

ZPŮSOBY PODEPŘENÍ ČELBY PŘI RAŽBÁCH TUNELŮ POMOCÍ ŠTÍTU – HISTORICKÁ PERSPEKTIVA A SOUČASNOST

P. Hybský & V. Gall

Gall Zeidler Consultants, Virginia, Spojené Státy Americké

A. Valdivia

WSP, New York, Spojené Státy Americké

P. Griesbach

Herrenknecht AG, Schwanau, Spolková republika Německo

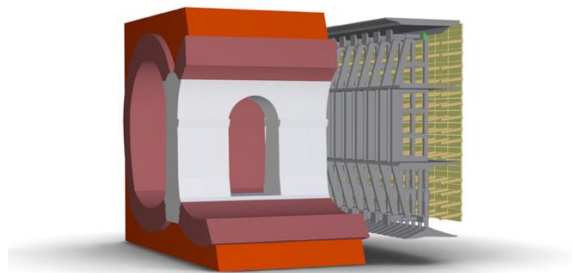
ABSTRAKT: Ražba tunelů pomocí štítu, jakožto samostatná disciplína podzemního stavitelství, vstupuje letos do svého třetího století existence. Uplynulo již dvě stě let od chvíle, kdy byl sestrojen první tunelovací štít, zkonstruovaný Marcem Brunelem, a následně použit při ražbě Temžského tunelu. Od tohoto průkopnického počínu se technologie proměnila z jednoduchého ocelového ochranného pláště v sofistikované strojní mechanismy. Jedno však zůstává po celá dvě století neměnné – nutnost podepření čelby v daných geologických podmínkách. Vývoj jednotlivých metod podepření čelby a zejména proměna přístupů k nim jsou tématem následujícího článku.

HISTORICKÁ CESTA K SOUCASNEMU STAVU TECHNOLOGIE

Stavitelé, kteří se na počátku devatenáctého století pokoušeli propojit protilehlé břehy londýnské řeky Temže mezi farnostmi Saint John of Wapping a Saint Mary Rotherhithe, stáli před téměř neřešitelným úkolem. Mostní spojení se jevilo jako logické řešení, avšak mimořádně hustý říční provoz, v dnešních poměrech jen těžko představitelný, a nutnost velmi vysokého podjezdného profilu tuto možnost prakticky vylučovaly. Proto byly zahájeny práce na tunelu. Po několika zatopeních šachet a později i kolapsech samotného tunelu způsobených tekutými písky byly práce opuštěny a projekt byl s tehdejšími dostupnými metodami označen za neproveditelný. Bylo tedy nutné přijít s novým, dosud nerealizovaným konstrukčním řešením.

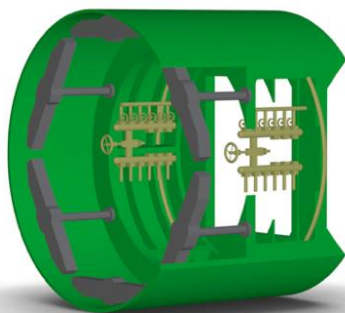
V těchto kulisách vstoupil na scénu Marc Brunel — inženýr francouzského původu, muž pozoruhodných životních osudů, a především osobnost inovativního myšlení, technického i konstrukčního umu a mimořádné odvahy pustit se do riskantního a velmi nejistého úkolu. Inspirován mořským organismem šášněm lodním navrhl tunelovací štít, pohyblivou ocelovou konstrukci, uvnitř níž mohlo současně pracovat až 36 pracovníků, kteří postupně rozpojovali horninu na čelbě tunelu za současného neustálého podpírání čelby pomocí dřevěných pažin.

Po osmnácti dlouhých letech, poznamenaných nesčetnými obtížemi, Brunel tunel dokončil, a aniž by to tušil, otevřel symbolickou bránu svým následovníkům, kteří jeho původní myšlenku dále rozvíjeli a rozvíjejí dodnes.



Obrázek 1: Vizualizace Brunelova štítu a části Temžského tunelu

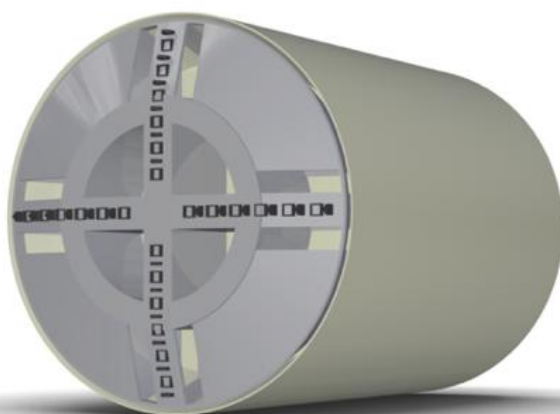
Jedním z významných následovníků Marca Brunela byl James Henry Greathead, který navrhl kruhový tunelovací štít pro ražbu londýnského Tower Subway, uvedeného do provozu v roce 1870. V roce 1886 byl Greathead jmenován inženýrem nového projektu, City & South London Railway, pro který svůj původní štít dále zdokonalil. Nejenže jej zvětšil, ale také jej vybavil hydraulickým systémem a stlačeným vzduchem. Jeho štít, s pouze drobnými úpravami, zůstal v používání až do 40. let 20. století.



Obrázek 2: Vizualizace Greatheadova tunelovacího štítu

Stlačený vzduch byl v podzemním stavitelství používán poměrně hojně a v určitých specifických případech (např. při výměně řezných nástrojů TBM) se používá dodnes. Přes své nepopiratelné výhody však stlačený vzduch přináší i mnoho rizik. V roce 1880 došlo při ražbě tunelu, který měl propojit New Jersey a Manhattan pod řekou Hudson, k úniku vzduchu na povrch (MCCRAY J., 2025). Tato událost měla na svědomí dvacet lidských obětí. Během výstavby newyorského metra v roce 1916 došlo k téměř neuvěřitelné události, kdy byli v důsledku úniku vzduchu poblíž Brooklynského mostu tři dělníci tlakem vzduchu doslova vystřeleni skrz říční dno — přičemž jeden z nich zázračně přežil téměř bez zranění (New York Times, 1916). Stlačený vzduch může během podzemních prací také vytlačovat kontaminanty ze znečištěných zemin do ovzduší, jak se stalo v Baltimoru při ražbě úseku C metra (EDWARDS C., MERRILL K., 1995), kdy se do vzduchu uvolnily výpary z ropných produktů. Kromě těchto mimořádných incidentů je práce ve stlačeném vzduchu nebezpečná i pro samotné pracovníky, pokud nejsou dodrženy předepsané postupy a dekompresní časy; nemluvě o tom, že práce v prostředí se stlačeným vzduchem je fyzicky mnohem náročnější než srovnatelná práce za atmosférických podmínek.

Komplikace spojené s provozem ve stlačeném vzduchu vedly projektanty k vývoji nových metod podepření čelby pomocí kapalin namísto vzduchu. John Barlett, který se zabýval otázkou, jak razit tunely v nesoudržných zeminách a zvodnělých vrstvách, se inspiroval při návštěvě výstavby první linky milánského metra. Tam byly široce používány podzemní stěny dočasně pažené bentonitovou suspenzí, a Barlett si během zpátečního letu začal představovat, jak by bylo možné tuto metodu přizpůsobit tunelovacím strojům. V jeho mysli se začaly rodit první obrysy návrhu, který později nabyl konkrétní podoby v konceptu bentonitového štítu, patentovaného v roce 1964.



Obrázek 3: Vizualizace bentonitového štítu John Barletta

Další významný příspěvek v oblasti metod podepření čelby se objevil v 70. letech 20. století. V Zemi vycházejícího slunce byl vyvinut koncept zeminového štítu stroje, který podepírá čelbu pomocí upravené rubaniny. První štít tohoto typu byl použit při výstavbě stokové sítě v Tokiu v roce 1974.



Obrázek 4: Vizualizace zeminového štítu (Tokyo 1974)

Výše uvedené principy podepření čelby představují jedno ze základních kritérií pro klasifikaci tunelovacích štítů. Tabulka 1, vycházející z (Recommendations 2000), uvádí kategorizaci štítů podle dvou hlavních kritérií: zda jsou určeny pro ražbu s částečným záběrem čelby (označení T), nebo pro ražbu s plným záběrem čelby (označení V). Druhotným kritériem je konkrétní princip, na jehož základě jsou schopny během ražby podepírat čelbu tunelu.

Tabulka 1: Kategorie tunelovacích štítů (ITA-AITES, 2000)

Štíty			
Štíty s plnoprofilovým pobíráním v čelbě		Štíty s částečným pobíráním v čelbě	
Štít bez podpory čelby	SM-V1	Štít bez podpory čelby	SM-T1
Štít s mechanickou podporou čelby	SM-V2	Štít s mechanickou podporou čelby	SM-T2
Štít s podepřením čelby stlačeným vzduchem	SM-V3	Štít s podepřením čelby stlačeným vzduchem	SM-T3
Štít s podporou čelby kapalnou suspenzí	SM-V4	Štít s podporou čelby kapalnou suspenzí	SM-T4
Štít s podporou čelby upravenou zeminou	SM-V5		



Obrázek 5: Přehled základních principů podepření čelby v případě ražeb tunelovacími štíty

1. STROJNÍ INTERPRETACE RAŽEB TUNELOVACÍMI ŠTÍTY

Na konci dvacátého století a na počátku století jednadvacátého došlo k výraznému rozvoji mechanizovaných metod ražby tunelů. Výrazně vzrostl počet tunelů ražených pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů, zvětšovaly se jejich průměry a rozšiřoval se také rozsah geologických podmínek, v nichž byly tyto stroje schopny pracovat. Tunelovací štíty se tak staly univerzálnějšími a často kombinovaly více způsobů podepření čelby.

S ohledem na zásadní pokrok ve strojírenství, v počítačových řídicích systémech, a především na skutečnost, že tunelovací štít není pouze nástrojem pro provádění ražby, jak je tomu u konvenčních metod, ale představuje samotnou podstatu a určující prvek celého procesu ražby, není překvapivé, že se změnil i koncepční přístup ke způsobům podepření čelby. Postupně začal převažovat pohled strojní

nad pohledem geotechnickým, což se mj. odráží i v terminologii používané k popisu jednotlivých režimů ražby.

Tento trend lze doložit například dokumentem (Recommendations for the Selection 2022 revised 2025) z roku 2025, který upravuje označení uvedené v tabulce 1 (*tabulka je za účelem přehlednosti ponechána v anglickém jazyce, neboť variable density a hybridní štíty nemají dosud oficiální český ekvivalent, pozn. autora*) a odkazuje přímo na tunelovací stroje, nikoli na principy podepření čelby. Za pozornost stojí, že stroje typu EPB jsou zde popsány jako schopné ražby pouze v uzavřeném režimu. V podrobném popisu principu EPB ve stejném dokumentu je však uvedeno, že za stabilních geologických podmínek může být zeminový štít provozován i bez přetlaku, nebo s částečně zaplněnou odtěžovací komorou. Tento provozní režim, bez aktivního podepření čelby, je označován jako otevřený režim.

Tabulka 2: Klasifikace tunelovacích štítů – anglická terminologie (DAUB 2022, rev. ,2025)

Name	Short	Operation Mode			Excavation Classes
		Open	Closed	Transition	
Slurry Shield	SLS	---	X	---	VS2
Earth Pressure Balance Shield	EPB	---	X	---	VS3
Variable-Density-Shield	VDS	X	X	X	VS2/VS3
Hybrid Shield	HYB	X	X	X	VS2/VS3

2. ZEMINOVÉ ŠTÍTY

Zeminový štít je tunelovací stroj schopný pracovat v několika různých režimech. Například (HERRENKNECHT M., THEWES M., BUDACH CH., 2011) uvádí šest takových režimů. Právě zde se zřetelně projevuje rozdíl mezi strojním a geotechnickým pohledem. Zatímco pro strojní interpretaci je klíčovou otázkou **JAK**, tedy jak je vytvářen podpurný tlak, jak je rubanina odtěžována z čelby a následně transportována tunelem, pro geotechnický pohled je důležité ČÍM je čelba podpírána. Tedy jaké je podpurné médium a jaký tlakový obrazec vytváří.

Tabulka 1 porovnává režimy ražby štítu s podporou zeminovým tlakem, jak jsou uvedeny v (HERRENKNECHT M., THEWES M., BUDACH CH., 2011), s jejich geotechnickou interpretací. Ražba v otevřeném režimu teoreticky představuje tunelování bez podepření čelby (omezení tohoto přístupu budou diskutována v kapitole 4) a odpovídá kategorii V1 (dle tabulky 1). Naproti tomu uzavřený režim představuje ražbu s úplnou podporou čelby upravenou zeminou. Pokud je komora čelby zaplněna pouze částečně, jedná se o kombinaci režimů V1 a V5.

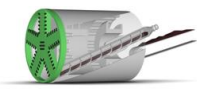



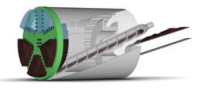

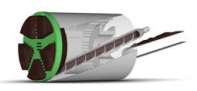



Moderní zeminové štíty umožňují také ražbu za použití stlačeného vzduchu. Tento režim je popisován různou terminologií — například jako „half open mode“ (HERRENKNECHT M., THEWES M., BUDACH CH., 2011) (v českém ekvivalentu jako polovičatě otevřený režim) nebo „semi closed mode“ (BABENDERERDE S., HOEK E., MARINOS P.G., CARDOSO A.S., 2005) (analogicky v českém ekvivalentu částečně uzavřený režim). V praxi tento stav odpovídá situaci, kdy zeminový štít pracuje v režimu V3, tedy s podporou čelby stlačeným vzduchem. S tímto režimem spojený tlakový obrazec nevytváří gradient, případně vytváří pouze částečný gradient, a spíše odpovídá všesměrnému tlakovému působení.

Je nutné zdůraznit, že ražba ve stlačeném vzduchu je i nadále spojena s veškerými riziky, která byla nastíněna v kapitole 1 tohoto článku. Použití stlačeného vzduchu v rámci zeminových štítů — bez ohledu na to, jak je provozní režim označován — neodstraňuje nebezpečí spojená s tímto způsobem podepření čelby. Dále je třeba poznamenat, že štít použitý při výstavbě newyorského metra (v roce 1916) měl průměr přibližně 5 m. Celková plocha čelby tohoto štítu, podepřená stlačeným vzduchem, odpovídá zhruba jedné třetině výšky čelby stroje s průměrem rezné hlavy 10 m.

Článek (Recommendations for the Selection 2022 revised 2025) z něhož je převzat levý sloupec tabulky 3 „Provozní režimy zeminových štítů“, dále rozlišuje tři specifické režimy v rámci ražeb s úplnou podporou čelby. I to znovu podtrhuje rozdílné pohledy strojní a geotechnické na tutéž problematiku. Zatímco z mechanického hlediska tyto režimy skutečně představují odlišné provozní

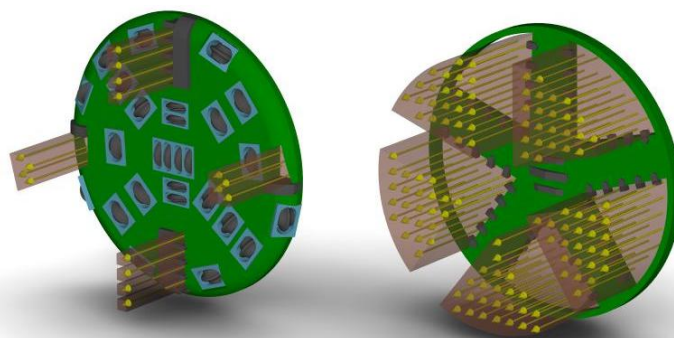
konfigurace, z geotechnického pohledu se všechny nadále řadí mezi způsoby podepření čelby upravenou zemínou.

Table 3: Provozní režimy zeminových štítů

Strojní interpretace		Geotechnická interpretace	
Otevřený režim		Bez podpory čelby (V1)	
Přechodový režim		Kombinace (V1 & V5)	
Polovičatě otevřený režim		Kombinace (V5 & V3)	
Uzavřený režim		Podepření čelby upravenou zemínou (V5)	
Uzavřený režim s pístovým čerpadlem			
Uzavřený režim s bentonitovým okruhem			

3. ŠTÍTY S MECHANICKÝM PODEPŘENÍM ČELBY

Štíty s mechanickým podepřením čelby byly definovány následovně: „Podepření čelby tunelu je zajišťováno téměř uzavřenou řeznou hlavou.“ (Recommendations 2000) V (Recommendations for Face Pressure 2016) se uvádí: „Štíty s mechanickým podepřením čelby byly v minulosti používány při ražbě tunelů. Používání těchto strojů se již nedoporučuje.“ — tím byly fakticky považovány za historické relikty. V poslední době se však role řezné hlavy ve stabilitě čelby opět dostává do centra pozornosti odborníků.

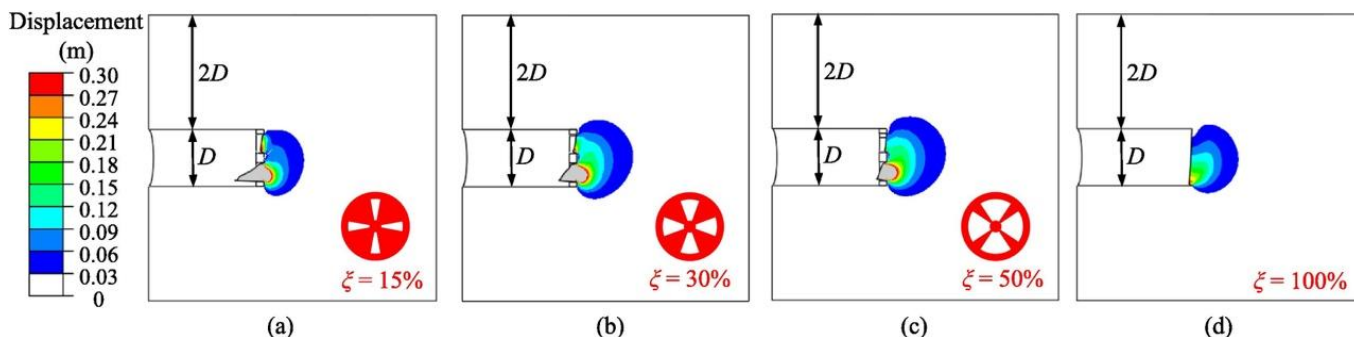


Obrázek 6: Grafické znázornění přenosu podpůrného média na čelbu v závislosti na poměru otevření řezné hlavy

Výpočty požadovaných tlaků pro podepření čelby u ražeb zeminovými a bentonitovými štíty se obvykle provádějí s uvažováním, že podpůrné médium působí na celou plochu čelby rovnoměrně, jako by stroj neměl řeznou hlavu. Vzhledem k tomu, že se v současnosti vyrábí stále více kombinovaných strojů, tedy strojů schopných razit i v horninovém prostředí, jejichž řezné hlavy mají menší poměr

otevření, je nutné zohlednit také mechanickou podpůrnou funkci samotné řezné hlavy. Touto problematikou se zabývá například (CHEN X.J., FANG P.P., CHEN Q.N., HU J., YAO K., LIU Y., 2024).

Zohlednění podílu řezné hlavy na celkové funkci podepření čelby by mohlo vést k přesnějším výpočtům potřebných podpůrných tlaků a k minimalizaci tzv. „performance killers“, mezi něž nadměrně vysoký podpůrný tlak bezpochyby patří. Tato oblast nabízí značný prostor jak pro experimentální výzkum, tak pro numerické analýzy.



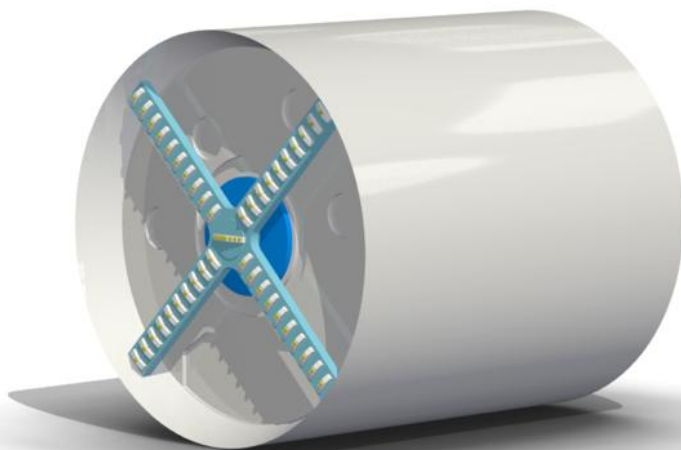
Obrázek 7: Vliv poměru otevření řezné hlavy na stabilitu čelby (Recommendations for Face Pressure 2016)

V důsledku toho představuje každá ražba prováděná zeminovými nebo bentonitovými štíty kombinaci principů V2 a V5, případně V2 a V4 (viz tabulka 1). Míra příspěvku principu V2 vždy závisí na robustnosti konstrukce řezné hlavy, na poměru otevření a také na rozmístění otvorů v rámci řezné hlavy.

4. BENTONITOVÉ ŠTÍTY

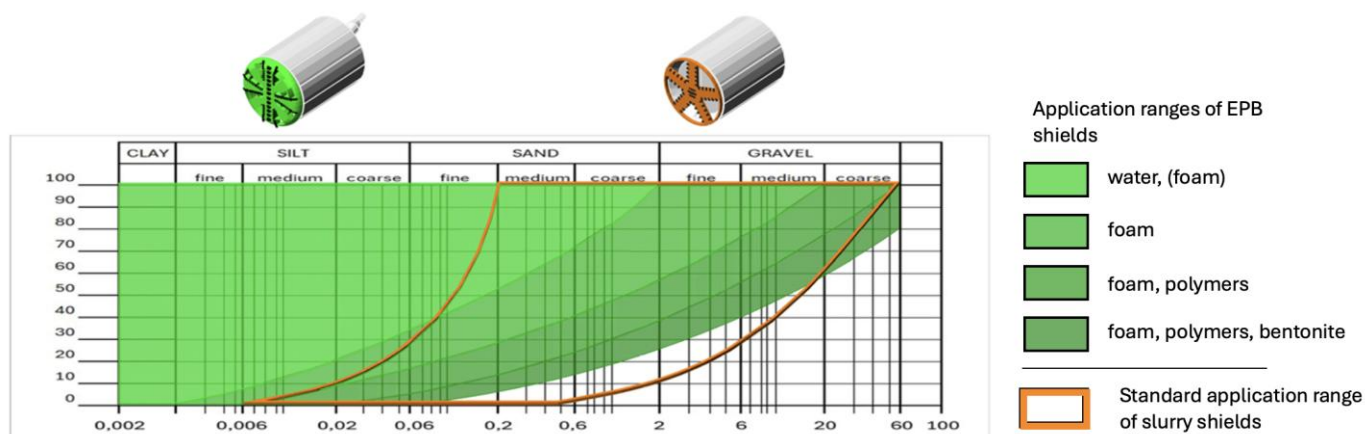
Bentonitové štíty se vyznačují tím, že podepření čelby je zajištěno suspenzí, kterou většinou tvoří směs vody a bentonitu. V procesu ražby má tato suspenze v zásadě dvě funkce: jednak zajišťuje zmíněné podepření čelby tunelu, a také slouží jako transportní médium pro těžbu rubaniny. Jak již bylo uvedeno, tento princip je inspirován výstavbou podzemních stěn v nesoudržných zeminách.

V polovině osmdesátých let minulého století vyvinula společnost Herrenknecht mixshield (není zaveden oficiální český ekvivalent, pozn. autora), tedy štít, který pro podepření čelby používá bentonitovou suspenzi a jehož podpůrný tlak je přesně regulován automaticky řízeným tlakem vzduchu. Pro přesné řízení podpůrného tlaku na čelbě je suspenzí zaplněná komora rozdělena přepážkou na přední komoru čelby a zadní, tzv. pracovní komoru. V pracovní komoře je podpůrný tlak generován stlačeným vzduchem a přenášen do bentonitové suspenze. Obě komory jsou propojeny přes otvor v přepážce umístěný v její spodní části. Prvním projektem, kde byl mixshield použit, byl částicový urychlovač DESY HERA v Hamburku v roce 1985 (HERRENKNECHT M., 2019).



Obrázek 8: Vizualizace prvního mixshieldu pro projekt DESY HERA v Hamburku

Ve svém původním pojetí představovaly zeminové a bentonitové štíty vzájemně se doplňující technologie, navržené tak, aby pokryly celé spektrum geologických podmínek — od jílu a jemnozrnných prachů až po hrubé šterky. Zeminové štíty jsou obecně považovány za vhodné pro jemnozrnné zeminy, zatímco bentonitové štíty jsou vhodnější pro hrubozrnné materiály. Postupem času se však zeminové štíty staly výrazně univerzálnějšími a rozšířily svou použitelnost do širšího spektra geologických prostředí. Tento vývoj nastal zejména proto, že technologie EPB částečně převzala principy bentonitových štítů. I v prostředí hrubých šterků se v komoře čelby vytváří suspenze, která slouží jako podpůrné médium. To potvrzuje například (Recommendations 2000), kde se uvádí: „Za účelem rozšíření oblasti použití štítů s podporou zeminovým tlakem lze použít vhodné prostředky pro kondicionování rubaniny: bentonit, polymer, pěna z polymerů.“

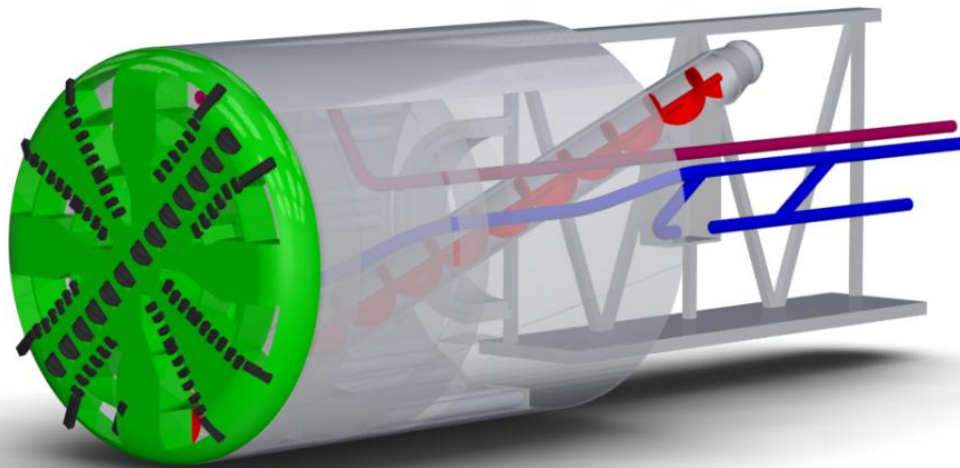


Obrázek 9: Oblasti možných nasazení zeminových a bentonitových štítů [Thewes 2007]]

Je nasnadě, že již od počátků vývoje štítů s podporou čelby upravenou zeminou a bentonitových štítů začali tuneláři a konstruktéři strojů uvažovat o tom, jak oba konstrukční principy spojit do jediného konceptu a vytvořit tak univerzální stroj schopný pracovat prakticky ve všech geologických podmínkách.

První takový stroj, označovaný jako víceúčelový, byl navržen v 80. letech 20. století (BÄPPLER K., BATTISTONI F., BURGER W., 2018). V roce 2000 byl víceúčelový plnoprofilový tunelovací stroj úspěšně nasazen při výstavbě silničního tunelu Socatop v Paříži. V roce 2013 dodala společnost Herrenknecht tunelovací stroj pro projekt Miami Port Tunnel, který byl schopen pracovat jak v režimu zeminového štítu, tak v režimu Water-Controlled Process (WCP). Režim WCP umožňuje hydraulický transport rubaniny: výsypná klapka je vyřazena z provozu a rubanina je ze šnekového dopravníku přes drtič převáděna přímo do dopravního potrubí, které ji následně čerpá do povrchové separační stanice.

Postupem času se generace víceúčelových tunelovacích strojů vyvinula v novou třídu tunelovacích štítových — tzv. Variable Density TBM.



Obrázek 10: Vizualizace Variable density TBM

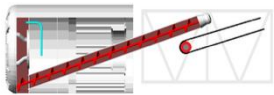
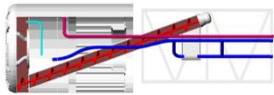
5. VARIABLE DENSITY ŠTÍTY

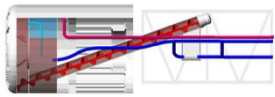
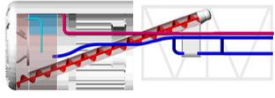
Pokud bychom hledali odpověď na otázku, kam dospěl technologicky vývoj tunelovacích štítů za uplynulých dvě stě let, nejtrefnější odpovědí by byl Variable Density TBM (v češtině *neexistuje odpovídající ekvivalent názvu stroje, dal by se použít výraz štít do proměnlivých podmínek*). Jedná se o stroj, který je bez výraznějších konstrukčních úprav schopen razit ve čtyřech různých režimech a je tak schopen podle potřeby kombinovat principy zeminového i bentonitového štítu. Své pojmenování štít získal podle toho, že je v závislosti na zastižených geologických podmínkách schopen razit s různým typem a různou hustotou podpůrného média, jak je uvedeno v tabulce 4.

První Variable Density TBM byl použit pro 9,5 km dlouhý podzemní úsek první linky projektu Klang Valley MRT v oblasti Greater Kuala Lumpur. Geologická stavba vápence Kuala Lumpur je komplikovaná kvůli vysoce nepravidelným krasovým jevům, které se vyznačují zvětralými vápencovými horninami pod vrstvou nadloží. Pro celkovou délku 8,6 km bylo společností nasazeno celkem šest Variable Density TBM o průměru \varnothing 6,62 m. Stroje během dvouleté doby výstavby prokázaly, že jsou úkolu plně schopné, a připravily cestu pro současné projekty zahrnující ražbu v mimořádně náročných nespevněných horninách.

V roce 2016 byl Variable Density TBM použit při výstavbě prodloužení linky Shatin to Central Link (SCL) hongkongského metra. Mezi další projekty, na kterých byly Variable Density TBM nasazeny, patří například linka B lyonského metra, vysokorychlostní železnice High Speed Two v Londýně, rozšíření tunelu Hampton Roads Bridge–Tunnel ve Spojených státech nebo linka 4 metra v Riu de Janeiro. Dá se očekávat, že seznam takových projektů bude v následujících letech dynamicky narůstat.

Tabulka 4: Čtyři různé režimy ražby v rámci Variable Density TBM

Konfigurace štítu	Pracovní režim	Podpůrné médium	Způsob těžby rubaniny
	Režim zeminového štítu	Upravená zemina (rubanina)	Pasovy dopravník
	Režim zeminového štítu s přídatnou podporou bentonitem	Upravená zemina s bentonitovou suspenzí	Potrubí

	Režim bentonitového štítu se suspenzí vysoké hustoty	Vysoko viskózní suspenze	Potrubí
	Režim bentonitového štítu se suspenzí nízké hustoty	Nízko viskózní suspenze	Potrubí

6. ZÁVĚR

Tunelovací štít, který byl původně vynalezen jako nouzové řešení do prostředí, kde tehdejší postupy výstavby tunelu selhávaly, se v uplynulých dvou stoletích rozvinul v jednu z nejvíce světově používaných tunelovacích metod. Vyvíjely se různé způsoby podpory čelby a ruku v ruce s tím se vyvíjely i konstrukce tunelovacích strojů. Dosavadní vývoj dospěl v konstrukci Variable Density TBM, jehož prostřednictvím získávají tuneláři výkonný nástroj, který v podstatě využívá nebo do určité míry kombinuje všechny dosud známé metody zajištění čelby. Díky tomu je schopen razit v širokém spektru zemin i hornin, včetně prostředí smíšené čelby. Je pak na samotných tunelářích, aby věděli, jak tento nástroj využít: aby rozuměli tomu, který typ podpůrného média je vhodný pro dané geologické podmínky, a aby si byli vědomi všech omezení spojených s každým konkrétním typem zajištění čelby. Jen tak lze tunelovací stroje používat s maximální účinností a s minimálním dopadem na okolní prostředí a konstrukce nacházející se v oblasti ovlivněné ražbou.

LITERATURA

- MCCRAY J., The 1880 Tunnel Tragedy That Claimed 20 Lives Beneath the Hudson, Hudpost, 21.7.2025.
- Tells How It Feels to Go Up In A Geyser, New York Times, 21.2.1916
- EDWARDS C., MERRILL K., Baltimore Metro Northeast Extension, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1995
- Recognizing the bentonite machine, Tunnels & Tunnelling, BTS, 1/2019
- BRIERLEY G.S., Pressurized Face Tunnelling: A Historical Perspective, Tunnel Business Magazine, 8/2015
- HERRENKNECHT M., Innovations in Mechanized Tunnelling since 1970, Muir Wood Lecture 2019, International tunnelling and underground space association 4/2019
- Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines, ITA-AITES, p. 1-118, 2000
- Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines, German Tunnelling Committee (ITA-AITES), 1/2022 (revised version 8/2025)
- HERRENKNECHT M., THEWES M., BUDACH CH., The development of earth pressure shields: from the beginning to the present, Geomechanics and Tunnelling, 4/2011
- BABENDERERDE S., HOEK E., MARINOS P.G., CARDOSO A.S., EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project, Portugal, Proceedings 2005 Rapid Excavation & Tunnelling Conference, Seattle
- Recommendations for Face Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground, German Tunnelling Committee (ITA-AITES), 2016
- CHEN X.J., FANG P.P., CHEN Q.N., HU J., YAO K., LIU Y., Influence of cutterhead opening ratio on soil arching effect and face stability during tunnelling through non-uniform soils, Underground Space vol. 17, pages 45 – 59, 8/2024
- BÄPPLER K., BATTISTONI F., BURGER W., Variable Density TBM – Combining Two Soft Ground Technologies, Tunnel Business Magazine, 3/2018

Petr Hybský

Pracoviště: Gall Zeidler Consultants

E-mail adresa: phybsky@gzconsultants.com

Vojtech Gall

Pracoviště: Gall Zeidler Consultants
E-mail adresa: vgall@gzconsultants.com

Alfredo Valdivia
Pracoviště: WSP
E-mail adresa: alfredo.valdivia@wsp.com

Peter Griesbach
Pracoviště: Herrenknecht AG
E-mail adresa: griesbach.peter@herrenknecht.de