivu před čelbou tunelovacího stroje TBM v případě, že nelze zaručit dostatečnou stabilitu líce výrubu a samonosnost horninového masivu před betonáží ostění z lisovaného betonu nebo je nutné omezit přítoky podzemní vody do prostoru výrubu, které by mohly ohrozit betonáž monolitického ostění. Opatření jsou vždy spojena s omezením provozu tunelovacího stroje a snížením průměrné rychlosti ražby. Opatření jsou prováděna přes hlavu tunelovacího stroje nebo v prostoru před ní. Nejedná se o systémová opatření spojená s technologickým postupem ražby, ale o zmáhání geologických anomálií.

8.9.1. Injektáž horninového masivu

Injektováním horninového masivu před čelbou a v okolí výrubu tunelovacího stroje lze dosáhnout zlepšení pevnostních charakteristik horniny, zvýšení jeho stability nebo omezit přítoky podzemní vody jeho utěsněním. K tomu slouží různé typy materiálů použitých pro injektáž.

- Cementová injektáž se používá zejména v tektonicky porušeném horninovém masivu pro výplň a utěsnění diskontinuit nebo k vyplnění dutin a k celkovému zpevnění masivu. Není vhodná pro injektování jemnozrnných hornin, které mají velmi nízkou propustnost, což způsobuje obtížnou penetraci cementové směsi do zeminového prostředí. Injektážní směs se nemůže dostatečně rozprostřít a efekt injektáže je omezený. Cementová směs se hromadí pouze v nejbližším okolí provádění injektáže, což nezajistí zpevnění ani utěsnění většího objemu zeminy. Částice cementu mají typicky velikost v řádu desítek mikrometrů, což je větší než velikost pórů jemnozrnných zemin.

To zabraňuje průchodu cementové suspenze do pórů injektovaného materiálu. Jemnozrné zeminy, zejména jíly, mají schopnost vázat velké množství vody díky své vysoké plasticitě a kapacitě pro adsorpci vody. Cementová směs může při kontaktu s těmito zeminami rychle ztratit vodu, což vede ke zhoršené tekutosti směsi. Jíly mohou při kontaktu s cementovou směsí absorbovat vodu a začít bobtnat, což může její vlastnosti zhoršit.

- Chemická injektáž se používá při ražbě v jemnozrnných zeminách, kde použití cementové injektáže není účinné. Jemnozrné zeminy (např. jíly a silty) mají velmi nízkou propustnost, často nižší než 10^{-7} m/s, což výrazně omezuje rozsah injektáže. Pro injektování se proto používají se nízkoviskózní směsi na bázi silikátů nebo pryskyřic, které mají menší částice a jsou schopné proniknout póry jemnozrnných zemin. Injektování silikátovými gely se v jemnozrnných zeminách používá nejčastěji, a to s ohledem na jejich schopnost proniknout jemnými póry a rychle tuhnout. Použití akrylátových gelů je díky jejich velmi nízké viskozitě vhodné pro zeminy s velikostí pórů menší než 1 mikrometr. Polyuretanové pryskyřice se využívají především pro utěsnění přítoků podzemní vody.
- Mikrocementy nebo jílové směsi slouží obdobně jako chemická injektáž pro zlepšení stability masivu před vstupem TBM. Mikrocementy a jílové směsi mají nižší viskozitu než chemické směsi, což umožňuje lepší penetraci jemnozrnnými zeminami, zejména jíly a silty. Jsou obecně považovány za ekologičtější než některé chemické směsi, protože neobsahují syntetické organické sloučeniny, které mohou mít negativní vliv na životní prostředí, zejména pokud jde o dlouhodobý kontakt s podzemními vodami. Zvláště užitečné jsou při injektáži jemnozrnných hornin, jako jsou jíly nebo písčité vrstvy, kde tradiční cementové směsi nemohou dostatečně proniknout kvůli nízké propustnosti zemin. Mikrocementy mají velmi jemnou strukturu a nízkou viskozitu, což jim umožňuje proniknout do malých pórů, které by byly pro hrubší cementové směsi neprostupné. Tato injektáž zlepšuje pevnost a stabilitu horninového masivu, a zároveň snižuje jeho propustnost. Jílové směsi se používají v prostředí s vysokým podílem jílových nebo jiných plastických zemin, kde je potřeba stabilizovat masiv nebo zlepšit jeho vodonepropustnost. Jílové směsi jsou schopné vytvořit těsný a stabilní plášť, který zabraňuje dalšímu pronikání vody do výrubu. Injektáž těmito materiály má minimální negativní vliv na horninový masiv.

Použití injektáže je typické pro ražbu v měkkých horninách nebo v oblastech s vysokým tlakem podzemní vody.

8.9.2. Zmrazování horninového masivu

Zmrazováním lze dosáhnout dočasného zvýšení pevnosti a vodonepropustnosti horninového masivu. Jako médium pro přenos chladu do horninového masivu se používá kapalný dusík o teplotě -196 °C nebo solanka, tj. roztok vody a solí, jako je chlorid sodný (NaCl) nebo chlorid vápenatý (CaCl_2) o teplotě -10 až -30 °C. Zmrazením horninového masivu v okolí zmrazovacího vrtu se zabraňuje přítoku podzemní vody a zvyšuje se pevnost a tím i stabilita horninového masivu. Zmrazení se provádí buď jako stabilizační opatření po obvodě výrubu, nebo celoplošně pro zvýšení stability čelby. Zmrazování je vhodné pro ražbu v silně vodou nasycených zeminách, např. v oblastech pod řekami nebo moři. Trvanlivost opatření může snižovat proudění podzemní vody, které ze zmrazené horniny odnímá chlad a dochází k jejímu ohřívání. V případě použití zmrazování jako stabilizačního prvku pro zajištění stability výrubu je nutné počítat s tzv. "obětovanou" vrstvou betonu, tj. vrstvou, která na kontaktu s horninovým masivem zmrazne a vytvoří tepelný izolant pro vzdálenější polohu betonu ostění. V této vrstvě nelze zaručit řádnou hydrataci a tím ani požadované parametry ostění. Obětovaná vrstva betonu se pohybuje obvykle v nižších jednotkách cm.

8.9.3. Kotvení a jehlování horninového masivu

Kotvení horninového masivu se používá při průchodu tunelovacího stroje oblastí tektonických poruch a zlomů tam, kde je hornina silně porušená a hrozila by nestabilita čelby nebo obvodu výrubu. Jedná se o analogické opatření, které se používá při konvenční ražbě např. pomocí NRTM. Pro jehlování obvodu výrubu mimo dosah řezné hlavy tunelovacího stroje je možné použít ocelové jehly z betonářské oceli. Stejně tak je možné horninový masiv vyztužit radiálně vrtanými ocelovými kotvami typu SN/IBO. To se používá zejména při ražbě tunelovacím strojem typu Gripper, resp. tunelovacího stroje určeného do mimořádně příznivých geotechnických podmínek. Pro zvýšení stability čelby se používají sklolaminátové kotvy osazované do cementové zálivky, aby je bylo možné při obnovení ražby tunelovacím strojem bez problémů odstranit společně s rubaninou.

9. POŽADAVKY NA BETON A OSTĚNÍ

9.1. Požadované vlastnosti betonové směsi

Technologie monolitického ostění tunelů ražených TBM vyžaduje speciální recepturu betonu, která bude splňovat mnoho protichůdných požadavků. Zejména je důležitá dostatečně dlouhá doba zpracovatelnosti a dobrá zpracovatelnost směsi, ale zároveň velmi rychlé nárůsty pevnosti po aplikaci ostění.

Základní požadavky na směs pro provádění ostění z lisovaného betonu:

- Pevnostní třída C50/60
- Dosažení pevnosti 15 MPa do 16 hodin od uložení betonu
- Předpokládaný obsah drátků je 40-50 kg/m³
- Předpokládá se použití drátků o délce 60 mm a průměru 0,8 mm
- Důležité je správné rozmísení drátků bez shluků
- Konzistence betonu po přidání drátků 210 mm sednutí Abramsova kužele
- Doba zpracovatelnosti 110 min
- Počátek tuhnutí max. 155 min
- Nepředpokládá se použití síranovzdorného cementu pro prostředí XA2 a XA3. Pokud by byl požadavek na síranovzdorný cement, pak je nutné přehodnotit požadavek na krátkodobou pevnost 15 MPa po 16 hodinách. Reálná by pak byla pevnost v tlaku 3 MPa ve stejném čase.

9.2. Dodávka a výroba betonové směsi

Betonová směs pro betonáž tunelového ostění z lisovaného monolitického betonu bude dopravována autodomíchávači až do úseku tunelovacího stroje s bednicím vozem, kde bude podobně, jako v případě monolitických ostění konvenčně ražených tunelů přepravována/čerpána do rozdělovače pro symetrické plnění prostoru mezi bednicí formou a výrubem. Bednicí formu umísťuje do požadované polohy dané geometrií tunelu zařízení podobné erektoru pro ukládání segmentů.

Výroba betonové směsi je dána specifickým technologickým postupem, kdy se drátky pomocí distributoru postupně vsypávají během mísení směsi kameniva, cementu, záměsové vody a přísad. Distributor drátky rozdělí a postupným přimícháváním se předejde vzniku shluků drátků. Tato technologie prodlužuje čas míchání směsi, a proto je třeba k tomuto faktu přihlížet při návrhu výkonu betonárny. Autodomíchávač pak slouží již jen pro dopravu. Technologie dávkování drátků až v autodomíchávači je vhodná jen pro malé dávky drátků (zhruba do 20 kg/m³) což se využívá např. pro výstavbu průmyslových podlah.

9.2.1. Předpoklady návrhu

Předpokládá se využití betonárny s míchacím jádrem o užitečném objemu 2 m³. Pro dopravu směsi se využije atypický domíchávač o kubatuře odpovídající potřebnému objemu směsi, který se připevní na

speciální vozidlo (MSV) umožňující jízdu po zakřiveném dnu tunelu. Za tohoto předpokladu se jeden autodomíchávač o objemu 10 m³ bude míchat na 5 záměsí. V časovém plánu je na namíchání jednoho autodomíchávače 20 minut. Na jednu záměs jsou tedy k dispozici 4 minuty. Drátky se do betonu přimíchávají už v míchacím jádru.

- Plánovaný postup ražby tunelu pomocí TBM je 20 m/den
- Plánovaný objem jednoho prstence monolitického ostění je 10 m³
- Předpokládaná šířka prstence činí 1,5m
- Za den se plánuje cca 13 prstenců, což znamená 130 m³/24 hodin
- Autodomíchávač o objemu 10 m³ se tedy plánuje míchat každé necelé 2 hodiny
- Beton pro jeden prstenec bude přepravován najednou, speciálním autodomíchávačem s přepravní kapacitou 10 m³
- Proces míchání, dopravy a čerpání směsi se plánuje následovně:
- míchání 20 min.
- transport autodomíchávačem 60 min.
- čerpání 30 min.
- tuhnutí za tlaku a případně proteplování formy 45 min odpadním teplem stroje
- Poté odstranění čílk, přičemž vlivem vystavení značnému tlaku je z betonu vytlačena přebytečná voda a beton tak již vykazuje strukturní pevnost přes 0.5 MPa
- Předpokládaný obsah drátků je 40-50 kg/m³
- Předpokládá se použití drátků o délce 60 mm a průměru 0,8 mm
- Každý den se tedy plánuje namíchat drátkobeton s až 7,8 t drátků, je tedy nutná automatizovaná výroba drátkobetonu
- Důležité je správné rozmísení drátků bez shluků
- Konzistence betonu po přidání drátků 210 mm sednutí Abramsova kužele

9.2.2. Standardní míchací proces



Při kontinuálním míchání lze procesy míchání jednotlivých záměsí prolnout, tzn. navažování následující záměsi probíhá už při míchání a výsypu záměsi předcházející. Časy se liší podle konkrétního míchacího zařízení a typu betonu. Namíchání 1 záměsi o 2 m³ tak v tomto případě vychází na 120 – 150 sekund. Namíchání dávky 10 m³ betonu do jednoho autodomíchávače pak trvá 10,5 minuty.

9.2.3. Optimalizace přimíchávání drátků

Dávkování drátků přímo do míchacího jádra. Nevýhodou tohoto řešení je prodloužení míchacího procesu a velký zásah do technického řešení betonárny (je nutno s tímto řešením počítat už při návrhu betonárny). Naopak výhodou je vyšší kontrola nad dávkováním drátků, automatizace míchání a zlepšení kvality rozmísení drátků.

Míchací proces pak vypadá následovně:



Při kontinuálním míchání lze procesy míchání jednotlivých záměsí prolínout, tzn. navažování následující záměsí probíhá už při míchání a výsypu záměsí předcházející. Časy se liší podle konkrétního míchacího zařízení a typu betonu. Namíchání 1 záměsí o 2 m³ tak v tomto případě dávkování drátků přímo do míchacího jádra vychází na 180 – 210 sekund. Namíchání dávky 10 m³ drátkobetonu do jednoho autodomíchače pak trvá 15,5 minuty. Drátky je nutné dávkovat přímo do míchacího centra, po alespoň částečném rozmíchání základní směsi.

Správné rozmísení ocelových drátků v betonu je základním předpokladem pro dobrou funkci drátkobetonu v konstrukci.

9.3. Požadavky na návrh a přísady do betonu

Na vláknobeton se vztahují stejné základní požadavky na cement, kamenivo, záměsovou vodu, přísady a trvanlivost jako běžnému betonu. Národní doplňky mohou v České republice uvádět pro konkrétní použití mezní hodnoty např. max w/c, min. obsah cementu apod.

Dávkování vláken v kg/m³ nebo v procentech objemu směsi se volí podle požadovaných mechanických vlastností (residuální pevnosti v tahu za ohybu), podle zkoušek EN 14845-2/EN 14651 a podle výrobce vláken. Praxí doporučené hodnoty dávkování vláken pro strukturální přínos bývají kolem 30–60 kg/m³ (závisí na typu vláken a požadovaných fr-hodnotách). Nižší dávky (10–20 kg/m³) zlepšují kontrolu mikrotrhlin, vyšší dávky (40–60 kg/m³) už výrazně přispívají ke zvýšení pevnosti.

V závislosti na konkrétním projektu a předpokládaných geotechnických podmínkách (zatížení ostění) je v projektové dokumentaci vždy nutné uvádět konkrétní dávkování. Norma ČSN EN 14845-2 Zkušební metody pro vlákna do betonu - Část 2: Vliv na beton definuje postup, jak určit objem vláken potřebný pro danou zbytkovou pevnost.

Ocelová vlákna musí splňovat požadavky normy ČSN EN 14889-1 (rozměry, tvar, pevnost vláken, značení/CE). Dodavatel vláken musí dodat prohlášení o shodě / technický list a CE označení.

9.4. Ukládání a zhutňování a ošetřování po odbednění

Při vhodném návrhu betonové směsi se vláknobeton často ukládá bez nutnosti intenzivního vibrování. V případě hutnění betonové směsi pomocí vibrování je nutné postupovat obezřetně, neboť nadměrné vibrace mohou vést k segregaci a klesání vláken do spodní části ostění. Doporučení závisí na konzistenci směsi. U samozhutnitelných vláknobetonů platí speciální pravidla.

Z hlediska ošetřování ostění po odbedňování u vláknobetonu obecně platí stejné požadavky na zabránění rychlému vysychání nebo ochranu před teplotním šokem, jako u standardních tunelových ostěních, neboť optimální hydratace směsi ovlivňuje vazbu vláken a betonové matrice.

Na rozdíl od konvenčně ražených tunelů, kde betonáž sekundárního ostění probíhá zpravidla až po vyražení tunelu a jeho stabilizaci primárním ostěním, přičemž betonáž sekundárního ostění probíhá po ustálení deformací primárního ostění. Výjimku mohou představovat dlouhé tunely, kde může ražba a betonáž sekundárního ostění probíhat paralelně. U tunelů ražených TBM nehrozí při betonáži ostění z lisovaného betonu rizika vyplývající z proudění vzduchu a jeho teploty, neboť betonáž probíhá v těsné blízkosti za hlavou stroje a tunel není v době betonáže proražen. Navíc je ostění po betonáži v několika

blocích stále chráněno proti vysychání i teplotnímu šoku bedněním, které na prvních blocích od hlavy stroje přebírá i nosnou funkci. Po odbednění je nutné s ohledem na omezení vzniku trhlin chránit povrch ostění proti vysychání. Ochrana proti teplotnímu šoku se vzhledem k délce úseku chráněnému bedněním nepředpokládá. Plášť bednění by měl být navržen tak, aby plnil i tepelně izolační funkci.

10. ZKOUŠENÍ A KONTROLA KVALITY

Zkoušky čerstvého betonu probíhají v souladu s požadavky ČSN EN 12350 Zkušební metody pro čerstvý beton) a národní přílohy P 73 2451 Čerstvý vláknobeton - kontrola konzistence, objemové hmotnosti, teploty, obsahu vzduchu.

Standardní zkoušky pevnosti v tlaku se provádí podle ČSN EN 12390 a pro hodnocení vláknobetonu podle ČSN EN 14651 (tříbodový ohyb s vrubem — stanovení LOP a zbytkových pevností fr_1 , fr_2 , fr_3 atd.), EN 14845-2 (určení množství vláken potřebného k dosažení předem stanovené zbytkové pevnosti), ČSN EN 14721 (obsah vláken). Národní dokumenty ČSN P 73 2452 upravují a doplňují zkoušky ztvrdlého vláknobetonu v ČR.

Konkrétní výsledky pro návrh: výsledky EN 14651 (fr -hodnoty) jsou používány při návrhu a posuzování nosnosti prvků z drátkobetonu (viz fib Model Code 2010 a národní pokyny).

11. ZAJIŠTĚNÍ VODONEPROPUSTNOSTI OSTĚNÍ

Vodotěsnost tunelového ostění je zajištěna pouze materiálem ostění, tj. vláknobetonem a jeho vlastnostmi a těsněním příčných pracovních spár mezi prstenci pomocí vnitřních těsnících pásů. Vzhledem k tomu, že zvýšení tahové pevnosti betonu, která je zásadním parametrem omezujícím vznik trhlin, je v principu závislé pouze na vyztužení betonu a v případě lisovaného betonu tvoří výztuž ocelová vlákna, je potřeba věnovat maximální pozornost správné volbě prognózy pro výpočet zatížení tunelového ostění, výpočtu vnitřních sil a stanovení receptury betonové směsi drátkobetonu tak, aby se minimalizovalo riziko přetížení ostění a výsledná šířka trhlin odpovídala požadavkům na zajištění životnosti a vodonepropustnosti ostění.

12. DOPORUČENÉ NORMY A PŘEDPISY

12.1. Normy

- [1] ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [2] ČSN P 73 2404 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace
- [3] ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí
- [4] ČSN 73 7503 Projektování a stavba tunelů městských drah
- [5] ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací
- [6] ČSN 73 7508 Železniční tunely
- [7] ČSN EN 12111 Stroje pro stavbu tunelů - Razicí stroje a kontinuální důlní dobývací stroje - Bezpečnostní požadavky
- [8] ČSN EN 16191 Stroje pro stavbu tunelů - Bezpečnostní požadavky
- [9] ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla
- [10] ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí
- [11] ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis
- [12] ČSN EN ISO 14689 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování, popis a klasifikace hornin
- [13] ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla

- [14] ČSN EN 1997-2 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy
- [15] ČSN EN 13491 ED.2 Geosyntetické izolace – Vlastnosti požadované pro použití jako hydroizolace při stavbě tunelů a podzemních konstrukcí (účinnost: 07/2018)

12.2. Technické kvalitativní podmínky MD ČR

- [1] Kapitola 1 Všeobecně, změna č. 1
- [2] Kapitola 4 Zemní práce
- [3] Kapitola 18 Betonové konstrukce a mosty, oprava č. 1
- [4] Kapitola 24 Tunely
- [5] Kapitola 29 Zvláštní zakládání
- [6] Kapitola 30 Speciální zemní konstrukce

12.3. Technické podmínky MD ČR

- [1] Kapitola 76C Geotechnický průzkum pro navrhování a provádění tunelů PK
- [2] Kapitola 237 Geotechnický monitoring tunelů pozemních komunikací

13. ZÁVĚR

Ražení tunelů pomocí tunelovacích strojů je stále se vyvíjející obor. Zajištění stability výrubu pomocí prefabrikovaných segmentů je již osvědčenou metodou s dobře zvládnutými konstrukčními požadavky na tunelovací stroje, výrobu i aplikaci segmentů v široké škále geotechnických podmínek. Jako každá tunelovací metoda má však standardní ražba TBM určitá úskalí, která je možné řešit použitím lisovaného betonu.

K zásadním výhodám a ekonomickým přínosům této metody patří:

- Absence výroby přesných forem pro výrobu segmentů a speciálních hal pro armování a betonáž dílců prefabrikovaného ostění.
- Doprava betonové směsi v autodomíchávacích bez nutnosti zřizování a pronájmu ploch pro skladování segmentů.
- Úspora dopravy segmentů od výroby na staveniště.
- Minimalizace spár – úspora těsnění v ostění, která mohou být riziková jak z hlediska průsaků, tak koncentrace napětí a s tím souvisejícími poruchami ostění.
- Dokonalá aktivace prstence ostění s vyplněním všech nadvýrubů vzniklých při ražbě s pozitivními dopady do sedání nadloží s minimální degradací nosného prstence v okolí výrubu.
- V dobrých geotechnických podmínkách, kde se při ražení pomocí tunelovacích strojů používá zpravidla ostění ze stříkaného drátkobetonu, znamená použití lisovaného betonu získání kvalitnější konstrukce s nulovým „spadem“, úspora a lepší využití materiálu, spad bývá u stříkaného ostění 20 %.
- Vysoká duktilita ostění vyztuženého rozptýlenou výztuží z ocelových drátků, vede k omezení trhlin – to je úspora sanací.

Jako každá tunelovací metoda, tak i ražení s použitím ostění z lisovaného betonu má svá omezení a speciální požadavky. Jedná se především o:

- Nutnost konstrukční úpravy tunelovacího stroje pro nasazení teleskopu, dočasné hydroizolační membrány a bednicí formy pro aplikaci lisovaného ostění.
- Zvýšené požadavky na rozsah geotechnického průzkumu se zaměřením na anomálie, které by znamenaly masivní použití doprovodných opatření k vytvoření podmínek vhodných pro ražbu.
- Nasazení v geotechnických podmínkách, které zaručují stabilitu nezajištěného líce výrubu po dobu nutnou k vyplnění prostoru prstence betonovou směsí a aktivaci bednicí formy jako nosného systému pro zajištění stability výrubu do dosažení požadované pevnosti monolitického prstence.
- Hydrogeologické podmínky s předpokládaným tlakem podzemní vody do 5 atm.

Předpokládané použití tunelovací metody ražení tunelovacími stroji s ostěním z lisovaného betonu se předpokládá především v městské zástavbě, kde je požadavek na minimalizaci negativních účinků ražení na objekty v nadloží, tj. s omezením deformací horninového masivu. Další možnost využití je u tunelů v extravilánu, které jsou navrženy v horninovém prostředí bez velkých anomálií a dobrou stabilitu nezajištěného výrubu, kde je možné použít ostění z lisovaného betonu bez většího rozsahu doprovodných opatření, které by mohly ražbu komplikovat jak z hlediska času, tak z hlediska dimenzování ostění, které má vzhledem k použití drátkobetonu a konstantní tloušťce prstence své limity.

14. LITERATURA

- [1] Tatiya R. - Civil Excavations and Tunnelling A practical guide, Second edition, ICE Publishing, ISBN 978-0-7277-6153-8, Thomas Telford Limited, 2017
- [2] Edited by Nasri V., Klug D., Fulcher B., Morrison J. A. - Handbook of Precast Segmental Tunnel Lining Systems, ISBN: 978-1-032-67553-4, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, 2025
- [3] Maidl B., Thewes M., Maidl U. - Handbook of Tunnel Engineering Volume I: Structures and Methods, ISBN: 978-3-433-60350-5, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2013
- [4] Maidl B., Thewes M., Maidl U. - Handbook of Tunnel Engineering II Basics and Additional Services for Design and Construction, 978-3-433-60354-3, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2014
- [5] Maidl B., Schmid L., Ritz W., Herrenknecht M. - Hardrock Tunnel Boring Machines, ISBN 978-3-433-01676-3, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Berlin, 2008
- [6] Meschke G., Breitenbücher R., Freitag S., König M., Thewes M. - Interaction Modeling in Mechanized Tunneling, 1st edition, ISBN 978-3-031-24066-9, Open Access Springer Nature Switzerland AG, 2023
- [7] Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G. - Mechanised Shield Tunnelling, 2nd Edition, ISBN: 978-3-433-60150-1, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2012
- [8] Bilgin N., Acun S. - Practical Management of Tunneling with Tunnel Boring Machines, ISBN: 978-1-032-41623-6, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC, 2024
- [9] Wagner H., Schultze A. - Tunnel Boring Machines, Trends in Design and Construction of Mechanized Tunnelling, ISBN 90-5410-811-8, Taylor & Francis London and New York, 1996
- [10] Kolymbas D. - Tunneling and Tunnel Mechanics A Rational Approach to Tunnelling, ISBN-10 3-540-25196-0, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [11] Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines, DAUB-Working Group, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), German Tunnelling Committee (ITA-AITES), January 2022 (revised version August 2025)
- [12] ITAtech Guidelines on Best Practices for Segment Backfilling, ITAtech Activity Group Excavation, ISBN 978-2-9700858-5-0, Lausanne 05/2014
- [13] Geophysical Ahead Investigation Methods Seismic Methods, ITAtech Activity Group Investigation, ISBN: 978-2-9701122-7-3, ITAtech Report N°10, Lausanne 03/2018
- [14] ITAtech Guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments – Vol. 1: Design Aspects, ITAtech Activity Group Support, ISBN: 978-2-9701013-2-1, ITAtech Report N°7, Lausanne 04/2016
- [15] Guideline For Good Practice of Fibre Reinforced Precast Segment - Vol. 2 : Production Aspects, ITAtech Activity Group Support, ISBN: 978-2-9701122-3-5, ITAtech Report N°9, Lausanne 03/2018