

## **POSOUZENÍ VLIVU VYSOKÉHO HYDROSTATICKÉHO TLAKU NA SEGMENTOVÉ OSTĚNÍ TUNELU**

### **EVALUATION OF A HIGH HYDROSTATIC PRESSURE IMPACT ON THE SEGMENTAL TUNNEL LINING**

**Matouš Hilar<sup>1,2</sup>**

**Martin Srb<sup>1</sup>**

**Petr Svoboda<sup>1</sup>**

**Jakub Nosek<sup>1</sup>**

#### **ABSTRAKT**

V ČR byla provedena projektová příprava výstavby vysokorychlostního železničního tunelu Praha – Beroun. Většina ražeb byla předpokládána s využitím plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM). V rámci provedené rizikové analýzy byla možnost vysokého hydrostatického tlaku vyhodnocena jako jedno z významných rizik, které je třeba vyhodnotit podrobněji. V projektu bylo předpokládáno využití vodonepropustného segmentového ostění z prefabrikovaného betonu s těsnícími pásy, které by mělo být zatíženo plným hydrostatickým tlakem. Vliv různých hodnot hydrostatického tlaku na potřebnou mocnost a vyztužení ostění byl vyhodnocen, ostění bylo posouzeno pro různé polohy HPV nad osou tunelu (až 170 m nad osou tunelu). V rámci projektu byla vypracována studie dosavadních zkušeností mechanizované ražby pod vysokým hydrostatickým tlakem, dosavadní zkušenosti jsou prezentovány v tomto článku.

#### **ABSTRACT**

The initial design of the long high-speed railway tunnel Prague – Beroun was realised in the Czech Republic. Majority of tunnel was expected to be excavated by tunnel boring machines (TBMs). Risk analysis evaluating tunnel excavation and operations submitted design concept was also realised, possible high hydrostatic pressure was identified as one of major risks, which has to be evaluated. The design assumed impermeable segmental tunnel lining with full hydrostatic pressure. Exact position of underground water table was not clear, in the worst case the water table can be close to surface with the full hydrostatic pressure acting on the tunnel lining (ie. water table up to 170 m above the tunnel axis). Impact of various values hydrostatic pressure on required tunnel lining was investigated. The detailed study of mechanized tunnels realised under a high hydrostatic pressure has been generated, overview of the study is presented in this paper.

---

doc. Ing. Matouš Hilar, PhD., tel.: +420 604 862686, e-mail: hilar@d2-consult.cz

Ing. Martin Srb, tel.: +420 241 443 411, e-mail: srb@d2-consult.cz

Ing. Petr Svoboda, tel.: +420 241 443 411, e-mail: svoboda@d2-consult.cz

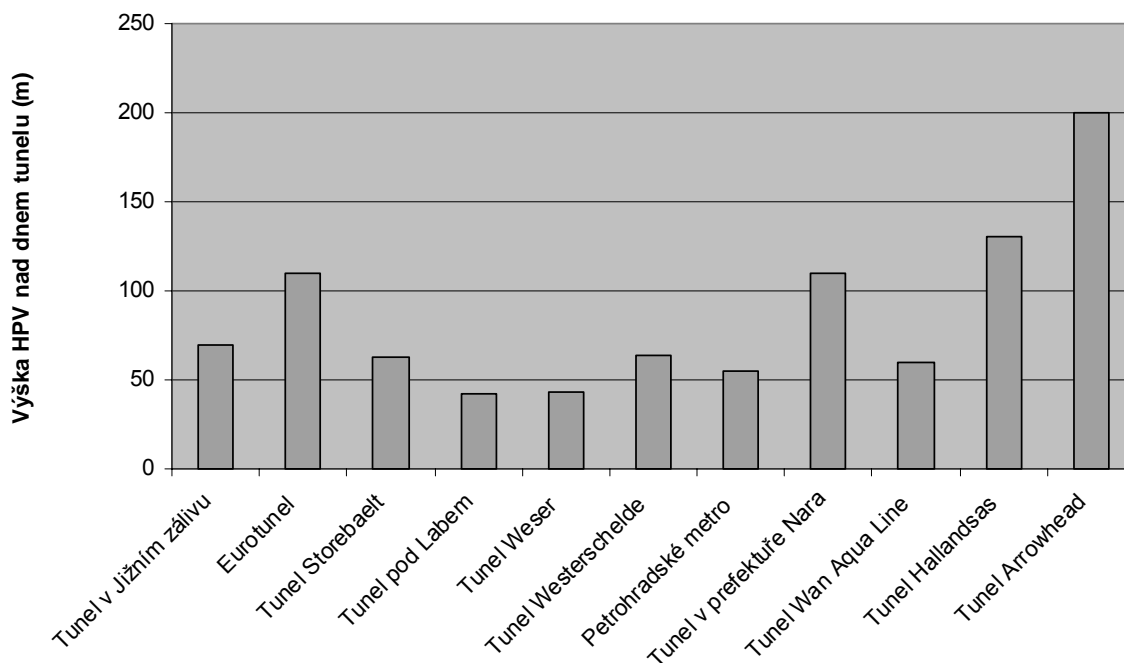
Ing. Jakub Nosek, tel.: +420 241 443 411, e-mail: nosek@d2-consult.cz

<sup>1</sup> D2 Consult Prague, Zelený pruh 95/97 (KUTA), 140 00, Praha 4, ČR

<sup>2</sup> Katedra geotechniky, FSv ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6, ČR

## 1. Úvod

Základní přehled tunelů ražených mechanizovaně pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM = Tunnel Boring Machine) pod vysokým hydrostatickým tlakem včetně poloh HPV je uveden na obr.1, popis parametrů jednotlivých tunelů je v tab.1. Nejvyšší hydrostatický tlak byl naměřen při ražbě vodovodního tunelu Arrowhead v USA, naměřená výška tlaku 2000 kPa odpovídá poloze HPV 200 m nad tunelem.



Obr. 1. Přehled tunelů ražených mechanizovaně pod vysokým hydrostatickým tlakem  
Fig. 1. Overview of tunnels excavated mechanically under a high hydrostatic pressure

U železničního tunelu Hallandsas ve Švédsku byl předpokládán maximální hydrostatický tlak 1300 kPa, segmentové ostění tohoto tunelu o mocnosti 540 mm bylo navrženo na 1500 kPa. Dalšími dokončenými projekty pod vysokým hydrostatickým tlakem jsou tunely South Bay Ocean Outfall (700 kPa), železniční Eurotunel pod kanálem La Manche (1000 – 1100 kPa), železniční tunel Storebaelt (800 kPa), silniční tunel pod Labem (4th Elbe Tunnel) (420 kPa), Wesertunnel (430 kPa), tunel Westerschelde (640 kPa), červená trasa metra v Petrohradě (550 kPa), vodovodní tunel v prefektuře Nara v Japonsku (1100 kPa) nebo silniční tunel Wan Aqua Line pod Tokijským zálivem (600 kPa). Některé z uvedených příkladů jsou probrány v textu podrobněji.

## 2. Tunel Hallandsas

Železniční tunel Hallandsas má dvě jednokolejné tunelové trubky o délce 2 x 8,6 km, nadloží tunelu dosahuje 150 m. Tunel byl ražený pomocí TBM pod HPV, nasazené TBM bylo navrženo na hydrostatický tlak 13 barů, segmentové ostění bylo navrženo na hydrostatický tlak 15 barů. Investorem byla požadována ražba bez snížení polohy HPV.

Ražbu tunelu z počátku provázely značné problémy. První ražba tunelu začala v roce 1991 pomocí horninového TBM. Pomocí stroje bylo vyraženo pouze 18 m, vzhledem k problémům s mechanizovanou ražbou se dodavatel rozhodl razit konvenčně. Konvenční ražbou s

využitím trhacích prací bylo celkem vyraženo 5,5 km tunelu (20% celkové délky), následně první zhotovitel stavbu tunelu ukončil. Druhý pokus o dokončení ražby tunelu byl zahájen novým zhotovitelem v roce 1996. Bylo raženo pomocí trhacích prací, při kterých vznikly velké technické problémy a problémy související vlivem stavby na životní prostředí způsobené používáním chemických injektáží (onemocnění dělníků a krav v okolí stavby). Veškeré ražby byly zastaveny, celkově bylo vyraženo 35% délky tunelů. V letech 1998 – 2000 byly důkladně zkoumány veškeré možnosti ražby, které by zajistily realizovatelnost projektu bez negativního vlivu na životní prostředí. V roce 2004 začal třetí pokus o dokončení ražeb tunelu, zbývalo vyrazit 2 x 5,5 km tunelu. Pro výstavbu bylo použito duální TBM (umožňující ražbu ve dvou režimech) a vodonepropustné segmentové ostění. Ražba byla ukončena v roce 2010.

Horninový masiv v oblasti tunelu Hallandsas je tvořen především rulou ve které jsou výběžky amfibolitu a doleritu. Horninový masiv je výrazně ovlivněn četnými puklinami a tektonickými poruchami. Pevnost neporušené horniny v prostém tlaku je 250 MPa, obrusnost je obecně nad 4,5 Cerchara, byly měřeny hodnoty do 5,9. Horninový masiv je zcela nasycen vodou, hydrostatický tlak dosahuje v místech tunelu až 15 barů.

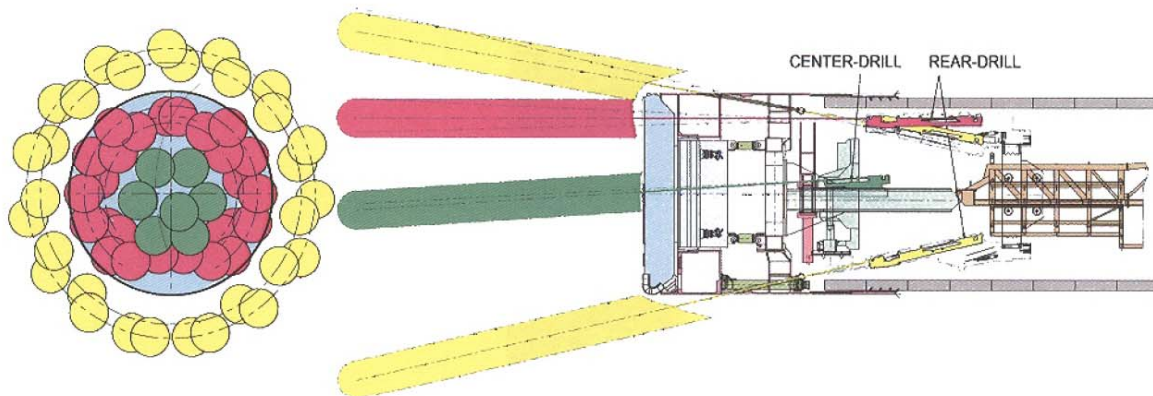
Sestavené TBM splnilo veškeré zadané požadavky, které mimo jiné zahrnovaly ražbu pod hydrostatickým tlakem přes 10 barů a omezení přítoků vody pod okamžité maximum 400 l/s s měsíčním průměrem pod 100 l/s. Bylo navrženo duální TBM (mixshield) umožňující ražbu v uzavřeném módu s bentonitovým tlakem na čelbě (slurry TBM) a ražbu v otevřeném módu (hardrock TBM). TBM umožňovalo vrtání a injektování prostoru před čelbou (30 otvorů v plášti TBM, 26 otvorů na vnější řezné hlavě a 7 otvorů na vnitřní řezné hlavě), na TBM byly tři stálé vrtné soupravy umístěné na prstenci za erektorem.

Segmentové ostění (obr. 2) bylo navrženo jako vodonepropustné na maximální hydrostatický tlak 15 barů (poloha HPV 150 m nad tunelem). Šroubované ostění se skládá z 8 dílců (7 + 1), vnitřní profil ostění je 10,12 m, mocnost ostění je 540 mm, délka prstenců je 2,2 m, ostění je ze železobetonu s pryžovými těsnícími pásy.



Obr. 2. Segmentové ostění tunelu Hallandsas  
Fig. 2. Segmental lining of the Hallandsas tunnel

Přítoky vody byly kontrolovány předstihovou injektáží (obr. 3) a optimalizací injektáže rubu ostění s častými vodními bariérami za segmentovým ostěním. Práce na omezování přítoků vody byly časově značně náročné, v různých měsících jimi bylo stráveno mezi 6% a 66% času. Díky tomu rychlost postupu ražby velmi výrazně závisela na hydrogeologických poměrech. Vrtání vrtů pro předstihovou injektáž bylo prováděno buď pod atmosférickým tlakem nebo pod zvýšeným tlakem v závislosti na velikosti přítoků vody. Velikost tlaku na čelbě TBM byla zvyšována tak, aby bylo dosaženo rovnováhy s hydrostatickým tlakem. Typicky byl během ražeb používán tlak na čelbě mezi 9 a 11 bary. Pro injektování byl používán jemnozrnný cement. Zkušenosti z dokončených ražeb ukázaly, že injektáž skrz čelbu TBM má vyšší efekt v porovnání s injektáží po obvodu TBM, což je v souladu se zkušenostmi z jiných projektů (např. tunel Arrowhead).



Obr. 3. Předstihová injektáž tunelu Hallandsas  
Fig. 3. Pregrouting of the Hallandsas tunnel

### 3. Tunel Arrowhead

Celková délka vodovodního přivaděče Arrowhead v Jižní Karolíně v USA je 70 km, z toho je 13,8 km vedeno dvěma tunely. Tunely byly raženy pomocí dvou identických TBM profilů 5,8 m (obr. 3) skrz masiv s velmi různorodými geologickými poměry. Hydrostatický tlak měřený v tunelu dosahoval až 20 barů (poloha HPV 200 m nad tunelem). Nadloží Východního tunelu se pohybovalo od 15 m do 630 m, nadloží Západního tunelu se pohybovalo od 15 m do 335 m. Maximální povolené přítoky vody požadované s ohledem na minimalizaci vlivu na životní prostředí (rezervace San Bernardino National Forest) byly 37 l/s na Západním tunelu a 33 l/s na Východním tunelu, naměřené přítoky vody skutečně dosahovaly až 32 l/s.

Oba tunely leží pod horami, které jsou součástí rezervace. Geologické poměry oblasti jsou celkem komplexní a pohybují se od neporušených po silně zvětrané ruly a granitické horniny. Základní horniny zastižené během ražby byly granitické horniny zahrnující zejména diority a granodiority, rulové horniny, mramor a vápenné ruly. Oba tunely prochází oblastmi tektonických poruch, Západní tunel protíná 16 tektonických poruch a Východní tunel protíná dalších 5 tektonických poruch.

Pro ražbu byla sestrojena firmou Herrenknecht dvě identická TBM (obr. 4). TBM byla navržena, aby umožňovala ražbu v horninovém masivu s pevností od 2 MPa do 310 MPa. TBM umožňovala ražbu v otevřeném módu (hardrock TBM) a v uzavřeném módu se zeminovým tlakem na čelbě (EPB TBM). V průběhu ražby byl ke stroji přidán systém pro práci s bentonitem (obslužné a separační zařízení). Obě TBM umožňovala realizaci průzkumných vrtů a předstihové injektáže, maximální délka průzkumných vrtů byla 60 m,

maximální délka injektážích vrtů byla 45 m. Po obvodu stroje bylo prováděno 15 vrtů pod úhlem 1,5°, skrz řeznou hlavu bylo prováděno 19 vrtů pod úhlem 4°.



Obr. 4. TBM před ražbou tunelu Arrowhead  
Fig. 4. TBM prior start of excavation of the Arrowhead tunnel

Segmentové ostění vnitřního profilu 4,9 m s mocností 330 mm bylo navrženo jako vodonepropustné s pryžovými těsnícími pásky na maximální hydrostatický tlak 17 barů (poloha HPV 170 m nad tunelem) na Západním tunelu a 27,5 barů (poloha HPV 275 m nad tunelem) na Východním tunelu. Ostění se skládalo ze šesti dílců (5+1). Kromě vysokého hydrostatického tlaku bylo ostění navrženo tak, aby přeneslo extrémně vysoké síly pro zajištění potřebného přitlaku TBM. Maximální potřebný přitlak (maximum 114 MN) byl často skoro 4x vyšší než původně předpokládaná hodnota protože bylo nutné projít obtížné geologické úseky kde masiv tlačil na plášť TBM.

Injektáž prostoru za rubem ostění byla injektována ve dvou fázích skrz jednosměrné ventily umístěné v segmentech. Do cementové injektáží směsi bylo nutné přidávat urychlovače, protivymývací přísady, ztekucovače a další materiály. První fáze injektáže byla provedena za pláštěm TBM. Do primárního segmentového ostění bylo vloženo železobetonové sekundární ostění.

#### 4. Eurotunnel

Ražba tunelu pod kanálem La Manche začala v roce 1987. Propojení hlavních tunelů bylo dokončeno v roce 1991. Tunel byl uveden do provozu v roce 1994. Z celkové délky je 38 km pod mořem (cca 45 m pod mořským dnem). Tunel se skládá ze dvou jednokolejných tunelů (průměr 7,6m), mezi kterými je veden tunel servisní (průměr 4,8m). Trasa tunelu byla určena po podrobném IG průzkumu. Trasa vede především skrz vrstvu křídového mramoru (měkký nepropustný materiál). Na francouzské straně se vyskytovaly vodonosné rozrušené vrstvy, proto byla nutná ražba pomocí komplexnějších zeminových štítů (EPB TBM). K ražbě bylo použito celkem 11 TBM (6 na anglické straně, 5 na francouzské straně). Ostění bylo použito železobetonová segmentové. V oblastech s problematickou geologií a propojek bylo použito ostění litinové.



Zeminové štíty na francouzské straně byly navrženy na hydrostatický tlak až 11 barů. Ostění tunelu je tvořeno železobetonovými segmenty mocnosti 320 mm. Poloha spodní klenby tunelu pod hladinou moře je mezi 30 m a 107 m, nadloží tunelu je mezi 22 m a 90 m. Servisní tunel T1 dlouhý 15,6 km byl ražen zeminovým štítem Robbins-Komatsu s profilem 5,72 m. TBM razilo prvních 5 km s tlakem na čelbě 3 až 4 bary, zbytek tunelu byl ražen v otevřeném módu při občasném uzavřeném módu s tlakem pod 10 barů v poruchových zónách. Pro průzkum a injektáž v poruchových zónách byly používány předstihové vrty. Propustnost křídového mramoru byla obecně nižší než bylo očekáváno. Při otevřeném módu bylo z tunelu čerpáno maximálně 80 l/s. Údržby řezné hlavy byly prováděny při atmosférickém tlaku.

Traťové tunely T2 délky 20 km a T3 délky 18,9 km byly raženy zeminovými štíty Robbins-Kawasaki s profilem 8,72 m. Poruchové zóny byly injektovány s předstihem ze servisního tunelu. Z tohoto důvodu nebylo třeba tlaku na čelbě, ražby proběhly v otevřeném módu. Z tunelu bylo čerpáno maximálně 103 l/s. Údržby řezné hlavy byly prováděny při atmosférickém tlaku. Nakonec tedy při Eurotunelu nebyla využita možnost ražby v uzavřeném módu, propustnost křídového mramoru byla dostatečně nízká a poruchové zóny byly překonány pomocí injektáží.

## 5. Tunel Storebaelt

Tunel Storebaelt dlouhý 7,412 km spojuje dva dánské ostrovy Zealand a Funen pod Východním kanálem. Dva jednokolejné tunely jsou spojeny propojkami. Vnitřní profil tunelu je 7,7m, ostění je mocné 400 mm (obr. 5). Nepropustnost ostění byla zajištěna těsníci pryžovými pásky. Minimální nadloží tunelu je 15 m. Původně byla zvažována možnost plaveného tunelu, o realizaci raženého tunelu bylo rozhodnuto především z ekonomických a ekologických důvodů. V prostoru tunelu se vyskytují 4 geologické typy: postglaciální sedimenty, glaciální sedimenty (jíly a písky s balvanu ruly a granitu), mramory (rozpukané, středně pevné) a dánské vápence (měkké). Pro ražbu ve velmi komplikovaných geologických podmínkách byly použity 4 TBM. Stroje průměru 8,75 m umožňovaly dvojí režim: uzavřený – EPB (zeminový štít) a otevřený. Hloubka tunelu pod hladinou moře se pohybuje mezi 7 a 55 m. Byl očekáván hydrostatický tlak až 8 barů, maximálně bylo naměřeno 6,3 barů. TBM umožňovala tlak na čelbě do 3 barů.



Obr. 5. Segmentové ostění tunelu Storebaelt  
Fig. 5. Segmental lining of the Storebaelt tunnel

Ražba byla provázána problémy, které vyvrcholily po 350 m, kdy bylo TBM zastaveno na 72 hodin z důvodů údržby. Během této přestávky došlo k náhlému vniknutí vody a zeminy skrz otevřené dveře pro údržbu do prostoru TBM, kromě tunelu byla zaplavena i startovací šachta, druhá tunelová trouba a druhé TBM. Naštěstí nebyl nikdo zraněn, nicméně daná zaplavení způsobilo přerušování ražeb na 8 měsíců. Po daném incidentu došlo ještě k 15 kolapsům čelby, což vedlo k poklesu dna moře. V daných případech byla čelba TBM odizolována, na rozdíl od prvního případu.

Pro umožnění ražby pomocí TBM byl proto realizován nákladný odvodňovací program. Čerpací vrty pomohly redukovat hydrostatický tlak v prostoru tunelu na 3 bary, což umožnilo údržbu řezné hlavy při atmosférickém tlaku. Problémy během ražby tunelu Storebaelt vedly ke zpoždění otevření tunelu o 2 roky a k nárůstu ceny cca o 100%.

## 6. Závěr

Přehled tunelů ražených TBM pod vysokým hydrostatickým tlakem je uveden v tab. 1. Na některých projektech byl naměřený hydrostatický tlak nižší oproti původně očekávaným hodnotám. V případě Eurotunelu to bylo způsobeno nízkou propustností horninového masivu společně s injektáží masivu, v případě Storebaeltu byl hydrostatický tlak výrazně snížen pomocí nákladných odvodňovacích prací. Při ražbě uvedených tunelů byl tlak na čele TBM obecně udržován o něco vyšší než naměřený hydrostatický tlak. Výjimkou je tunel Arrowhead, kde byl tlak na čele TBM výrazně nižší než hydrostatický tlak.

Tabulka 1 Porovnání tunelů s vysokým hydrostatickým tlakem  
Table 1 Comparison of tunnels under high hydrostatic pressure

Název projektu	Místo	Typ TBM	Počet TBM	Výrobce TBM	Průměr TBM (m)	Délka tunelu (km)	Geologie	Max. výška nadloží (m)	Max. výška HPV nad dnem tunelu (m)	Max. měřený hydrost. tlak (bary)	Max. návrhový tlak TBM (bary)	Max. aplikovaný tlak TBM (bary)	Max. návrhový tlak ostění (bary)	Počet segmentů ostění (bary)	Vnitřní profil ostění (m)	Mocnost ostění (mm)	Délka segmentů (m)	Materiál ostění	Doba výstavby
Tunel v Jižním zálivu	San Diego USA	EPB	1	Mitsubishi	3,98	5,795	jilovité a písčité zeminy	58	70	7	8,5	7,3	7	5 + 1	3,35	300	3,81	ŽB	1995 - 1999
Eurotunel	Francie	EPB	3	Robbins	5,72 a 8,72	15,6; 20 a 18,9	klířka	90	107	3,5	11	3,5	10	5 + 1	7,6	400	1,6	ŽB	1988 - 1991
Tunel Storebaelt	Dánsko	EPB	4	Wirth	8,75	2 x 7,412	mramor a glaciální sedimenty s balvanů	45	80	6,3	8	3	8	5 + 1	7,7	400	1,65	ŽB	1990 - 1994
Tunel pod Labem	Německo	Slurry	1	Herrenknecht	14,2	2,561	glaciální sedimenty	35	42	4,2	6	5	5,5	6 + 1	12,35	700	2	ŽB	1995 - 2000
Tunel Weser	Německo	Slurry	1	Herrenknecht	11,71	2 x 1,645	jilovité a písčité zeminy s balvanů	20	43	4,3	6	5,3	6	8 + 1	10,3	500	1,5	ŽB	1998 - 2002
Tunel Westerschelde	Nizozemí	Slurry	2	Herrenknecht	11,33	2 x 6,6	jilovité a písčité zeminy	35	64	6,4	8	7,4	7	6 + 1	9,2	450	2	ŽB	1998 - 2001
Petrohradské metro	Petrohrad Rusko	Slurry	1	Voest Alpine	7,4	2 x 0,8	glaciální sedimenty	55	55	5,5	8	6,4	6	7 + 1		350	1,4	ŽB	2002 - 2004
Tunel v prefektuře Nara	Japonsko	EPB	1	Kawasaki	3,95	1,151	šterkovité a písčité zeminy	135	110	11	11	11	11	5 + 1	2,4		1	ocel	1984 - 1988
Tunel Wan Aqua Line	Japonsko	Slurry	8	Kawasaki	14,14	2 x 4,5	jilovité a písčité zeminy	20	60	6	9	6,5	6	11 + 1	11,9	650	1,5	ŽB	1994 - 1997
Tunel Hallandsas	Švédsko	EPB	1	Herrenknecht	10,6	2 x 5,5 (TBM)	rula a amfibolity, poruchové zóny	150	130		13	11	15	7 + 1	10,12	540	2,2	ŽB	2004 - 2015
Tunel Arrowhead	USA	EPB	2	Herrenknecht	5,8	13,8	rula	630	200	20	10		27,5	5 + 1	3,65	330	1,524	ŽB	2002 - 2010

Mechanizovaná ražba pod vysokým hydrostatickým tlakem (nad 400 kPa) znamená výraznou komplikaci pro ražbu a vyžaduje speciální technologie při návrhu a během vlastní ražby. TBM včetně veškerého vybavení a procedur během ražby by mělo umožňovat aplikaci adekvátního tlaku odpovídajícího hydrostatickému na čelbě během ražby, ale i během údržby řezné hlavy. Pokud tomu tak není, tak mohou nastat výrazné problémy, jako v případě tunelu Storebaelt, kde došlo k zaplavení TBM i tunelu. Ražba v pevném a málo propustném horninovém masivu pod vysokým hydrostatickým tlakem obecně není problém pro zeminové a bentonitové štíty, protože v těchto případech je obecně čelba stabilní a přítoky vody nejsou vysoké. V nestabilním horninovém masivu je jednodušší zajistit potřebný tlak na čelbě při

využití bentonitových štítů. Vzhledem k nutnosti lubrikace masivu obecně zeminové štíty vyžadují více času pro zajištění stability čelby, což se nepříznivě projevilo na některých projektech (např. tunel v prefektuře Nara, tunel v Jižním zálivu, tunel Storebaelt). V případech vyššího hydrostatického tlaku v nestabilním horninovém masivu s vyšší propustností je výhodné využít předstihových injektáží pro zlepšení masivu v prostoru čelby a okolí tunelu. Předstihové injektáže bohužel výrazně zpomalují rychlost postupu ražby.

Co se týká jednokolejných železničních tunelů, tak nejvyšší hydrostatický tlak byl pravděpodobně zaznamenán na tunelu Hallandsas, kde byla HPV 130 m nad tunelem a TBM běžně razilo s tlakem na čele 900 až 1100 kPa. V daném případě bylo vzhledem ke striktnímu požadavku na zachování původní polohy HPV a požadavku na minimum přítoků vody navrženo nepropustné segmentové ostění o mocnosti 540 mm. Ražba tunelu Hallandsas byla vzhledem k speciálním procedurám během ražby (předstihová injektáž, speciální postup při injektování rubu ostění, atd.) relativně nákladná a pomalá (cca 55% času bylo třeba na přerušení pro injektáže a údržbu).

Na základě uvedených poznatků by v případě realizace tunelu Praha – Beroun bylo nutné podrobně prozkoumat hydrogeologické podmínky tunelu (úroveň HPV nad tunelem, propustnost masivu, atd.) a na základě výsledků podrobného hydrogeologického průzkumu přijmout adekvátní opatření (zejména pro návrh způsobu ražby a návrh ostění). Z provedených výpočtů vyplynulo, že uvažovaná mocnost ostění 400 mm předpokládaná v přípravné dokumentaci tunelu Praha – Beroun by byla vyhovující přibližně do výšky HPV 80 m nad osou tunelu. V případě vyšší výšky vodního sloupce a požadavku na zcela vodonepropustné ostění by bylo nutné zvýšit mocnost segmentového ostění. Další možností by bylo zvážení koncepčního přístupu k návrhu segmentového ostění a požadavku na jeho plnou vodonepropustnost. Příprava výstavby tunelu Praha – Beroun byla v roce 2010 zastavena.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů TAČR TA01011816 a GAČR P104/10/2023.

### **Literatura:**

Burger, W., Dudouit, F. 2009. The Hallandsas dual mode TBM. RETC, Proc., 2009. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton CO, USA.

Fulcher, B., Bednarski, J., Bell, M., Tzobery, S., Burger, W. 2007. Piercing the mountain and overcoming difficult ground and water conditions with two hybrid hard rock TBMs. RETC, Proc., 2007. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton CO, USA.

Hansford, M. 2009. Hard Rock Hallelujah. NCE 6/2009.

Holzhauser, J., Hunt, S. W., Mayer, C. 2007. Global Experience with Soft Ground and Weak Rock Tunneling under Very High Groundwater Heads