

# Riziko vysokého hydrostatického tlaku na tunelu Praha - Beroun

M. Hilar, M. Srb, J. Nosek  
D2 Consult Prague s.r.o. a FSv ČVUT, ČR

**SHRNUTÍ:** Výstavba vysokorychlostního železničního tunelu Praha – Beroun je v současnosti ve fázi projektové přípravy. Tento podzemní projekt nemá v ČR obdoby, v rámci ČR se jedná o nejdelší dopravní tunel s nejvyšším nadložím. Většina ražeb je předpokládána s využitím plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM). Pro navržené řešení byla provedena riziková analýza, která byla zaměřena na výstavbu a provoz tunelu. Možnost vysokého hydrostatického tlaku byla vyhodnocena jako jedno z významných rizik, které je třeba vyhodnotit podrobněji.

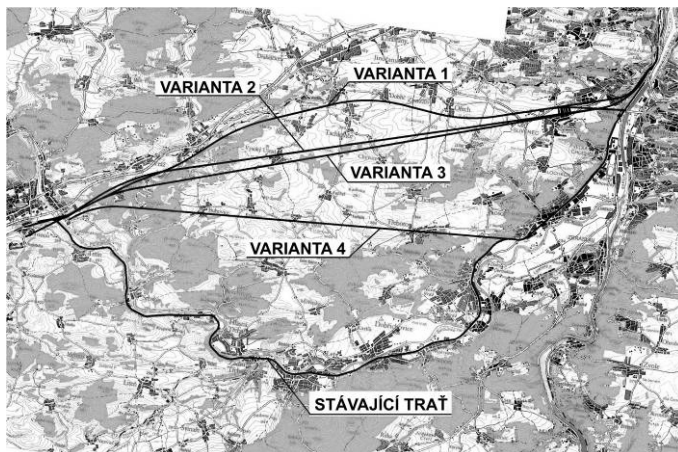
V projektu je předpokládáno využití vodonepropustného segmentového ostění z prefabrikovaného betonu s těsníci pásky, které by mělo být zatíženo plným hydrostatickým tlakem. Přesná poloha hladiny podzemní vody (HPV) není v současnosti známa, v nejméně příznivém případě může být HPV v blízkosti povrchu terénu s plným hydrostatickým tlakem zatěžujícím ostění tunelu. Vliv různých hodnot hydrostatického tlaku na potřebnou mocnost a vyztužení ostění byl vyhodnocen, ostění bylo posouzeno pro polohy HPV od 10 m do 177,5 m nad osou tunelu. Dále byla vypracována studie dosavadních zkušeností mechanizované ražby pod vysokým hydrostatickým tlakem.

## 1. VÝVOJ PŘÍPRAVY PROJEKTU

V rámci přípravy optimalizace tratí 3. tranzitního železničního koridoru byla v roce 2002 zpracována územně technická studie pro úsek Praha Smíchov – Plzeň hl.n. V této dokumentaci byla navržena dle zadání optimalizace trati ve stávající stopě s místním zlepšením směrových poměrů. Následně bylo zahájeno zpracování dokumentací pro územní řízení. Během zpracování se potvrdilo, že provozovaná železniční trať mezi Prahou a Berounem sledující tok Berounky neumožňuje zásadní zvýšení rychlosti dopravy, neboť stávající trať se bezprostředně dotýká územní CHKO Český kras, což výrazně znesnadňuje významnější změny směrového vedení. Proto bylo rozhodnuto o prověření nového vysokorychlostního železničního spojení Praha – Beroun pomocí dlouhých tunelů.

Bylo zpracováno několik variant nového spojení vedených zčásti tunely a zčásti po povrchu. Prověření těchto variant dospělo k závěru o jejich nereálnosti vzhledem k zastavěnosti území západně od Prahy. Proto byla hledána další řešení s využitím velmi dlouhých tunelů pro většinu trasy. V roce 2005 byla zpracována územně technická studie, která předpokládala vedení nové železniční trati z Hlubočep v Praze tunelem Barrandov délky 19 km do údolí říčky Loděnice u obce Svatý Jan pod Skalou. Údolí měla nová trasa přejít 700 m dlouhou mostní estakádou,

za níž by následoval tunel Svatý Jan o délce 4 km s vyústěním v údolí Berounky. Na jaře roku 2006 byla zpracována doprovodná studie, která územně technickou studií rozpracovala a dále řešila varianty vyústění tunelu v Praze (Hlubočepy a Malá Chuchle) a způsob překonání říčky Loděnice ve Svatém Janu pod Skalou (přemostění či podchod). Na jaře roku 2006 byla rovněž zpracována rozšířená geologická rešerše, která shrnovala veškeré poznatky o geologické stavbě zájmového území. Na rešerši navázala úvodní riziková analýza, ve které byla vyhodnocena rizika výstavby a provozu.



Obrázek 1. Varianty trasy tunelu Praha - Beroun.

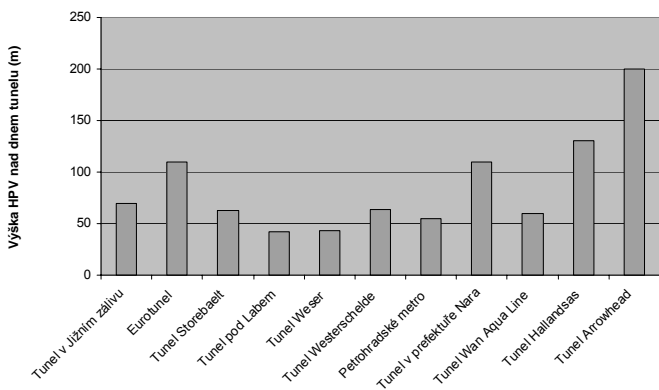
Z možných variant trasy byla vybrána varianta 24,7km dlouhého tunelu, který se severním obloukem částečně vyhýbá krasové oblasti mezi Prahou a Berounem (Varianta 1 na obr.1). Předběžný geotechnický průzkum zvolené trasy byl dokončen v květnu 2007. Přípravná dokumentace (dokumentace pro územní rozhodnutí) byla odevzdána v červnu 2007. Následně byl vypracován projekt podrobného geotechnického průzkumu. Také byla vypracována riziková analýza pro výstavbu a provoz 24,7km dlouhého železničního tunelu. Možnost vysokého hydrostatického tlaku byla vyhodnocena jako jedno z významnějších rizik, které je třeba vyhodnotit podrobněji.

Vzhledem k finanční náročnosti tunelu Praha - Beroun jsou v současnosti podrobněji zkoumány méně nákladné varianty kratších tunelů (Varianta 4 na obr.1).

## 2. TBM PROJEKTY POD VYSOKÝM HYDROSTATICKÝM TLAKEM

### 2.1. Základní přehled

Základní přehled tunelů ražených mechanizovaně pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM = Tunnel Boring Machine) pod vysokým hydrostatickým tlakem včetně poloh HPV je uveden na obr.2, 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.



Obrázek 2. Přehled tunelů ražených TBM pod vysokým hydrostatickým tlakem.

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. Dokončenými projekty s vysokým hydrostatickým tlakem jsou tunely South Bay Ocean Outfall (700 kPa), železniční Eurotunnel pod kanálem La Mance (1000 – 1100 kPa), železniční tunnel Storebaelt (800 kPa), silniční tunnel pod Labem (4th Elbe Tunnel) (420 kPa), Wesertunnel (430 kPa), tunnel Westerschelde (640 kPa), červená trasa metra v Petrohradě (550 kPa), vodovodní tunnel v prefektuře Nara v Japonsku (1100

kPa) nebo silniční tunnel Wan Aqua Line pod Tokijským zálivem (600 kPa).

### 2.2. Vyhodnocení zkušeností

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 tunnel Arrowhead, kde byl tlak na čele TBM výrazně nižší než hydrostatický tlak.

Během přestávek pro údržbu řezných nástrojů na čele TBM byl v prostoru řezné hlavy udržován různý tlak. Na některých projektech mohl být vzhledem k nízké propustnosti masivu v oblastech přestávek tlak na čele TBM výrazně nižší než okolní hydrostatický tlak, na většině projektů byl používán během údržby stlačený vzduch, jehož stlačení korespondovalo s okolním hydrostatickým tlakem. Pouze na dvou projektech byla využita pro údržbu směs stlačených plynů (tunnel Westerschelde a podchod petrohradského metra pod Něvou). Pouze při ražbě tunelu Westerschelde bylo použito potápěčské techniky pro údržbu řezné hlavy.

Na základě vyhodnocení projektů tunelů pod vysokým hydrostatickým tlakem lze učinit následující závěry (Holzhäuser at al. 2007):

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. tu-

nel v prefektuře Nara, tunel v Jižním zálivu, tunel Storebaelt).

Lze očekávat, že v daném řezu se budou vyskytovat bazalty, vápnité a prachovité břidlice, výše nad tunelem se mohou vyskytovat také vápence, tufy a tufitické břidlice.

Tabulka 1. Porovnání tunelů s vysokým hydrostatickým tlakem

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	křída	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 balvaný	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 balvaný	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)	ruly 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

Pouze v pevném horninovém masivu s nízkou propustností je riziko údržby řezné hlavy při atmosférickém tlaku přijatelné, nicméně v každém případě by mělo být umožněno zajistit čelbu pomocí stlačeného vzduchu.

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.

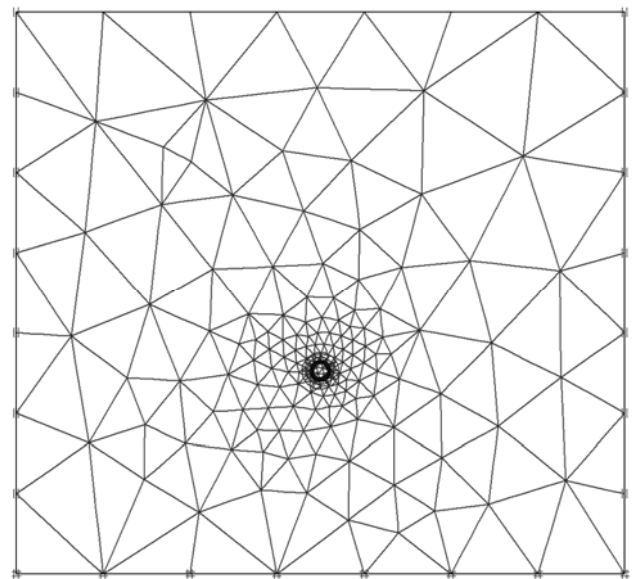
Co se týká jednokolejných železničních tunelů, tak nejvyšší hydrostatický tlak byl pravděpodobně zaznamenán na tunelu Hallandsas, kde byla HPV 130 m nad tunelem a TBM běžněrazilo s tlakem na čele 900 až 1100 kPa. V daném případě bylo vzhledem ke striktnímu požadavku na zachování původní polohy HPV a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

### 3. STATICKÉ VÝPOČTY

Výpočty byly provedeny v řezu km 25,600 (cca 2 km od Berounského portálu). Daný řez byl vybrán vzhledem k nejvyšší mocnosti nadloží. V daném řezu je povrch 181 m nad niveletou trati, což je 177,5 m nad osou kruhového tunelu.

Pro výpočty bylo nutné stanovit geotechnické parametry horninového masivu. Pro stanovení parametrů byly využity výsledky předběžného geotechnického průzkumu.

Pro účely výpočtu byly použity střední hodnoty parametrů vápnitých a prachovitých břidlic, které jsou horší v porovnání s parametry bazaltů. Horninový masiv byl uvažován jako homogenní.



Obrázek 3. Geometrie numerického modelu

Pro postup výpočtu bylo učiněno několik předpokladů. Výpočet předpokládá ražbu pomocí TBM s tlakem na čelbě (např. zeminový štít), který zajistí nulovou relaxaci a čelbě včetně zachování hydrostatické tlaku na čelbě (tj. bez přítoku vody do tunelu). Dále výpočet předpokládá částečnou deformaci masivu kolem pláště TBM a kolem segmentů před zainjektováním vnějšího líce segmentů. Velikost dané deformace byla uvažována jako 1% ztráty objemu zeminy.

Parametrická studie byla provedena pro různé úrovně HPV. Pro výpočet byla uvažována poloha HPV od 10 m do 177,5 m nad osou tunelu.

Tabulka 2. Výsledky parametrické studie vlivu polohy HPV na velikost vnitřních sil v ostění

HPV nad osou tunelu (m)	N (kN)	M (kNm)	d (mm)
177,5	7830	62	31
140	6220	63	30
100	4500	59	29
50	2310	61	28
10	583	63	27

Bylo provedeno posouzení pro zatížení ostění efektivním a hydrostatickým tlakem. Dále bylo provedeno i posouzení zatížení ostění TBM (přítlačná síla a kroutící moment). Pro určení parametrů TBM byly použity návrhové parametry TBM pro tunel Hallandsas, který má obdobné parametry (železniční tunel, profil TBM 10,6 m, maximální nadloží 150 m, maximální předpokládaná výška vodního sloupce 130 m). Parametry ostění vyhovujících posouzení jsou uvedeny v Tab.3.

Tabulka 3. Výsledky parametrické studie vlivu polohy HPV na mocnost a vyztužení ostění

HPV nad osou tunelu (m)	Ostění (mm)	Příčná výztuž	Podélná výztuž	Šrouby (mm)
177,5	680	28 x Ø12	22 x Ø12	Ø40
140	580	24 x Ø12	18 x Ø12	Ø35
100	460	18 x Ø12	20 x Ø10	Ø30
50	320	18 x Ø10	14 x Ø10	Ø26
10	200	12 x Ø10	10 x Ø10	Ø26

Provedené statické výpočty a posouzení segmentového ostění dávají základní představu o potřebné mocnosti a vyztužení segmentového ostění při různých polohách hladiny podzemní vody.

V provedených výpočtech jsou některé předpoklady, které mají výraznější vliv na výsledky. Zejména je předpokládán plný hydrostatický tlak na ostění, ostění tunelu je uvažováno jako zcela vodonepropustné (tj. bez disipace pórových tlaků v okolí tunelu).

Dále byla uvažována celková šířka drážek ostění v oblasti styků 150 mm (70 mm + 70 mm + 10 mm). Šířka drážek snižuje plochu betonového ostění přes kterou jsou přenášeny vnitřní síly. Optimalizací tvaru styků ostění by pravděpodobně bylo možné dosáhnout malé úspory v celkové mocnosti ostění. Výpočty byly provedeny v řezu km 25,600, kde jsou očekávány příznivé parametry horninového masivu. V provedených výpočtech byl vliv zatížení efektivním tlakem horninového masivu velmi nízký. V případě nižších parametrů horninového masivu lze očekávat vyšší zatížení ostění způsobené efek-

tivním napětím, což by znamenalo potřebu vyšší mocnosti ostění.

#### 4. ZÁVĚR

Na základě uvedených poznatků je třeba podrobně prozkoumat hydrogeologické podmínky tunelu Praha – Beroun (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 je patrné, že mocnost ostění 400 mm předpokládaná v přípravné dokumentaci 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 je zvážení koncepčního přístupu k návrhu segmentového ostění a požadavku na jeho plnou vodonepropustnost.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů GAČR 104/10/2023, GAČR 205/08/0732 a VZ 03 CEZ MSM 6840770003.

#### LITERATURA

SUDOP. 2007. Nové železniční spojení Praha – Beroun. Přípravná dokumentace.

GeoTec GS. 2007. Nové železniční spojení Praha – Beroun – Závěrečná zpráva o předběžném geotechnickém a stavebně technickém průzkumu pro přípravnou dokumentaci stavby – část zprávy A – Tunely.

Gauthier, B. 2008. Hallandsas tunnels TBM excavations. Presentation. Seminar New Trends in Design and Construction of Tunnels III. Prague June 2008.

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

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.

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