



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MODERNÍ TRENDY V RAŽBĚ TUNELŮ POMOCÍ TBM

MODERN TRENDS IN TUNNEL EXCAVATION USING TBM (TUNNEL BORING MACHINE)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Hlaváček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Josef Hlaváček**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy v ražbě tunelů pomocí TBM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

TBM ražba je zkratka pro "Tunnel Boring Machine" (tunelovací vrtná souprava), což je speciální stroj používaný k ražbě tunelů. TBM je navržena tak, aby mechanicky a kontinuálně razil tunel v pevných horninách, zeminách nebo jiných materiálech. Tento typ ražby nahrazuje tradiční metody ražby, jako je ruční ražba nebo vrtání, a umožňuje rychlejší, efektivnější a bezpečnější výstavbu tunelů.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v dané oblasti problematiky.
Vytvoření souhrnných podmínek pro použití TBM ražby.
Porovnání použití TBM metody ve světě a u nás.
Predikce vývoje TBM ražebné metody.

Seznam doporučené literatury:

ZHENG, Y.L., Q.B. ZHANG a J. ZHAO. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. Tunnelling and Underground Space Technology [online]. 2016, 57, 287-299 [cit. 2023-10-04]. ISSN 08867798. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2016.01.023.

WANG, Hongtao, Changkuan ZHOU, Qingquan BI, Hao ZHU, Ziwei DING a Chenchen ZHANG. Adaptive Modification of TBM Tunneling in Coal Mine Roadway and Disaster Control Technology for Complex Geological Conditions. Processes [online]. 2023, 11(5) [cit. 2023-10-08]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr11051389.

ZHAO, Jia-Li, Xian-Yong ZHU, Cheng JIANG, Song YANG a Xiong XIAO. Rock

Adaptability of TBM Variable Cross-section Cutter Ring Based on Finite Element Simulation. Rock Mechanics and Rock Engineering [online]. 2023, 56(5), 3621-3639 [cit. 2023-10-08]. ISSN 0723-2632. Dostupné z: doi:10.1007/s00603-023-03245-y.

DENG, Long-Chuan, Fu-Bing ZHANG, Xiao-Zhao LI, Chi ZHANG, Yu-Kun JI a Yun WU.
Experimental and Numerical Investigations on Rock Breaking of TBM Disc Cutter Based on a
Novel Platform with Rotational Cutting. Rock Mechanics and Rock Engineering [online].
2023, 56(2), 1415-1436 [cit. 2023-10-08]. ISSN 0723-2632. Dostupné z: doi:10.1007/s00603-022-
03147-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o současné technologii razicích strojů TBM, a o moderních trendech vznikajících v této oblasti. První část je věnována obecnému popisu TBM a historii jejich vzniku. V další části se práce věnuje jednotlivým typům TBM, popisuje způsob, jakým pracují a kde a za jakých podmínek mohou být využity. Pozornost je rovněž věnována srovnání těchto strojů na základě jejich rozdělení podle typu prostředí, do něhož jsou určeny, a zároveň jsou tyto stroje porovnány s jinými metodami ražby tunelů. Následně je v práci rozebráno použití technologie TBM jednak ve světovém měřítku a jednak v rámci České republiky. Práce se dále věnuje četnosti použití TBM v těžebním průmyslu a jeho možnému potenciálu v tomto odvětví. Poslední část je zaměřena na nejnovější vývoj technologií strojů TBM a možnou budoucnost v tomto směru.

KLÍČOVÁ SLOVA

TBM, ražba tunelů, hloubení tunelů, těžba, moderní technologie

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the current technology of Tunnel Boring Machines (TBM) and with the modern trends emerging in this focus area. The first part is devoted to a general description of TBM and the history of their development. The next part of the thesis deals with the different types of TBM and describes the way how they work and where and under what conditions they can be applied. The focus is also given to the comparison of these machines, distributed based on the environment they are designed for. These machines are as well compared with other tunnel boring methods. Subsequently, the application of TBM technology is analysed both on a global scale and within the Czech Republic. The thesis also discusses the frequency of TBM use in the mining industry and its possible potential in this branch. The last part is focused on the recent and possible future development of TBM.

KEYWORDS

TBM, tunnelling, tunnel excavation, mining, modern technologies

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAVÁČEK, Josef. *Moderní trendy v ražbě tunelů pomocí TBM* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157700>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Zeizinger.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Zeizingera, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Josef Hlaváček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Lukáši Zeizingerovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a doporučení. Dále chci poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod	11
1 Tunnel Boring Machines	12
1.1 Historie	13
1.2 Základní části TBM	14
1.2.1 Systém hloubení	14
1.2.2 Tlačný a upínací systém	14
1.2.3 Systém pro odvoz vytěženého materiálu	14
1.2.4 Systém podpor	14
1.3 Výhody a nevýhody TBM	15
2 Typy strojů	16
2.1 TBM do pevné skály	16
2.1.1 Zachycovací TBM (Gripper TBM)	16
2.1.2 Krytý TBM (Single Shield TBM)	17
2.1.3 Dvouštíťový TBM (Double-Shield TBM)	18
2.2 TBM do měkké půdy	20
2.2.1 TBM vyvážené tlakem půdy (EPB – Earth Pressure Balance TBM)	20
2.2.2 Kalový TBM (Slurry Shield TBM) a Razicí stroj se smíšeným krytem (Mixshield TBM)	21
2.2.3 Mechanický TBM	23
2.3 Další typy TBM	23
2.3.1 Duální TBM	23
2.3.2 Mikro TBM	23
3 Podmínky pro užití TBM	24
3.1 TBM v porovnání konvenčními metodami	25
3.2 Metoda Drill & Blast	25
3.3 Roadheader	25
4 Použití TBM v ČR a ve světě	27
5 TBM v těžebním průmyslu	29
6 Současný vývoj	32
6.1 Rychlost	32
6.2 IIOT	33
6.3 Automatizace TBM	33
6.4 Ražba pomocí plazmy nebo plynu	34
6.5 Adaptivní ražba	34
6.6 Kontinuální ražba	35
7 Predikce vývoje	36
7.1 Predikce vývoje v oblasti rychlosti strojů do pevné skály	36
7.2 Predikce vývoje v oblasti rychlosti strojů do měkké půdy	36
7.3 Predikce vývoje v dalších oblastech	37



Závěr	39
Použité informační zdroje	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	43

ÚVOD

S rostoucí urbanizací a stále narůstající populací dochází ke zvětšování měst, a tím i úbytku prostor, které by mohly být využity pro stavbu pozemních komunikací či železničních tratí. Fungující doprava je nezbytná pro současnou společnost, která je z velké části založena na pohodlném, rychlém a efektivním transportu, ať už lidí či zboží. A jelikož ubývá místa na povrchu, a ne všechen zbývající prostor splňuje požadavky kladené dobou, doprava se postupně přesouvá do podzemí.

Stavba rozsáhlejších tunelů je v současnosti časově velice náročný projekt, při jehož realizaci se nejedná pouze o samotnou ražbu, nýbrž i podrobný terénní průzkum oblasti, v níž budou razicí práce probíhat. V podloží nepanují vždy ideální podmínky a z tohoto důvodu musí být razicí stroje vždy co nejlépe přizpůsobeny jeho stavu. Moderní technologie umožňují těmto strojům postupovat během ražby stále rychleji a efektivněji, a zároveň být velmi flexibilními a umět si poradit s nejrůznějšími a často se měnícími půdními podmínkami.

Kromě ceny jsou právě rychlost, efektivita a flexibilita důležitými faktory, které hrají významnou roli při volbě razicí technologie, která bude použita během stavby. Nejpoužívanější metodou současnosti jsou razicí stroje TBM, v jejichž případě se v podstatě jedná o pojízdné továrny, stavící za sebou tunel. Při hloubení dlouhých tunelů jsou tyto stroje jasnou volbou, neboť nejlépe splňují výše zmíněná kritéria.

Cílem této práce je shrnout současnou technologii strojů TBM, uvést informace o moderních trendech v tomto odvětví a na základě získaných informací provést predikci možného vývoje těchto strojů.

1 TUNNEL BORING MACHINES

TBM (z anglického Tunnel Boring Machine) je stroj pro hloubení tunelů kruhového průřezu, jehož použití je možné prakticky v jakýchkoliv typech podloží, ať už se jedná například o horniny nebo písek. V minulosti se ražba tunelů prováděla primárně metodou Drill & Blast, avšak s příchodem TBM se vše změnilo. Stroj je schopen vytvářet hladké stěny a zároveň ponechává okolní prostředí relativně neporušené, což výrazně snižuje celkové náklady na stavbu. Současně je ražba pomocí TBM velice výhodná i z časového hlediska. Jedinou nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady na pořízení stroje. [1]

Jedná se o nejběžnější způsob ražby tunelů v současnosti, a to navzdory tomu, že TBM je poměrně novou technologií. První úspěšné tunelovací stroje určené pro ražbu ve skále byly vynalezeny až v 50. letech 20. století a do konce 60. let se většina tunelů hloubila pomocí jiných razících metod. S postupem let se TBM neustále zdokonalovaly a byly stále častější volbou pro ražbu tunelů v nejrůznějších geologických podmínkách. Moderní TBM fungují jako samostatné podzemní továrny, které prorážejí skálu a za sebou stavějí tunel. [2]

V současnosti existuje řada různých typů TBM, avšak všechny sdílejí několik základních vlastností. V přední části stroje se nachází rotující řezná hlava kruhového průřezu, která hloubí čelní stěnu tunelu. Vytěžený materiál (tzv. rubanina), prochází otvory v řezné hlavě a následně je odvážen z tunelu na povrch pomocí systému dopravníkových pásů. K postupu používá stroj velké hydraulické písty, které se opírají buď o vyhloubenou stěnu tunelu, nebo o prefabrikované obložení, které se umísťuje na vnitřní stěnu vyhloubené části tunelu. [2]

Vývoj TBM se ubíral dvěma paralelními cestami. První cesta vedla k vývoji strojů pro ražbu tunelů v hlíně a obecně měkkém podloží, druhá mířila ke strojům určeným do hornin. Dnes se oba typy řadí do kategorie TBM a rozdíl mezi nimi nejsou příliš znatelné, avšak jejich vývoj probíhal odděleně a každý z nich měl za úkol vyřešit jiné problémy. V měkkém podloží bylo hloubení poměrně snadné. Hlavním úkolem bylo zabránit zborcení tunelu, případně jeho zatopení kvůli přítomnosti podzemních vod. Naproti tomu stěny tunelu hloubeného ve skále se mohly samy během ražby dočasně udržet. Klíčové ovšem bylo vyvinout stroj dostatečně silný na to, aby byl schopen prorazit skálu. [2]

V minulosti byla většina TBM vyvinuta pro realizaci konkrétního projektu. Ranné úspěchy byly zajištěny především díky tomu, že se pro ražbu tunelů vybíral terén, který bylo obzvláště snadné prorazit. Použití TBM vyžadovalo disponovat mnohem větším množstvím informací o zemině, než bylo nutno při ražbě za pomoci odstřelů. Mnoho strojů se tak často nedokázalo vypořádat s proměnlivými podmínkami (například nedovedli provádět ražbu skrze hlínu a zároveň v hornině). [2]

Postupným vývojem však byly TBM stále schopnější provádět ražbu v široké škále půdních podmínek, což vedlo k častému stírání hranic mezi stroji určenými do měkkého podloží, a stroji do hornin. V současnosti prakticky neexistují terénní podmínky, s nimiž by si TBM nedovedlo poradit. [2]

TBM byly rovněž vyvinuty tak, aby zvládly více velikostních variant tunelů. Maximální velikosti postupem času rostly a v dnešní době dosahuje TBM největšího průměru téměř osmnáct metrů. Vývoj šel ovšem i opačným směrem. Současní výrobci produkují stroje určené pro ražbu malých tunelů, z nichž nejmenší má průměr pouhých šest desetin metru. [2]

Technologický pokrok rovněž umožnil, aby byla ražba pomocí TBM stále rychlejší. Zatímco první stroje dosahovaly rychlosti okolo čtyř metrů za týden, v současnosti jsou TBM určené do hornin schopny vyhloubit více jak sedm set metrů za týden, a TBM určené do měkké půdy přes dvě stě metrů za týden. Je však nutno podotknout, že rychlost ražby z nemalé části závisí na velikosti stroje. Obecně platí, že čím je TBM větší, tím pomaleji tuneluje. [2]

1.1 HISTORIE

První tunelovací stroj navrhl v 19. století francouzský inženýr Marc Brunel. Jednalo se v podstatě o zelený štít ve tvaru obdélníku, určený do měkkého podloží, který poskytoval ochranné prostory pro dělníky. Tato konstrukce byla známá jako hornická klec nebo tunelovací štít. Každý tunelář se nacházel v jedné z řady buněk, které konstrukce obsahovala, a odtud pomocí krumpáčů a lopat vykopával zeminu před sebou. Poté, co všichni dělníci vykopali několik centimetrů, se celá konstrukce posunula kupředu a práce znovu započaly. Tato technologie byla použita při stavbě prvního podvodního tunelu na světě, který vede pod Temží v Londýně. Samotná stavba započala v roce 1825 a byla dokončena roku 1843. [3]

Brunelův návrh rozpracoval inženýr William Henry Barlow, z jehož myšlenek později vycházel jeho učeň James Henry Greathead, který do výstavby tunelů zavedl řadu nových inovací. Greathead používal místo cihel prefabrikované litinové ostění, což výrazně zrychlilo celkovou výstavbu tunelu. Tato rychlost se později ještě navýšila, když vyvinul mechanický systém pro instalaci výše zmíněného ostění. Mezi ostěním a stěnami tunelu vznikali mezery, které Greathead vyplňoval maltou. Za tímto účelem vynalezl „injektační pánev“ která proces vyplňování mezer značně usnadňovala. Veškeré principy zavedené Greatheadem jsou dodnes standardně využívány při stavbě tunelů. [2]

Až do roku 1876 se vlastní hloubení tunelů provádělo ručně pomocí krumpáčů a lopat. V tomto roce byl poprvé patentován štít s mechanickým hloubícím zařízením. Nicméně první úspěšný stroj tohoto typu navrhl v roce 1896 John Price a postupem let jej stále zdokonaloval. Jeho vylepšený stroj se skládal z rotujícího disku vybaveného lžícovitými frézami, které byly upevněné po obvodu válcového štítu. Jak se disk otáčel, frézy seškrabávaly půdu, která se následně přiváděla na dopravník, odkud se odvážela ven. Priceovy štíty byly nejen rychlejší než nemechanizované štíty, ale také vyžadovaly méně práce. Tyto stroje se na dalších padesát let staly standardem při hloubení tunelů v měkkých půdách a jsou předchůdci moderních TBM do měkké půdy. [2]

Tunelovací štít Marca Brunela a jeho pozdější vylepšení však nebyly uzpůsobeny pro ražbu v tvrdých horninách. Tento problém byl vyřešen v roce 1851, kdy byl představen Wilsonův patentní stroj na řezání kamene. Tento stroj dokázal v pevné žulové skále vyříznout 33 centimetrů široký prstenec o průměru asi osm metrů. Po proniknutí do skály byl stroj odstraněn a horníci poté odstřelovali horninu zevnitř prstence. Wilsonův patentovaný stroj na řezání kamene si razil cestu skálou pomocí válečkových fréz, které jsou velmi podobné těm, které používají moderní TBM. [4]

Vývoj tunelovacích strojů pro ražbu v tvrdých skalách se ukázal jako příliš nákladný a řada společností při experimentech v této oblasti zkrachovala. Ražba tunelů se na dlouhou dobu vrátila k metodě Drill & Blast. Vše se změnilo až v 50. letech 20. století, kdy James S. Robbins vynalezl první moderní TBM, který byl určen pro projekt přehrady Oahe v Jižní

Dakotě ve Spojených státech amerických. Jeho konstrukce a experimenty daly vzniknout dvěma koncepcím TBM, na jejichž základě byly vynalezeny všechny dnešní stroje TBM. [4]

1.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI TBM

TBM jsou obvykle vyráběny v ocelovém, válcovém štítu, který je uvnitř vybaven zařízením pro hloubení tunelu a montáž betonových segmentů ostění tunelu. Do základního vybavení patří rotační řezná hlava, která slouží k samotnému hloubení. Dále tyto stroje disponují hydraulickými tlačnými písty, které zajišťují jednak tlak na řeznou hlavu, a zároveň slouží k pohybu stroje kupředu. Mezi základní systémy se řadí i zařízení pro přepravu rubaniny ven z vyhloubené části tunelu. V zadní části stroje se nachází vakuový erektor, který je určen k instalaci betonového ostění tunelu. Jelikož mezi ostěním a stěnou tunelu vznikají dutiny, jsou TBM vybaveny injektážním zařízením, které slouží k jejich vyplnění. [5]

1.2.1 SYSTÉM HLOUBENÍ

Systém hloubení je základním prvkem celého stroje, jelikož určuje jeho účinnost. Skládá se z řezné hlavy, na níž jsou přidělané kotoučové frézy. Během otáčení řezné hlavy by mělo být nastavení kotoučových fréz takové, aby se celá řezná plocha dostala do soustředných drah. Rotující řezná hlava vyvíjí vysoký tlak na čelbu tunelu prostřednictvím kotoučových fréz, čímž vzniká řezný pohyb. Výběr řezné hlavy a kotoučových fréz závisí především na typu geologického podloží, s nímž se bude TBM během ražby potýkat. [6]

1.2.2 TLAČNÝ A UPÍNACÍ SYSTÉM

Tlačný a upínací systém ovlivňuje rychlost postupu TBM. Tlačný systém je zodpovědný za proces hloubení, jelikož zajišťuje tlak na řeznou hlavu prostřednictvím hydraulických válců, a ve výsledku tak řídí pohyb řezné hlavy. Upínací systém omezuje možný tah a odolává reakčním silám vznikajícím během ražby. [6]

1.2.3 SYSTÉM PRO ODVOZ VYTĚŽENÉHO MATERIÁLU

Otvory umístěné na obvodu řezné hlavy se nazývají řezné lžíce. Řezné lžíce shromažďují vytěžený materiál a přivádějí jej na dopravní pásy, které rubaninu následně vyvázejí na povrch. Tento systém je navržen tak, aby nenarušoval zásobování TBM a jeho základní podpůrné systémy. Správné fungování celého systému pro odvoz vytěženého materiálu je velice důležité pro provoz TBM. Jakmile se stroj setká s většími kusy horniny, může to vést k nemalým problémům. [6]

1.2.4 SYSTÉM PODPOR

Během ražby může dojít k zapadnutí TBM v důsledku zhroucení stěn či čelby tunelu. Aby se předešlo případným nehodám, využívají tyto stroje systém podpor, který stabilizuje vyhloubenou část tunelu. Například ražba v křehkých horninách je velmi náročná, neboť s rostoucím průměrem tunelu se zvyšuje nebezpečí zapadnutí stroje. U tunelů s menším průměrem se podpěry umísťují pouze okolo zadní části stroje, kdežto u tunelů s větším průměrem se navíc používají podpory v přední části, jako například takzvané skalní šrouby (kotevní šrouby) nebo výztuž pomocí metody deštníkového oblouku (UAM – umbrella arch method), která pro podporu stěn využívá ocelové trubky umístěvané na stěnu tunelu. Pokud se TBM dostane do poruchové zóny, jako ochrana před zhroucením by se měly nad, nebo před řeznou hlavou používat šrouby, trubky, injektáž malty či zmrazení zeminy. Avšak

mnohem užitečnější podporu v poruchových zónách poskytuje válcový štít, který chrání pracovníky za řeznou hlavou. [6]

1.3 VÝHODY A NEVÝHODY TBM

Mezi výhody strojů TBM, ve srovnání s tradičními metodami hloubení tunelů, patří především to, že při jejich použití dochází k mnohem menšímu poškození prostředí, v němž probíhá ražba, a to s daleko menšími nároky na podporu stěn tunelu. Dále zajišťují téměř kontinuální stavbu, která probíhá mnohem rychleji a při níž je zajištěno daleko větší bezpečí pro pracovníky. [6]

K nevýhodám patří především vysoké počáteční náklady na pořízení stroje, což je spojeno i s náklady na dopravení stroje na místo stavby. Pro použití TBM je dále nutné provést důkladný geologický průzkum prostředí, v němž bude probíhat ražba. Dále je nutné investovat spoustu času pro návrh a výrobu požadovaného stroje. TBM je rovněž omezeno při zatáčení, a to zvláště v zatáčkách s malým poloměrem, jelikož je velmi obtížné otáčet celou soupravou TBM. [6]

2 TYPY STROJŮ

Základní rozdělení TBM je založeno na geologických podmínkách, pro které je stroj určen. Podle tohoto předpokladu dělíme TBM na dva typy, a to sice stroje do pevné skály (anglicky Hard rock machines) a stroje do měkké půdy (anglicky Soft ground machines). [7]

TBM můžeme dále rozdělit podle toho, zda se jedná o otevřený typ, či o uzavřený typ. Otevřené typy jsou vhodné do stabilních hornin a při jejich použití není vyhloubená stěna podepřena betonovým ostěním, ale místo toho se používají skalní svorníky, kruhové nosníky, drátěné pletivo nebo stříkaný beton. Tyto stroje mají přímo za řeznou hlavou otevřený prostor určený právě pro instalaci podpor stěn tunelu. Pohybují se pomocí zachycovacích čelistí, se kterými se opírají o vyhloubené stěny tunelu. Uzavřené typy (někdy označované jako štítové) jsou vhodné do nestabilních prostředí, ve kterých se stěny tunelu nedovedou udržet bez toho, aniž by byly podepřeny betonovým ostěním. TBM tohoto typu využívají k postupu vpřed tlačné písky, s nimiž se opírají o dříve instalované betonové ostění tunelu. [8]

2.1 TBM DO PEVNÉ SKÁLY

Ražba tunelů v pevné skále obvykle znamená těžbu v hornině, která je zdravá a pevná. V takovýchto případech se používá kategorie otevřených typů TBM. Nicméně se vyskytují i nestabilní horniny, do kterých jsou vhodné uzavřené TBM. [5]

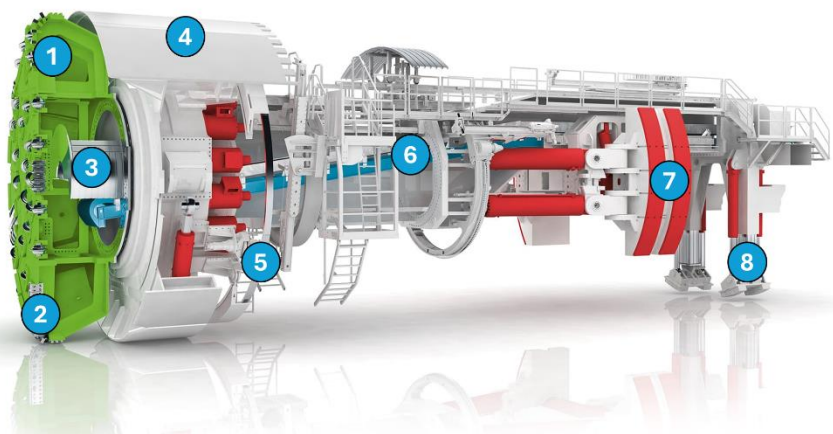
2.1.1 ZACHYCOVACÍ TBM (GRIPPER TBM)

Zachycovací TBM obecně používá pro hloubení tunelů kotoučové frézy. Kupředu se pohybuje pomocí tzv. gripperů, neboli zachycovacích jednotek, které se opírají o stěnu tunelu. Tento typ disponuje mobilními částečnými štíty, což mu umožňuje být flexibilní i ve vysokotlakých horninách. To je užitečné při hloubení tunelu v expanzivní hornině, aby se předešlo zaseknutí stroje. [7]

Základním prvkem zachycovacího TBM jsou zachycovací desky případně zachycovací čelisti (anglicky gripper plates, gripper shoes), z nichž vychází název tohoto stroje. Před zahájením ražby se zachycovací čelisti opřou o dříve vyhloubenou stěnu tunelu. Následně se přítlačné písky zapřou o zachycovací jednotku a tlačí řeznou hlavu proti čelbě tunelu. Několik částečných teleskopických štítů stabilizuje TBM během ražby. Tyto štíty dále zabraňují vibracím a snižují tak opotřebení. Střešní štít chrání dělníky a stroj před možným pádem horniny. Vlivem valivého pohybu řezné hlavy a vlivem tlaku působícího na frézovací kotouče umístěné na řezné hlavě se odlamují jednotlivé kusy horniny. Na řezné hlavě jsou navíc umístěny vodní trysky, které minimalizují vznik prachu a zároveň chladí frézovací nástroje. Zabudovaný systém senzorů hlídá opotřebení frézovacích nástrojů, což usnadňuje plánování jejich výměny. Vytěžený materiál nabírají lžíce umístěné na řezné hlavě. Díky otáčení řezné hlavy se rubanina dostane do středu stroje skrze integrované žlaby na vytěžený materiál a poté propadne trychtýřovitým prstencem na dopravníkový pás. Systém pásových dopravníků nebo transportní vozy nakonec vyvezou vytěžený materiál ven z tunelu. Jakmile se řezná hlava vysune na maximální délku, ražba se přeruší a zachycovací jednotka se posune vpřed. [9]

Zachycovací jednotka rovněž pomáhá řídit TBM. Hlavní část stroje se pomocí hydraulických pístů zachycovacích jednotek může pohybovat vertikálně i horizontálně. Protilehlé písky působí na hlavní nosník různým tlakem, což vytváří pozvolné pohyby. [9]

V ideálním případě provádí zachycovací TBM ražbu skrze dokonale pevnou skálu a vytváří za sebou precizně vyhloubený profil. Avšak když těžba probíhá v křehkých horninách, stěny tunelu musí být dodatečně stabilizovány. V oblasti předního štítu je možné instalovat dočasné podpory horniny. Přímo za střešní štít lze umístit skalní šrouby nebo ocelové sítě, které slouží jako ochrana před zhroucením stěn tunelu. K zajištění tunelu se rovněž používají ocelové kruhové nosníky, které se sestavují přímo pod střešním štítem. Kompletní nosník se poté přesune na místo instalace, zapře se o skálu a namontuje. Podpory horniny jsou klíčovým faktorem pro rychlost postupu TBM. [9]



Obr. 1 Zachycovací TBM – (1) Řezná hlava; (2) Lžíce; (3) Trychtýřovitý prstenec na vytěžený materiál; (4) Střešní štít; (5) Erektor pro kruhové ocelové nosníky; (6) Dopravníkový pás; (7) Zachycovací čelisti; (8) Spodní podpěry [9]

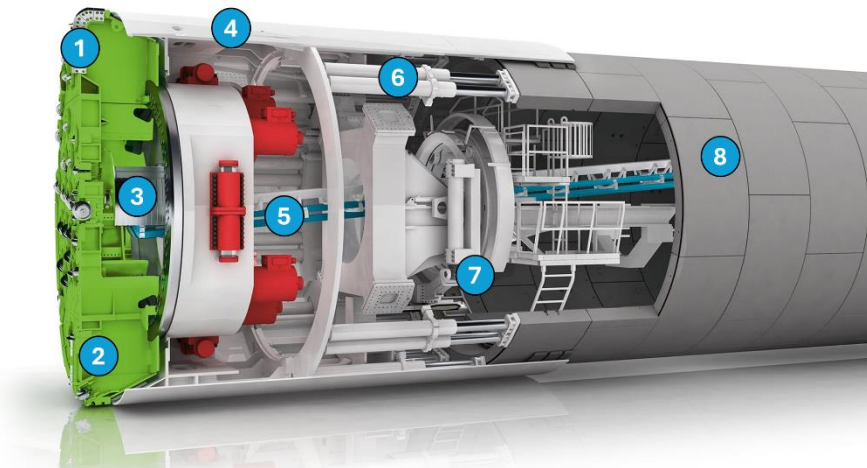
2.1.2 KRYTÝ TBM (SINGLE SHIELD TBM)

Kryté TBM jsou vhodné pro ražbu tunelů ve skalách a jiných stabilních půdách, v nichž se nevyskytuje podzemní voda. Avšak i v případě, že dojde k výskytu podzemních vod, mohou být použity, pokud dojde k úpravě půdy. Díky svým vlastnostem rovněž poskytují optimální bezpečnost i při ražbě v křehkých a nestabilních horninách. [10]

TBM s ochranným štítem do tvrdých hornin mají průměr výkopu větší, než je průměr štítu. Kromě toho je osa hloubení řezné hlavy o něco výše než osa stroje. Toto převýšení umožňuje ovládání stroje a zároveň jej chrání před zaseknutím ve skále. Ve štítu jsou integrovány hydraulické stabilizační desky, které lze opřít o dříve vyhloubenou část tunelu, což snižuje vibrace a stabilizuje stroj během ražby. [10]

Proces ražby probíhá tak, že frézovací kotouče na řezné hlavě jsou vysokým tlakem přitlačovány na čelbu tunelu. Vlivem valivého pohybu řezné hlavy a frézovacích nástrojů dochází k odlamování kusů skály z čelby tunelu. Vodní trysky, které jsou zabudované v řezné hlavě, zajišťují chlazení frézovacích nástrojů a zároveň snižují tvorbu prachu. Vytěžený materiál nabírají lžíce umístěné na řezné hlavě, které jej přes odpadní žlaby dopravují do trychtýřovitého prstence na vytěžený materiál. Odtud je rubanina vyvedena na pásový dopravník a poté předána na pásový systém nebo na dopravní stroje, které ji vyvázejí ven z tunelu. Aby TBM mohlo postupovat dopředu, využívá hydraulických tlačných pístů

umístěných po celém obvodu štítu, které jej tlačí od dříve postaveného betonového ostění. Toto betonové prstencové ostění je složeno z několika segmentů, k jejichž správnému umístění slouží tzv. erektor, což je dálkově ovládaný, vakuový manipulátor. K ovládání směru stroje se používají buď pevně zabudované řídicí jednotky s řídicími písty, nebo pohyblivé řídicí jednotky s kloubovými ložisky, nebo písty s torzní skříní a přídavné písty s podélným posunem. U všech typů řídicích jednotek lze řeznou hlavu zasunout dozadu, což umožňuje dělníkům přímý přístup k čelbě tunelu, a mohou tak snadno vyměnit opotřebované frézovací kotouče. [10]

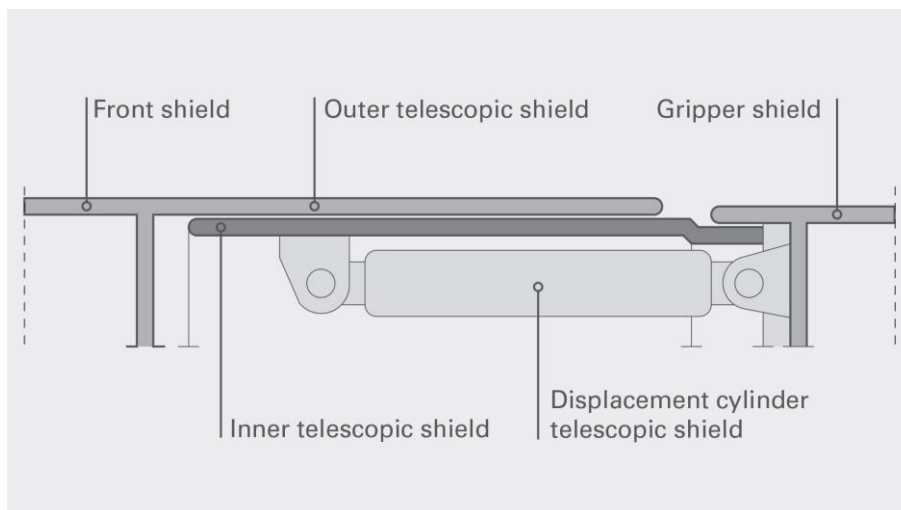


Obr. 2 Krytý TBM – (1) Lžice, (2) Řezná hlava; (3) Trychtýřovitý prstenec na vytěžený materiál; (4) Štít; (5) Dopravníkový pás; (6) Tlačné písty; (7) Erektor; (8) Betonové ostění [10]

2.1.3 DVOUŠTÍTOVÝ TBM (DOUBLE-SHIELD TBM)

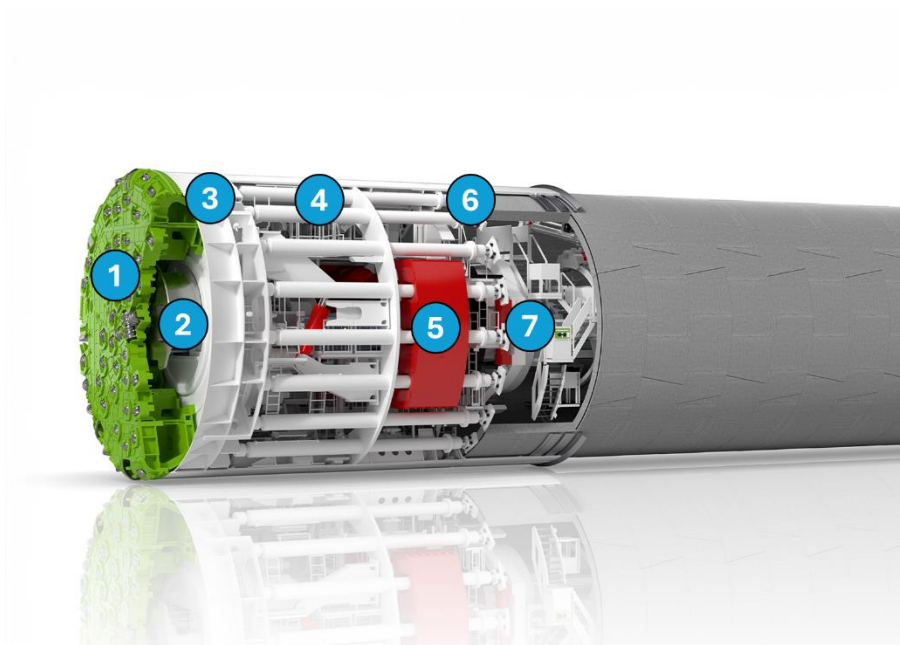
Dvouštítový TBM patří k technicky nejvyspělejším strojům pro ražbu tunelů. V tomto stroji jsou sjednoceny funkční principy zachycovacího a krytého TBM. Kombinace těchto metod umožňuje při stabilních geologických podmínkách pokládat betonové segmenty tunelového prstence souběžně s ražbou, díky čemuž je dosaženo vysokých výkonů. Z tohoto důvodu je dvouštítový TBM vhodný pro ražbu dlouhých tunelů v tvrdých horninách, a to jak do stabilních, tak i nestabilních prostředí. [11]

Dvouštítový TBM se skládá ze dvou hlavních částí: přední štít a zachycovací štít. Tyto dva štíty jsou spojeny hlavními tlačnými písty v místě, kde dochází k jejich překrývání. Překrývajícím se částem štítů se říká vnitřní a vnější teleskopický štít. Díky této konstrukci může být přední štít vysunut nezávisle na zachycovacím štítu právě za pomoci hlavních tlačných pístů. Během ražby vznikají reakční síly (kroutící moment a podélné síly), které jsou skrze zachycovací čelisti, které se nacházejí na zachycovacím štítu, přesunuty do skály. Právě díky separaci těchto sil mohou být během ražby položeny betonové segmenty tunelového prstence, čehož nelze dosáhnout při použití konvenčních metod. Pro zajištění betonových segmentů slouží pomocné tlakové písty. Jakmile se řezná hlava vysune do maximální délky, ražba se pozastaví, uvolní se zachycovací čelisti a zachycovací štít je pomocnými tlakovými písty posunut pod přední štít. Celkový proces ražby je téměř plynulý, neboť výše zmíněná přechodová fáze trvá jen pár minut. [11]



Obr. 3 Schéma teleskopického štítu dvouštítového TBM [11]

Pokud však TBM narazí na defektní oblast, ve které není pevná skála stabilní, nemůže být výše uvedený postup proveden, jelikož zachycovací čelisti se nemají o co opřít. V takovýchto místech musí být teleskopické části štítů plně zasunuty, aby přední i zadní část stroje vytvořili kompaktní jednotku. Ve výsledku je stroj poháněn kupředu pouze pomocnými tlačnými písty, což má za následek to, že ražba a pokládání tunelového prstence nemůžou být prováděny současně. Ačkoliv je tento režim ražby nesouvislý, tak v obtížných oblastech zajišťuje vyšší bezpečnost při práci. [11]



Obr. 4 Dvouštítový TBM – (1) Řezná hlava; (2) Trychtýřovitý prstenec na vytěžený materiál; (3) Přední štít; (4) Teleskopický štít; (5) Zachycovací čelisti; (6) Zachycovací štít; (7) Erektor [11]

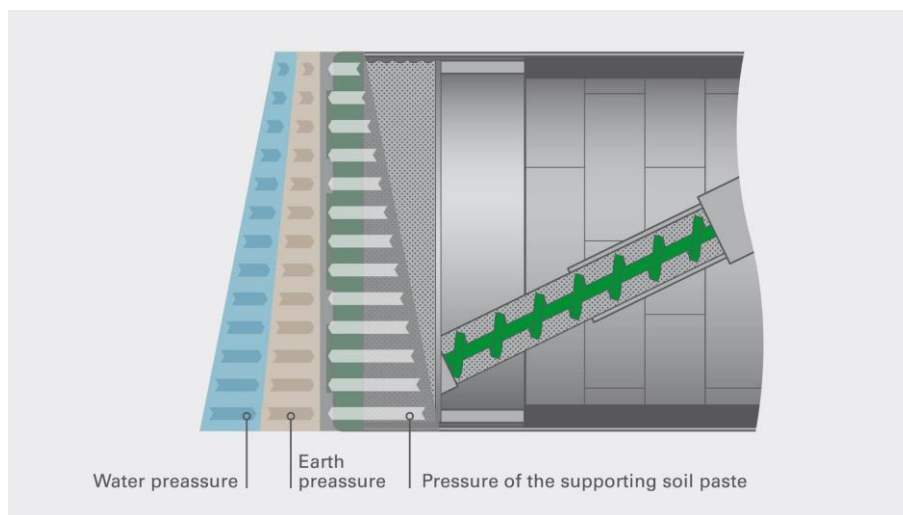
2.2 TBM DO MĚKKÉ PŮDY

Existují tři hlavní typy TBM do měkké půdy. TBM vyvážené tlakem půdy (anglicky Earth Pressure Balance – EPB), Kalový TBM (anglicky Slurry Shield) a Mechanický TBM. EPB a kalové TBM jsou vhodné do aluviální půdy, která je nestabilní a nedokáže se sama udržet. [5]

2.2.1 TBM VYVÁŽENÉ TLAKEM PŮDY (EPB – EARTH PRESSURE BALANCE TBM)

EPB TBM je vhodné používat při hloubení tunelů v nestabilních zeminách s možnou přítomností vody, jako je jíl, bahno, písek nebo štěrky. Vytěžená zemina se používá jako podpora čelby tunelu. [7] Ne všechny půdní podmínky jsou v přirozeném stavu vhodné pro ražbu za pomoci EPB TBM. Avšak přidáním aditiv do půdy, jako je například voda, bentonit či pěna, lze upravit plasticitu, texturu a propustnost vody, díky čemuž mohou tyto stroje pracovat i v prostředích s nestabilními geologickými podmínkami. [12]

Specialitou těchto strojů je, že využívají vytěženou zeminu jako nosné médium, což umožňuje vyrovnat tlakové podmínky na čelbě tunelu, zamezit vniknutí zeminy do stroje a vytvořit podmínky pro rychlou ražbu. Řezná hlava hloubí materiál, který je skrze otvory přenášen do těžební komory, nacházející se přímo za řeznou hlavou. V tomto prostoru je vytěžená zemina mísená za pomoci mísících ramen s již přítomnou zemní pastou na požadovanou strukturu. Těžební komora je od zbytku stroje oddělena tlakovou přepážkou, která přenáší tlakovou sílu na poddajnou zemní pastu. Tlak zemní pasty je kontrolován pomocí tlakových senzorů. Potřebné rovnováhy je dosaženo, jakmile se tlak zemní pasty vyrovná tlaku okolní půdy a podzemní vody. [12]

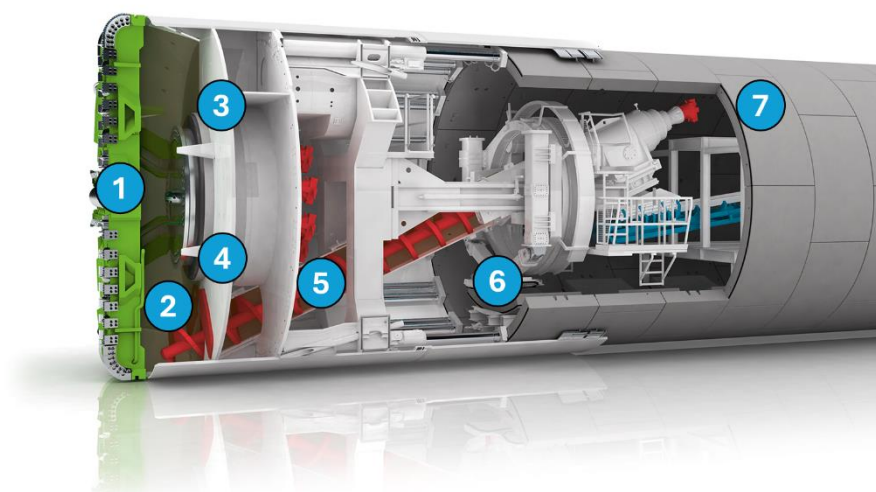


Obr. 5 Schéma působení tlaku při těžbě pomocí TBM vyvážené tlakem půdy [12]

Z těžební komory je materiál následně odvážen na pásový dopravník, a to pomocí šnekového dopravníku. Vzájemná interakce mezi průchodností šnekového dopravníku a rychlostí postupu TBM zajišťuje přesnou regulaci podpůrného tlaku zemní pasty, který je monitorován pomocí senzorů. Obsluha TBM může tímto způsobem kontrolovat všechny parametry ražby

tunelu i při měnících se geologických podmínkách, což umožňuje dosahovat vysokých výkonů a minimalizovat veškerá rizika. [12]

Proces stavby tunelu je u těchto strojů rozdělen do dvou fází: fáze ražby a fáze instalace betonového segmentového ostění tunelu. Během fáze ražby je řezná hlava hydraulickými písty přitlačována za vysokého tlaku na čelbu tunelu. Řeznou hlavu pohání přes ozubený věnec hydraulické motory. Pod vysokým tlakem uvolňují frézovací nástroje materiál na čelbě tunelu. Pokud je to nutné, lze vlastnosti půdy upravit vodou, bentonitem nebo pomocí vstříkovacích systémů umístěných na řezné hlavě. Jakmile je dokončena fáze ražby, řezná hlava se zastaví a začne fáze instalace betonového segmentového ostění. Sestavování prstence probíhá pod ochranou štítu za atmosférického tlaku. Prstence se skládají z několika segmentů, které jsou vyrobeny s milimetrovou přesností v továrně, která se nachází na povrchu a je postavena výhradně za tímto účelem. Tyto segmenty se poté dopravují na místo dopravními vozíky. Jednotlivé segmenty se instalují pomocí vakuového erektoru, který je teleskopický a může se libovolně otáčet. Na místě, kde dochází k pozicování segmentu, se hydraulické válce zasunou, a jakmile je segment nainstalován, dojde k jejich opětovnému vysunutí, čímž zajistí polohu tohoto segmentu. Jako poslední se vždy instaluje klínový segment se zúženými stranami, který rozkládá zatížení v prstenci. Po dokončení stavby betonového prstence může znovu začít fáze ražby. [12]



Obr. 6 TBM vyvážené tlakem půdy – (1) Řezná hlava; (2) Těžební komora; (3) Tlaková přepážka; (4) Mísící ramena; (5) Šnekový dopravník; (6) Erektor; (7) Ostění [12]

2.2.2 KALOVÝ TBM (SLURRY SHIELD TBM) A RAZÍCÍ STROJ SE SMÍŠENÝM KRYTEM (MIXSHIELD TBM)

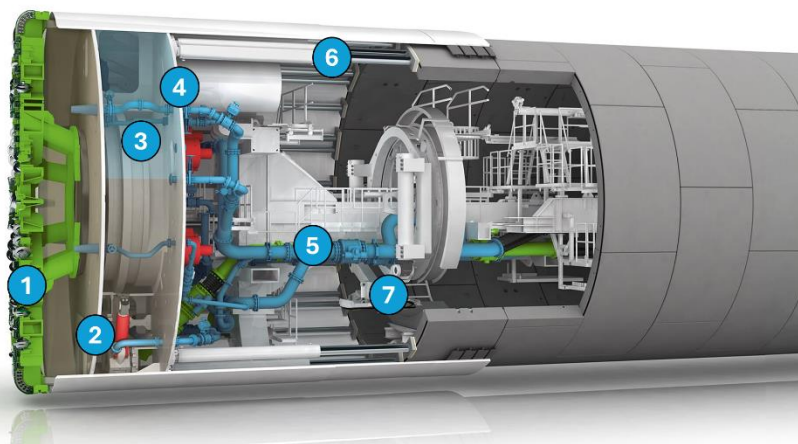
Kalové TBM se používají pro ražbu tunelů ve vysoce nestabilních a písčitéch půdách, a také v případech, kdy tunel prochází pod strukturami, které jsou vysoce senzitivní na narušení půdy. Tlaková suspenze (většinou bentonit) podporuje čelní stěnu tunelu. Podpůrný tlak je regulován přítokem a odtokem suspenze. Reologické vlastnosti suspenze musí být voleny tak, aby byly v souladu s parametry zeminy. [7] Použití kalového TBM je rovněž vhodné

v terénech s vysokým tlakem podzemní vody, například pod říčním nebo mořským dnem. K udržení stability čelby tunelu opět slouží správně namíchaná a natlakovaná suspenze. [5]

Zatímco řezná hlava slouží jako prostředek pro ražbu, suspenze (nejčastěji bentonit nebo směs vody a jílu) zajišťuje podporu čelby tunelu působením protitlaku. Tato suspenze je čerpána do těžební komory, kde se dostává k čelbě tunelu a proniká do zeminy, kde vytváří nepropustnou překážku (jemná zemina) nebo impregnovanou zónu (hrubá zemina), která zaručuje přenos protitlaku do čelby tunelu. Vytěžený materiál sestává částečně z přírodní zeminy a částečně z přidané suspenze. Tato směs je z výkopové komory čerpána do separačního zařízení umístěného na povrchu, které umožňuje recyklaci bentonitovo-jílové suspenze. [13]

Razící stroj se smíšeným krytem je variantou kalovéhoho TBM, určený pro ražbu tunelů v heterogenním prostředí a v prostředí s vysokým vodním tlakem. Charakteristickým rysem této technologie je těžební komora, která je oddělena od pracovní komory tzv. ponořenou stěnou. Těžební komora je zcela vyplněna suspenzí (zpravidla bentonit) pro plné podepření čelby tunelu během ražby. V pracovní komoře, která se nachází mezi ponořenou stěnou a tlakovou přepážkou, sahá suspenze pouze mírně nad osu stroje. [7] Obě komory jsou propojeny komunikačními trubkami prostřednictvím otvoru, který se nachází v ponořené stěně. Potřebný protitlak na řezné hlavě se vytvoří stlačením bentonitu pomocí vzduchového polštáře. Kolem řezné hlavy se následně zformuje tzv. filtrační koláč. Jedná se o téměř nepropustnou membránu, která kromě vytvoření podpůrného protitlaku slouží i jako těsnění, které zabraňuje pronikání podzemní vody skrze čelbu tunelu. Vytěžený materiál padá do těžební komory, kde se z části rozpustí v bentonitu. Vzniklá směs je potrubím čerpána na povrch do separačního zařízení, kde se vytěžený materiál oddělí od bentonitové suspenze a poté se čistá suspenze přečerpá zpět do kalovéhoho okruhu. [13]

Díky uzavřenému hydraulickému kalovému okruhu lze razící stroje se smíšeným krytem bezpečně používat i při vysokých tlacích vody přesahujících 1,5 MPa. Aby však byl stroj schopen pracovat v takovém prostředí, je nutné zajistit těsnící vrstvu mezi TBM a hloubeným terénem. Z tohoto důvodu jsou tyto stroje vybaveny vícenásobným těsnícím systémem. [13]



Obr. 7 Razící stroj se smíšeným krytem: (1) Řezná hlava; (2) Ponořená stěna; (3) Vzduchový polštář; (4) Tlaková přepážka; (5) Kalový obvod; (6) Tlačné písty; (7) Erektor [13]

2.2.3 MECHANICKÝ TBM

Mechanický typ je vybaven rotační řeznou hlavou pro kontinuální ražbu tunelu. Existují dva typy řezných hlav: jedna je kotoučová a druhá je tyčová, vystupující ze středu stroje. Kotoučová řezná hlava je vhodná pro tunely velkého průřezu, jelikož tato hlava při hloubení stabilizuje čelní stěnu tunelu. Tento typ je schopen hloubit zeminy obsahující šterk a velké kameny pomocí otvorů v disku, které jsou nastavitelné v závislosti na velikosti šterku a kamenů. Tyčový typ je často používán pro hloubení tunelů s malým průřezem, jejichž čelní stěna je relativně stabilní. Šterk a velké kameny jsou odstraňovány rotační rezačkou. [5]

Tento typ stroje, který patří do kategorie otevřených TBM, je však již v dnešní době nahrazen uzavřenými typy, což je kategorie, do které spadá EPB TBM a kalový TBM. [5]

2.3 DALŠÍ TYPY TBM

2.3.1 DUÁLNÍ TBM

Klasické TBM určené do specifického prostředí mohou narazit na své technické nebo ekonomické limity, pokud jsou použity v geologicky proměnlivém prostředí. Při stavbě dlouhých tunelů se může prostředí změnit ze stabilní horniny na měkkou, zavodněnou hlínu, což při ražbě tunelu představuje velice náročný problém. Duální TBM jsou navrženy z hlediska podpěr a razících metod tak, aby bylo možné režim ražby přizpůsobit měnícímu se prostředí. To vyžaduje relativně krátkou dobu přestavby, která probíhá přímo v hloubeném tunelu, při poměrně nízkých nákladech. [14]

Obecně existují dvě konstrukční varianty duálního TBM. Prvním typem je TBM s modulární konstrukcí. U tohoto stroje se způsob ražby mění v tunelu rozsáhlými úpravami jednotlivých komponent. Druhou variantu představuje TBM vybavené komponenty umožňujícími několik způsobů ražby, které jsou současně integrovány ve stroji. Způsob ražby lze měnit v relativně krátké době při nízkých nákladech. Tyto stroje jsou však oproti prvnímu typu z hlediska technického provedení podstatně složitější. [14]

2.3.2 MIKRO TBM

Mikrotunelování je mikro až maloplošná metoda hloubení tunelů, sloužící pro instalaci podzemního potrubí s minimálním narušením povrchu. Používá se pro výstavbu elektrických telekomunikačních kabelů, kanalizačních a odvodňovacích systémů, plynovodů, vodovodů, ropovodů a propustků. [7]

Plně automatizovaný tunelovací štít se obvykle vysouvá kupředu ze startovací šachty směrem k přijímací šachtě. Do pracovní šachty, v níž probíhá hloubení, se postupně instaluje potrubí. Velkým rozdílem mezi ostatními TBM a mikro TBM spočívá v tom, že zatímco u všech předchozích typů ostění tunelu sestávalo z betonových segmentů, u tohoto typu je instalováno ve formě celistvých trubek. Tyto trubky však vytvářejí vyšší odpor. Aby došlo k jeho snížení, vstříkuje se na jejich vnější obvod tixotropní suspenze. [7]

3 PODMÍNKY PRO UŽITÍ TBM

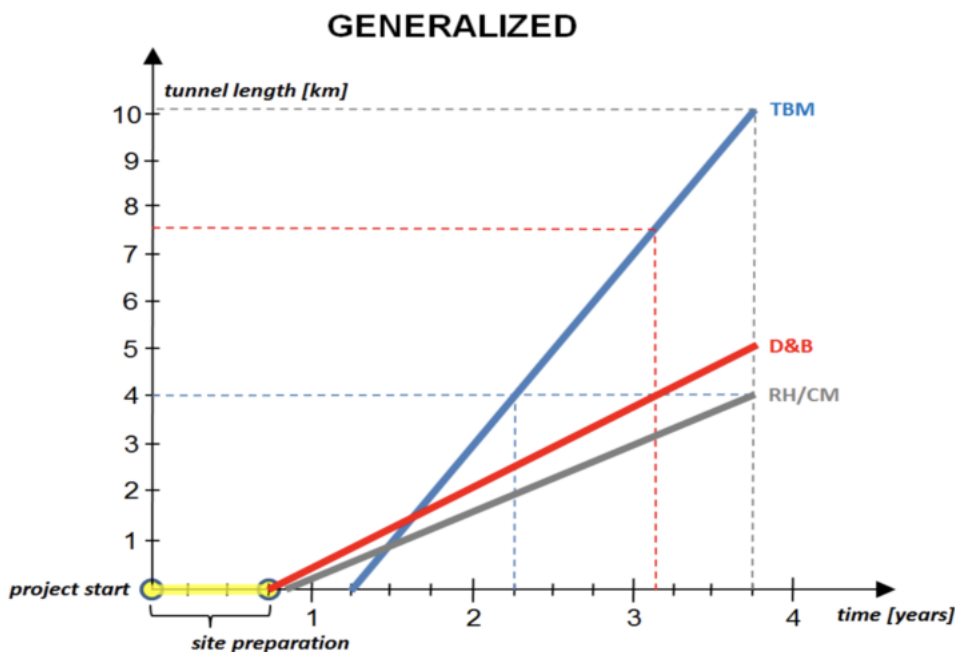
V níže předložené Tab. 1 jsou uvedeny podmínky pro použití TBM do tvrdé horniny a TBM do měkké půdy, a současně jsou mezi sebou tyto typy porovnány, a to z hlediska rozměrů tunelu, geologických podmínek a dopadů na životní prostředí. Zároveň je zde technologie TBM srovnána s technologií Drill & Blast (metoda vrtání a odstřelů). [5]

Tab. 1 Porovnání metod hloubení tunelů [5]

Podmínky		TBM		Drill & Blast
		Do tvrdé horniny	Do měkké půdy	
Vlastnosti tunelu	Délka tunelu	Cena tohoto zařízení je zpravidla vysoká, proto je vhodné jej použít při stavbě dlouhých tunelů.	Cena tohoto zařízení je zpravidla vysoká, proto je vhodné jej použít při stavbě dlouhých tunelů.	Cena vybavení je zpravidla nízká. Cena hloubení není příliš ovlivněna délkou tunelu.
	Tvar průřezu	Tvar průřezu je kruhový. Po dokončení ražby je možné pozměnit tvar pomocí metody Drill & Blast v důsledku rozšíření.	Tvar průřezu je kruhový. Půlkruh, vícekruh, ovál atd. je možné vytvořit při použití speciálních hloubících strojů.	Tvar průřezu je v podstatě obloukovitý v koruně. Tvar sekce může být změněn během stavby.
	Velikost průřezu	Do 14 m v průměru.	Do 16 m v průměru.	Obecně je možné použít při průřezu nad 150 m ² .
Geologické podmínky	Tvrdá hornina	Vhodné	Neaplikovatelné	Vhodné
	Polotvrdá hornina	Vhodné	Neaplikovatelné	Vhodné
	Nestabilní podloží	Nevhodné v oblastech s neustále nestabilním podložím nebo neustálým přítokem vody.	Použitelné	Pro použití je třeba přijmout řadu krajních opatření
	Zemina	Neaplikovatelné	Vhodné	Neaplikovatelné
Podmínky životního prostředí	Vibrace a hluk	Ve srovnání s metodou Drill & Blast je tato metoda méně hlučná a způsobuje menší vibrace budovám a důležitým objektům.	Tato metoda je oproti ostatním nejméně hlučná a způsobuje nejmenší vibrace budovám a důležitým objektům.	Kvůli hluku a vibracím není užití této metody vhodné v blízkosti budov a důležitých objektů. Ke snížení hluku a vibrací je nutná doplňková metoda.

3.1 TBM V POROVNÁNÍ KONVENČNÍMI METODAMI

Na základě dlouholetého výzkumu firmy Robbins bylo prokázáno, že stroje TBM při stavbě rozsáhlejších projektů překonávají konvenční metody jako je Drill & Blast nebo ražba pomocí strojů Roadheader. I když je zde určitá daň v podobě delší doby realizace a vyšších počátečních nákladů, rychlost TBM při stavbě dlouhých tunelů z něho činí jasného vítěze. Níže uvedený zobecněný graf platí pro většinu tunelů hloubených pomocí TBM ve srovnání s tunely hloubenými konvenčními metodami. Z něho můžeme vidět, že výhoda strojů TBM je zjevná, jakmile tunel dosáhne délky 2 kilometry. [15]



Obr. 8 Zobecněný graf srovnávající metodu TBM s konvenčními metodami [15]

3.2 METODA DRILL & BLAST

Před nástupem TBM byla metoda Drill & Blast primárním způsobem ražby tunelů. Jedná se o metodu, která pro ražbu používá střelný prach. Proces hloubení Drill & Blast je následující: Do skály se vyvrtají díry (v dnešní době je vyvrtávání děr řízeno pomocí počítačových systémů), které se naplní trhavinami a následně je provedena exploze. Po výbuchu se skála zřítí a vzniklá suť se odstraní, načež se přistoupí ke zpevnění povrchu tunelu. Navzdory převaze TBM je tato metoda neustále používána, a to zejména při stavbě kratších tunelů (jak je uvedeno ve výše předložené Tab. 1), kdy se TBM z ekonomického hlediska nevyplatí. [16]

3.3 ROADHEADER

Roadheader je typ těžebního zařízení s řeznou hlavou namontovanou na rameni. Roadheader je posazen na pásovém podvozku a je vybaven dopravníkovým systémem pro odvoz

materiálu. Největší typy těchto strojů lze použít k prořezávání tvrdých hornin s vysokou pevností v tlaku. Současné Roadheadery jsou navrženy tak, aby dokázaly pracovat v různých geologických podmínkách. Výhodou této metody hloubení je přesná kontrola výkopu, jelikož vzdálenost mezi obsluhou stroje a čelbou tunelu je jen několik metrů, což umožňuje pracovníkovi rychle reagovat na změnu geologie. [17]



Obr. 9 Roadheader [2]

4 POUŽITÍ TBM V ČR A VE SVĚTĚ

V současnosti se celosvětově investuje do rozšiřování a modernizace infrastruktury a rovněž je snaha zlepšit dopravní sítě, jejichž stavba je často velice úzce provázaná s technologií TBM. Ve srovnání s ostatními technologiemi je TBM účinnější a nákladově výhodnější metodou ražby tunelů, což z ní činí preferovanou volbu pro rozsáhlé projekty, jako je například stavba metra, dálnice či vodovodních systémů. V posledních letech poptávka po TBM prudce vzrostla v asijsko-pacifickém regionu a na Středním východě, kde probíhá rychlá urbanizace a rozvoj infrastruktury. [18]

Právě Asijsko-pacifický region má největší podíl na trhu s TBM. Země jako Čína a Indie podnikají v této oblasti řadu iniciativ na podporu rozsáhlých projektů stavby tunelů na železnicích a dálnicích, v důsledku nárůstu počtu obyvatel, rychlé urbanizace a silného ekonomického růstu. Například společnost Mumbai Metro Rail Corporation použila TBM na projekt výstavby 33.5 Metro III. Kromě toho se mnoho výrobců v tomto regionu zaměřuje na vývoj moderních tunelovacích strojů, aby podpořili růst trhu v této oblasti. [19]

Významnou roli v rostoucím využívání technologie TBM hrají environmentální aspekty a urbanistické plánování. Mnoho měst se potýká s dopravními problémy a se stále narůstajícím znečištěním, což vede úřady k investicím do městské hromadné dopravy, jako je například metro. Technologie TBM je šetrná k životnímu prostředí, protože minimalizuje narušení povrchu a snižuje hlučnost při stavbě tunelu. Kromě toho TBM umožňují vytvářet podzemní prostory pro technickou infrastrukturu, kanalizační systémy a skladovací zařízení, což může pomoci optimalizovat využití půdy v hustě obydlených městských oblastech. [18]

Modernizaci zažívá v posledních letech i stárnoucí infrastruktura Severní Ameriky a Evropy. Rovněž zde roste potřeba zlepšit dopravu uvnitř měst a mezi nimi. Kromě toho dochází i k modernizaci a rozšiřování zařízení pro zásobování vodou a čištění odpadních vod. TBM jsou pro tyto projekty preferovány díky své efektivitě, rychlosti a schopnosti minimálně narušit stávající infrastrukturu. [19]

Na Evropském trhu se nachází řada významných společností produkujících efektivní a spolehlivé stroje TBM. Za své vyspělé a neustále se vyvíjející technologie vděčí především hospodářskému růstu a četným investicím do infrastrukturních projektů v Evropě. Například německá firma Herrenknecht vyvinula TBM o průměru téměř šestnáct metrů, který byl použit při stavbě tunelu Sparvo, ležící na dálnici Variante di Valico v Itálii. Tato firma se rovněž podílela na stavbě Gotthardského úpatního tunelu ve Švýcarsku, nejdelšího železničního tunelu na světě, který byl postaven zachycovacím TBM. Dále kupříkladu společnosti NFM Technologies, Ferrovia Agroman, Laing O'Rourke, Herrenknecht a Lovat vyvinuly šest strojů TBM pro stavbu britského tunelu Thames Tideway. [19]

Taktéž Severní Amerika je v současnosti dějištěm mnoha staveb pomocí TBM. V USA probíhá výstavba mnohých tunelů na dálnicích, železnicích a u vodohospodářských systémů. Například v roce 2017 byl ve Spojených státech amerických ve státě Indiana zahájen projekt výstavby tunelu s cílem snížit přetékání kanalizace do vodních toků v této oblasti. Účelem tohoto tunelu bylo dopravit odpadní vody z kanalizace do čistírny odpadních vod. Stroje TBM byly dále použity u významných projektů jako je tunel State Rout 99 v Seattlu, tunel Hampton Roads Bridge a tunel Thimble Shoal. Z dalších projektů je významný například mexický tunel Emisor Oriente, tunel pro čištění odpadních vod, který byl vybudován stroji TBM typu EPB, dodané firmou Herrenknecht. [19]

Dnešní doba se stále častěji zaměřuje na mikro-tunelování, tedy stavbu malých tunelů pomocí TBM, jejichž průměr se může pohybovat od 0,6 do 1,5 metrů. Čína a Japonsko vyvinuly technologii mikro-tunelování pro minimální narušení povrchu při hloubení trasy potrubí pod řekou, vozovkou nebo železniční tratí. Ze staveb provedených pomocí mikro TBM lze jmenovat například Kanadský projekt Gore Road. Jedná se o sanitární kanalizační potrubí zhotovené stroji vyvinutými společností Ward and Burke Construction Ltd. [19]

K největším výrobcům TBM současnosti patří například čínské firmy CRCHI, CREG a Dalian Huarui Heavy Indus, německá firma Herrenknecht, japonské firmy Hitachi Zosen Corporation, IHI Corporation, Kawasaki Heavy Industries a Komatsu, nebo americká společnost The Robbins Company. [19]

Ačkoliv je v současnosti TBM dominantní technologií pro ražbu tunelů ve světě, v České republice byla plnohodnotná verze této metody použita poprvé v roce 2011 při stavbě prodloužení úseku pražského metra na trase A, přičemž TBM bylo použito na vyhloubení trasy mezi stanicemi Dejvická a Petřiny. Stavbu zajišťovala česká firma Metrostav a dva stroje TBM typu EPB dodala německá firma Herrenknecht.[20] Podruhé byla technologie TBM v České republice použita při stavbě železničního tunelu v Ejpovicích v letech 2013 až 2018. Stavbu opět zajišťovala česká firma Metrostav a stroj, stejně jako v předchozím případě, pocházel od německé firmy Herrenknecht. [21]



Obr. 10 TBM Viktorie použitá při stavbě železničního tunelu v Ejpovicích [22]

5 TBM V TĚŽEBNÍM PRŮMYSLU

Povrchová ložiska v dnešní době již prakticky neexistují a těžba surovin se celosvětově přesouvá stále hlouběji pod zem. V důsledku toho roste potřeba delších přístupových tunelů a mechanizovaných tunelovacích metod pro jejich ražbu. Zatímco se TBM již mnoho let používají v civilních projektech, jejich potenciál v těžebním průmyslu zůstává z velké části nevyužit. [15]

Použití technologie TBM v těžebním průmyslu není v současnosti příliš časté, a na rozdíl od její aplikace ve stavebnictví, nezaznamenává na tomto poli příliš veliké úspěchy. Dosud bylo provedeno přibližně 100 pokusů v přibližně 60 dolech a pouze několik málo z nich je považováno za úspěšné. Historický vrchol použití TBM v hornictví nastal v 70. letech 20. století, kdy byly realizovány desítky projektů s cílem prověřit použitelnost těchto strojů v těžebním průmyslu. Ovšem od této doby došlo k drastickému snížení takovýchto pokusů, a to zejména v uhelných dolech. V důsledku rozvoje technologií pro povrchovou těžbu se od roku 1985 použilo TBM v uhelných dolech pouze dvakrát. Avšak po roce 2000 začaly stroje TBM v hornictví znovu nabírat na síle. [23]

Obecně lze říci, že konvenční těžební průmysl v sobě zahrnuje těžbu kovových rud, těžbu uhlí a těžbu v lomech. Stroje TBM lze použít k přístupu do podzemních ložisek rud nebo k jejich průzkumu. Nekonvenční těžba, jako je třeba těžba břidlicového plynu, zemního plynu a ropy, zahrnuje výrazně odlišné techniky a obvykle k ražbě tunelů TBM nepotřebuje. [23]

Na rozdíl od civilních projektů, které se uskutečňují v menších hloubkách s relativně homogenním půdním prostředím, dochází při ražbě v těžebním průmyslu k interakci s výrazně složitějšími geologickými podmínkami. Vzhledem k tomu se předpokládá, že ražba tunelů v dolech, zvláště pak pomocí TBM, bude daleko obtížnější. Kromě rozdílů v geologii se ražba tunelů v dolech a v civilních projektech liší například i v mnohem náročnějším provedení důkladného geologického průzkumu oblasti, nebo v náročné přípravě staveniště a zajištění logistiky. [23]

Pro těžbu v uhelných a kovových dolech se nejčastěji používají TBM do pevné skály, zejména pak otevřený typ zachycovacího TBM. Naproti tomu TBM vyvážené tlakem půdy a kalové TBM, tedy stroje patřící do kategorie TBM určených do měkké půdy, které existují již čtyři desetiletí, nebyli dlouhou dobu v těžebním průmyslu použity. Poprvé byli nasazeni až v roce 2013, kdy byl v australském uhelném dole Grosvenor úspěšně použit duální TBM, kombinující v sobě vlastnosti technologie EPB a technologie do pevné skály. [23]

Vzhledem k tomu, že těžba pomocí TBM v dolech v tvrdých horninách měla v 60. a 70. letech 20. století experimentální charakter a technologie TBM byla v té době v počátečním stádiu, měly první TBM v tomto odvětví malé průměry a pokusy se omezovaly pouze na krátké tunely v řádech stovek metrů. Lepších výsledků bylo dosaženo od 90. let 20. století. K nevýznamnějším úspěchům na tomto poli patří americký důl Stillwater PGM (důl, v němž se těží kovy platinové skupiny, do které se řadí šest ušlechtilých kovů, a to sice platina, ruthenium, rhodium, palladium, osmium a iridium), kde byl vybudován přes deset kilometrů dlouhý tunel. Dalším významným projektem byl měděný důl San Manuel, nacházející se rovněž ve Spojených státech amerických, kde byl vybudován přes dvanáct kilometrů dlouhý tunel. [23]

Při těžbě v tvrdých horninách dochází k řadě problémů. K těm hlavním, s nimiž se stroje TBM setkávají, patří slabé podloží (např. pískovec, slínovec nebo břidlice), které způsobuje nestabilitu čelby tunelu, což může mít za následek její zhroucení. Ve velkých hloubkách se v ložiscích vyskytuje vysoké napětí. Těžba porušuje rovnovážný stav napětí, což v konečném důsledku vede k trhání a odlamování horniny a k sesouvání na čelbě a na stěnách výkopu. TBM mohou během ražby narazit i na tzv. blokové podloží. Jedná se o označení pro rozsáhlé vylomení, odtržení nebo vybočení horniny z čelby tunelu nebo z bočních stěn, výsledkem čehož může být zablokování rezné hlavy nebo štítu, či rozsáhlé poškození fréz na rezné hlavě. Mezi další problémy, s nimiž se stroje potýkají, se řadí teplo, prach, opotřebení fréz na rezné hlavě a poruchy dopravních pásů. [23]

Těžba pomocí TBM v uhelných dolech byla ve srovnání s těžbou v tvrdých horninách mnohem úspěšnější. Většina ražeb se uskutečnila v 70. a 80. letech 20. století. Zemí, která nejvíce získala z těžby v uhelných dolech pomocí TBM je Německo. Právě zde proběhlo v roce 1970 první úspěšné použití TBM při těžbě v dnes již bývalých uhelných dolech Minister Stein a Schelklingen. V letech 1970 až 1986 bylo v německých uhelných dolech vyvrtáno více než sto kilometrů štol. Avšak aplikace strojů TBM v uhelných dolech zaznamenala v letech 1985 až 2000 útlum a pomalu se začala vracet až počátkem dvacátého prvního století. Nejnovějším uhelným dolem, v němž byla tato technologie v letech 2013 až 2014 použita, je australský uhelný důl Grosvenor. [23]

Stroje TBM se při těžbě v uhelných dolech setkávají s obdobnými problémy, jako stroje těžící v tvrdých horninách. Nicméně existuje řada jiných obtíží, s nimiž se musí TBM vypořádat. Po nestabilních horninách je pro TBM při těžbě uhlí druhým největším nebezpečím přítomnost podzemní vody, která může způsobit nemalé škody. Dobrým příkladem je událost, která se přihodila v německém uhelném dolu Franz Haniel, kdy došlo k provalení velikého množství podzemní vody a bahna, které zatlačili razicí stroj o čtrnáct metrů zpět, což vedlo k velkým ztrátám v nákladech a v časovém plánu. V uhelných dolech taktéž hrozí nebezpečí výskytu toxických, výbušných a dusivých plynů, které jsou často příčinou smrtelných úrazů. [23]

Těžba pomocí TBM disponuje oproti konvenčním metodám řadou výhod. Jednou z nich je mnohem bezpečnější pracovní prostředí, které během ražby tyto stroje poskytují. Stroje TBM jsou schopny instalovat jakýkoliv typ zemní podpory, kterou lze instalovat s běžnými metodami hloubení. Na rozdíl od nich však pracovníci obsluhující TBM pracují z chráněného prostoru, který se nachází v bezpečné vzdálenosti od čelby tunelu. Ražba pomocí TBM taktéž probíhá bez použití výbušnin, což činí tuto metodu zásadně bezpečnější. Zařízení spojená s ražbou pomocí strojů TBM zároveň produkují méně emisí, což vede k lepší kvalitě ovzduší na pracovišti a menším nárokům na ventilaci. K dalším výhodám patří hladký, kruhovitý profil, který stroje TBM vytvářejí, na rozdíl od konvenčních metod, při jejichž použití vznikají nerovnoměrné profily. Hladký profil snižuje potřebu údržby dokončeného tunelu a také množství potřebných zemních podpor během ražby tunelu. Pokud je v tunelu použito segmentové ostění, množství potřebné údržby je minimální. [15]

S těžebním průmyslem dlouhá léta spolupracuje firma The Robbins Company. Již se stroji používanými v 70. a 80. letech minulého století slavila firma úspěchy, avšak moderní TBM jsou v porovnání s ranými stroji daleko výkonnější a efektivnější. Pro ukázkou posunu technologie v průběhu let slouží níže uvedená Tab. 2, porovnávající zachycovací TBM (tedy stroje, které jsou v těžebním průmyslu nejčastěji používané) zhotovené firmou Robbins mezi lety 1971 a 2011. [15]

Tab. 2 Porovnání zachycovacích TBM zhotovených firmou Robbins mezi lety 1971 a 2011 [15], [24]

Místo a rok začátku stavby	Měděný důl White Pine, rok 1971	Důlní tunel San Manuel, rok 1993	Malý Calumetský tunel, rok 2003	Pahang-Selangorský tunel na surovou vodu, rok 2010	Platinový a palladiový důl Stillwater, rok 2011
Délka tunelu	1,783 km	10,5 km	12,8 km	44,6 km	6,975 km
Typ TBM	Zachycovací	Zachycovací	Zachycovací	Zachycovací	Zachycovací
Průměr TBM	5,49 m	4,6 m	5,56 m	5,23 m	5,49 m
Průměr frézovacích disků	280 mm	432 mm	483 mm	483 mm	483 mm
Výkon řezné hlavy	895 kW	1 260 kW	2 350 kW	2 310 kW	1 968 kW
Kroutící moment řezné hlavy	2 333 kNm	2 970 kNm	1 883 kNm	4 054 kNm	3 095 kNm
Tah stroje	7 031 kN	8 558 kN	9 101 kN	14 000 kN	10 898 kN
Průměrná rychlost hloubení	1 m/h	1 m/h	4,85 m/h	3,5 m/h	4,8 m/h



Obr. 11 Zachycovací TBM použití v dole Stillwater v roce 2011 [15]

6 SOUČASNÝ VÝVOJ

S rostoucími požadavky na cenovou dostupnost, spolehlivost a přesnost, prošly tunelovací stroje v posledních letech řadou inovací. Těžký průmysl jako celek prochází digitální transformací a TBM nejsou v tomto ohledu výjimkou. Zatímco základy těchto strojů se od svého vzniku nezměnily, nejnovější stroje jsou, na rozdíl od svých předchůdců, mnohem výkonnější a technologicky rozmanitější. [25]

Mnoho současných inženýrů, vědců a podnikatelů zároveň věří, že budoucnost tunelování spočívá ve zvýšení rychlosti strojů a v celkovém snížení nákladů výstavby tunelů. Například zakladatel společností Tesla a SpaceX Elon Musk je přesvědčen, že v budoucnu se kvůli zvyšující se hustotě osídlení a nedostatku místa pro stavbu nadzemních silnic a železnic, veškerá doprava přesune pod zem. Takové systémy by však vyžadovaly rozsáhlé tunelování, avšak současná technologie TBM je na takovéto projekty podle Muska příliš pomalá. Z tohoto důvodu založil Musk společnost The Boring Company, ve které se snaží zvýšit výkon razících strojů TBM. Jiné společnosti věnující se výrobě a vývoji TBM se pokouší zvýšit rychlost ražby tím, že odstraní nutnost zastavení stroje při instalaci segmentového ostění. Toto zastavení zapříčiňuje největší časové ztráty při ražbě tunelu. [4]

6.1 RYCHLOST

Díky technologickému pokroku se rychlost, s jakou stroje TBM provádějí ražbu, postupně zvyšuje. V současnosti dosahují TBM do pevné skály rychlosti přes 700 metrů za týden a stroje do měkké půdy přes 200 metrů za týden. [2]



Obr. 12 TBM Prufrock – zahájení těžby [26]

Velkým průkopníkem v této oblasti je společnost The Boring Company, kterou v roce 2016 založil Elon Musk s cílem výrazně zvýšit rychlost ražby tunelů. Původně společnost používala TBM „Godot“ postavený firmou Lovat. V současnosti již používají svůj vlastní TBM typu EPB s názvem „Prufrock“. [2] Prufrock je navržen tak, aby se po dokončení tunelu vynořil na povrch. V praxi to znamená, že stroj zahajuje ražbu tunelu přímo z povrchu, díky čemuž odpadá nutnost hloubit nákladné jámy pro spuštění a vyzvednutí stroje. Prufrock tak může začít ražbu do 48 hodin po příjezdu na staveniště. Tento TBM je schopen tunelovat

rychlostí větší než 1,6 kilometru za týden, což je šestkrát rychleji než předchozí generace TBM Godot+. Cílem společnosti je, aby TBM Prufrock překonal jednu desetinu rychlosti lidské chůze, tedy podle jejich tvrzení přibližně 11,3 km za den, což zhruba odpovídá 80 000 metrů za týden (jinými slovy, cílem společnosti The Boring Company je vytvořit stroj, který je přibližně 100krát rychlejší, než nejrychlejší TBM současnosti). Vyšší rychlosti zajišťuje zvýšení výkonu při současném zlepšení chladících systémů. Dále je to průběžná ražba, kdy instalace betonových segmentů probíhá současně s hloubením tunelu, a tím pádem eliminuje nutnost zastavovat stroj, což je u současných TBM do měkké půdy standardem. [26]

6.2 IIOT

IIOT (průmyslový internet věcí – dále již jen IIOT) je technologie, spočívající v propojení mnoha senzorů, které poskytují přístup k datům získaným v reálném čase pro přesnější a efektivnější provoz. TBM využívají tuto technologii hned několika způsoby. Sensory u strojů sledují provozní ukazatele, jako je rychlost otáčení rezné hlavy, teplota stroje, točivý moment a celková rychlost ražby. Vzhledem k tomu, že data jsou poskytována v reálném čase, mají pracovníci k dispozici mnohem lepší informace, s nimiž mohou pracovat, a zároveň jsou schopni rychleji reagovat v nebezpečných situacích. Dalším klíčovým využitím IIOT je prediktivní údržba TBM. Získaná data slouží k předvídání poruch stroje, což umožňuje technikům opravit vzniklé problémy, dokud jsou ještě malé. V důsledku toho se snižují náklady i celková doba údržby. [25]

Společnost Herrenknecht nedávno vyvinula novou platformu IIOT pro sběr a správu dat z bezdrátových senzorů a jejich ukládání do centrální databáze v cloudu. Tato platforma podporuje více jak 2 000 TBM, z nichž až 700 může být v jednom okamžiku v terénu. Data se ukládají do počítačů v řídicí místnosti TBM a do cloudu se nahrávají, jakmile je k dispozici připojení k internetu – vzhledem k tomu, že stroje pracují 10-15 km pod zemí, mohou být offline několik dní, týdnů nebo dokonce měsíců. [27]

6.3 AUTOMATIZACE TBM

V posledních letech se při ražbě tunelů stále více uplatňuje automatizace, čemuž velmi napomáhá technologie IIOT. Data získaná prostřednictvím senzorů značně usnadňují automatizovaným programům řízení TBM. Díky tomu obsluha stroje nevyžaduje žádný, případně pouze minimální lidský zásah. U automatizovaných strojů je méně pravděpodobné, že se dopustí nákladných chyb, jelikož pracují pouze na základě dat. Rovněž se při jejich použití zvyšuje bezpečnost práce, protože snižují dobu, kterou je potřeba strávit v tunelu. Automatizace navíc kompenzuje nedostatek pracovních sil. Mezi další prvky automatizace patří ražba bez řidiče. V současnosti není automatické řízení ještě natolik spolehlivé, aby mohlo být použito u osobních automobilů, avšak stroje TBM se na rozdíl od nich pohybují po poměrně přímé trase, na níž v podstatě nenarazí na žádné překážky. Na základě toho jsou dnešní algoritmy strojového učení dostatečně schopné, aby mohli řídit stroje TBM. [25]

První autonomní tunelovací stroj na světě (A-TBM) vyvinula malajsijská infrastrukturní společnost MMC-Gamuda. Jako testovací zařízení použila druhou linku v projektu hromadné

dopravy v Kuala Lumpur. Společnost zpočátku testovala technologii pouze na jednom stroji. Nakonec bylo 10 z 12 TBM použitých při stavbě tohoto projektu, vybaveno novým systémem A-TBM. Společnost uvedla, že dalším krokem ve vývoji bude analýza dat získaných během ražby, která poslouží systému k tomu, aby program mohl provádět předpovědi, které přinesou lepší a efektivnější řešení ražby. [27]

6.4 RAŽBA POMOCÍ PLAZMY NEBO PLYNU

V porovnání s konvenčními metodami ražby jsou mechanické zařízení jako je TBM mnohem účinnější a nákladově efektivnější. Avšak i s touto metodou stále přetrvává problém, kdy musí dojít k fyzickému kontaktu stroje s čelbou tunelu. Někteří výrobci proto začínají místo dosud užívaných frézovacích kotoučů instalovat na stroje TBM plynové nebo plazmové frézy. Použití těchto vysokoteplotních fréz zabráňuje fyzickému kontaktu stroje se zemí, čímž se minimalizují vibrace, odpor a točivý moment. Díky tomu vzniká u TBM mnohem menší množství poruch, snižuje se nutnost oprav a ve výsledku se snižují náklady. Plynové a plazmové frézy rovněž pracují rychleji než klasické frézovací kotouče, což opět vede ke snížení nákladů. [25]

Sanfranciská startupová společnost Earthgrid vyvíjí plazmové mikro TBM pro energetický trh a technickou infrastrukturu, který, na základě jejich tvrzení, dokáže razit tunely až stokrát rychleji než konvenční metody. Plazmové hořáky tohoto stroje dosahují teploty 27 000 °C, aby byly schopny prorazit tvrdou horninu. Hořáky odtrhávají úlomky horniny, které se následně shromažďují v malých tlačných vozících. [27]

Americký startup Petra vyvinul autonomního robota s názvem Swifty, který dokáže hloubit malé tunely o průměru 40 cm až 1,5 m v tvrdé hornině a skvěle se tak uplatní v technické infrastruktuře. Robot Swifty používá k ražbě tunelů patentovanou směs přehřátého plynu o teplotě až 1 800 °C. [27]

6.5 ADAPTIVNÍ RAŽBA

Tunelovací stroje se během stavby často potýkají s proměnlivými geologickými podmínkami. U některých tunelů se kvůli jejich konečnému účelu musí zmenšit nebo zvětšit průměr. V minulosti měli tyto problémy za následek to, že se v určité oblasti museli tunelářské práce přerušit a následně docházelo k výměně stávajícího vybavení. Moderní TBM se však mohou bez dlouhých přestaveb přizpůsobit proměnlivému prostředí či různým požadavkům na velikost tunelu. Přizpůsobivost strojů má různé formy. Některé stroje jsou modulární a umožňují pracovníkům měnit razicí vybavení namísto úplné výměny stroje. Tyto úpravy v sobě zahrnují i změnu frézovacích mechanismů z těch, které jsou určeny do tvrdé skály za ty, které jsou vhodné do měkké půdy, a naopak, nebo změnu z menšího na větší průměr či z většího průměru na menší. Přizpůsobivost může taktéž vycházet z dat, která získává IIOT. Senzory mohou v reálném čase detekovat změny terénních podmínek a v reakci na to systém automaticky upraví rychlost vrtání nebo točivý moment. [25]

Americká společnost Robbins prohlásila, že jako první v oboru změnila průměr TBM při stavbě osm kilometrů dlouhého odvodňovacího tunelu Mill Creek v Texasu. Tunel má dva průměry, protože v určité části se u něho zvýšily požadavky na průtok.

V důsledku toho byl TBM navržen tak, aby se jeho průměr změnil z 11,6 m na 9,9 m. Společnost Robbins spolupracovala s firmou Southland Mole, aby nejprve navrhla kompletní menší stroj a teprve poté vyrobila soupravu, která fungovala jako větší druhý plášť. V okamžiku, kdy se měl zmenšit průměr TBM, tak se během čtyř měsíců sundal svrchní plášť stroje. [27]

6.6 KONTINUÁLNÍ RAŽBA

Během hloubení tunelu se po vykopání určitého úseku musela ražba vždy přerušit, kvůli výstavbě betonového ostění. Společnost Herrenknecht ovšem vyvinula metodu, která umožňuje kontinuální ražbu tunelů v měkkém podloží. Nový systém je oproti stávajícím metodám 1,6krát rychlejší. Princip spočívá v tom, že hydraulické tlačné písty, které posunují stroj kupředu, přebírají během postupu část síly z pístů, které jsou zatažené kvůli stavbě ostění. Aby bylo zajištěno, že stroj během tohoto procesu udrží správný směr, počítačem řízený systém přebírá od dělníků kontrolu tlaků v tlačných pístech.[27]

7 PREDIKCE VÝVOJE

Současný vývoj strojů TBM se především ubírá směrem zvýšení rychlosti ražby. Aby bylo dosaženo tohoto cíle, tak výrobci, mimo jiné, produkují stroje se stále vyšším výkonem. Avšak výkon nelze zvyšovat do nekonečna. Mnohem důležitější je vyřešit problém kontinuální ražby, kterému se v dnešní době věnuje nemalá pozornost. Kvůli instalaci ostění tunelu nemůže většina současných strojů provádět ražbu kontinuálně. Právě zde dochází k jednomu z největších časových ztrát, vznikajících během ražby. V této době dokážou tento problém do jisté míry vyřešit dvouštitové TBM, které jsou určeny pouze do pevných hornin.

7.1 PREDIKCE VÝVOJE V OBLASTI RYCHLOSTI STROJŮ DO PEVNÉ SKÁLY

Dnešní TBM do pevné skály dosahují rychlosti ražby 700 metrů za týden. Pokud se však podíváme na některé projekty v minulosti, zjistíme, že stroje byly tuto rychlost schopny vyvinout již na počátku 21. století. Z toho vyplývá, že za posledních dvacet let nedošlo v této oblasti k žádnému pokroku. [24]

To se však může velmi brzy změnit, jelikož v nedávné době představila startupová společnost Earthgrid mikro TBM, které k ražbě využívá plazmové frézy, které by měli najít uplatnění především v prostředí hornin. Podle tvrzení společnosti, poskytuje tato metoda až 100krát vyšší rychlost ražby než dosud užívané konvenční metody. Lze předpokládat, že při takovém úspěchu, budou vysokoteplotní plazmové frézy v brzké době instalovány i na klasické stroje TBM, což značně přispěje ke zvýšení jejich rychlosti ražby. Není však zcela pravděpodobné, že výsledky navýšení rychlosti budou takto markantní, jako v případě mikro TBM, neboť tyto stroje pracují odlišným a rychlejším způsobem při pokládání ostění tunelu. Obecně lze také říci, že rychlost závisí i na průměru stroje (potažmo tunelu) – u větších strojů probíhá ražba pomaleji než u menších. A proto lze dopředu říci, že i rozdíl ve velikostech bude při výsledné rychlosti hrát svou roli. Přesto, pokud dojde k aplikaci plazmových fréz u běžných strojů TBM, navýšení jejich rychlosti bude nemalé.

Obdobný posun mohou v této oblasti přinést plynové frézy, které před nedávnem představila startupová společnost Petra, jakožto vybavení svého autonomního razícího robota. Na rozdíl od plazmových fréz nedosahují ty plynové tak vysokých teplot, avšak stále se v tomto jedná o bezkontaktní ražbu, která snižuje opotřebení stroje, což opět vede k celkovému zvýšení rychlosti ražby, a tudíž je pravděpodobné, že někteří výrobci TBM zvolí pro své stroje tuto variantu vysokoteplotních fréz.

7.2 PREDIKCE VÝVOJE V OBLASTI RYCHLOSTI STROJŮ DO MĚKKÉ PŮDY

Běžně užívané TBM do měkké půdy dosahují v dnešní době rychlosti 200 metrů za týden. Stejně jako v předchozím případě, tak i stroje v této kategorii byly schopny vyvinout tuto rychlost již v prvním desetiletí 21. století. [24]

Na první pohled by se mohlo zdát, že i zde se za posledních dvacet let nic nezměnilo. Avšak v roce 2016 byla založena společnost The Boring Company, která v roce 2017 započala první ražbu ve zkušebním tunelu Hawthorne, a to s konvenčním strojem TBM typu EPB, Godot, který dodala firma Lovat. O dva roky později společnost přišla s vylepšeným modelem tohoto

stroje, nazvaným Godot+, který byl použit na stavbu projektu Las Vegas Convention Center Loop. Tento stroj již dosahoval rychlosti hloubení 270 metrů za týden. V roce 2020 odhalila společnost The Boring Company svůj vlastní TBM typu EPB nazvaný Prufrock, který ovšem sloužil pouze jako testovací stroj. V roce 2022 byl odhalen Prufrock 2, který byl použit například při projektu Vegas Loop. Tento stroj dosahuje rychlosti ražby 1,6 kilometru za týden, což odpovídá šestinásobku rychlosti předchozího modelu Godot+.[28]

Pokud se na tato čísla podíváme, tak zjistíme, že od doby, kdy vznikla společnost The Boring Company, došlo v jejich případech v oblasti stojů TBM do měkké půdy k exponenciálnímu růstu rychlosti ražby. Podle zveřejněných plánů je však jejich cílem dosáhnout v budoucnu mnohem vyšších rychlostí. Vzhledem k tomu, že firma představuje jistou konkurenci pro ostatní společnosti zabývající se výrobou TBM, tak je vysoce pravděpodobné, že tyto společnosti nezůstanou pozadu a budou následovat příkladu firmy The Boring Company. Rovněž lze předpokládat, že i u strojů zhotovených těmito firmami dojde v průběhu let k obdobnému exponenciálnímu růstu rychlostí, jako u výše zmíněné společnosti. Důkazem, že takovýto vývoj již probíhá, je nedávný pokrok v technologii, který zaznamenal německý výrobce Herrenknecht. Podařilo se mu totiž vyvinout metodu kontinuální ražby, určenou pro stroje do měkké půdy, která poskytuje 1,6krát vyšší rychlost než stávající metody.

7.3 PREDIKCE VÝVOJE V DALŠÍCH OBLASTECH

Vysoká pořizovací cena, a celkově vysoké náklady související se stavbou tunelu, je dalším významným problémem současných TBM. Z velké části je to dáno tím, že stroje se prakticky použijí pouze jednou, jelikož každý z nich je speciálně vytvořen pro určitý projekt. Je sice pravdou, že po dokončení prací mohou být některé jejich části opětovně využity u jiných strojů, avšak dané TBM jako celek je použito pouze jednou. Tato skutečnost je dána především tím, že jednotlivé tunely vznikají v různých prostředích, která vždy kladou specifické požadavky na razící stroje, a každý stroj je tudíž navržen tak, aby se s daným prostředím dovedl vypořádat. V současnosti již existují flexibilní stroje, zvané duální TBM, které v sobě kombinují technologie strojů určených do pevné skály a strojů do měkké půdy. Tyto stroje jsou schopné přizpůsobit se proměnlivému prostředí, a to pouze za pomoci několika drobných úprav, které se provádějí přímo na místě stavby. Pokud se vývoj v této oblasti nezastaví, mohli bychom se v budoucnosti dočkat strojů, které bude díky jejich flexibilitě možné využít na více než jeden projekt. V končeném důsledku by se tak snížila i jejich pořizovací cena, což by zvýšilo i atraktivitu jejich použití na menších projektech, při nichž se v současnosti stroje TBM nevyplácejí.

V současné době dochází taktéž k vývoji na poli autonomních systémů. U razících strojů jsou to především mikro TBM, které jsou dnes plně automatické. Avšak i u klasických strojů TBM dochází v tomto směru k postupnému rozvoji. V nedávné době byl vyvinut a úspěšně otestován první autonomní stroj TBM, a my se tak do budoucna můžeme těšit na další pokroky v této technologii. Vývoji velmi napomáhá i systém IIOT, sbírající data během ražby, která autonomní systémy zpracovávají a následně využívají během řízení strojů.

Stroje TBM se ve většině případů využívají v civilních projektech. Již krátce po jejich vzniku se však objevila myšlenka využít tyto stroje taktéž při těžbě nerostných surovin. V minulosti proběhlo mnoho pokusů, avšak ty nezaznamenali příliš velké úspěchy, a proto se postupně přestali provádět. V současné době však narůstá zájem o těžbu pomocí TBM a tyto stroje

se do hornictví začínají navracet. V těžebním průmyslu se stroje TBM setkávají s mnohem náročnějšími podmínkami, než jakým musí čelit při civilních projektech. Střety s rozsáhlými problémy však přispívají k rychlejšímu rozvoji technologií. V tomto konkrétním případě by mohlo dojít především k vývoji v oblasti podpor stěn tunelu, v důsledku reakce na vysoce nestabilní podloží, jež je typické pro rudní ložiska. Rovněž lze očekávat nová a efektivnější řešení utěsnění stěn tunelu kvůli výskytu značného množství podzemních vod ve velkých hloubkách. Dále je velice pravděpodobné, že dojde k rozvoji v klimatizačních systémech stroje, jelikož například v uhelných dolech dochází k častému výskytu jedovatých plynů, a jejich případné neefektivní odvětrávání by vedlo k nežádoucímu snížení bezpečnosti pracovníků.

ZÁVĚR

Současná situace nasvědčuje tomu, že se do budoucna i nadále bude investovat do rozvoje dopravy a infrastruktury. S tím je velice úzce provázaná ražba tunelů. Potřeba provádět tyto stavby stále rychleji, s co nejmenšími náklady, a zároveň bez toho, aniž by jakkoliv klesala kvalita odvedené práce, povede k rozvoji technologie razících strojů.

Existují dvě základní kategorie strojů TBM. Do první kategorie spadají stroje, které jsou určeny pro ražbu v tvrdých horninách. Druhou kategorií tvoří TBM vhodné do měkké půdy. Tyto stroje se využívají především při stavbě delších tunelů, jelikož náklady na jejich pořízení bývají nemalé a u menších projektů se tudíž nevyplatí je použít. I přes tento fakt jde o nejpoužívanější metodu ražby na světě. Stroje TBM je výhodné použít především při ražbě v zastavěných oblastech, jelikož nenarušují okolní povrch a nedochází tak k nežádoucímu poškození stávající infrastruktury.

Největší poptávka po technologii TBM je v dnešní době v oblasti asijsko-pacifického regionu, kde v reakci na rostoucí urbanizaci dochází k rychlému rozvoji dopravní infrastruktury. TBM se zde podílejí na stavbách rozsáhlých projektů, jako jsou metra, či dálniční a železniční tunely. I na evropském a severoamerickém trhu tyto stroje nacházejí své uplatnění, neboť v těchto oblastech pracují na modernizaci stávající infrastruktury.

Hranice použití TBM zdaleka nekončí pouze u civilních projektů. Tyto stroje lze rovněž využít v oblasti těžebního průmyslu. Vrchol v hornictví zažily TBM v 70. letech 20. století. Od této doby zde jejich používání postupně opadalo, a tak nikdy neměli šanci zde naplnit svůj potenciál. V dnešní době se však stroje TBM do těžebního průmyslu pomalu navrací a my můžeme předpokládat, že s technologiemi, které spolu přinášejí, budou slavit nemalé úspěchy.

Technologie TBM je sama o sobě velmi mladá a stále je na ní co rozvíjet. V dnešní době se vývoj věnuje především zvýšení rychlosti ražby těchto strojů. Rychlost TBM zůstávala od začátku 21. století prakticky bez povšimnutí, a to jak u kategorie strojů do pevných hornin, tak i u kategorie strojů do měkké půdy. To se však velice rychle začíná měnit. Startupové společnosti postupně přicházejí s novými technologiemi ražby, které celý proces značně urychlují. Stávající výrobci se věnují vyřešení problému kontinuální ražby a pomalu začínají slavit v této oblasti úspěchy. Všechny tyto a podobné pokroky vedou postupně k jasnému cíli a do budoucna lze očekávat, že u strojů TBM dojde k výraznému zvýšení rychlosti ražby.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] TRENCHLESSPEDIA. *Tunnel Boring Machine* [online]. 2017, July 5, 2023 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://trenchlesspedia.com/definition/2572/tunnel-boring-machine-tbm>
- [2] CONSTRUCTION PHYSICS. *The Evolution of Tunnel Boring Machines* [online]. 2023 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.construction-physics.com/p/the-evolution-of-tunnel-boring-machines>
- [3] INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. *Tunnel boring machines* [online]. c2024 [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/what-do-civil-engineers-do/tunnel-boring-machines>
- [4] CONSULTANZ. *A Short History of Tunnel Boring Machines TBMs* [online]. 2023 [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.consultanz.com.au/short-history-on-tunnel-boring-machines/>
- [5] *RECOMMENDATIONS AND GUIDELINES FOR TUNNEL BORING MACHINES (TBMs)* [online]. 2000 [cit. 2024-03-24]. ISSN 1267-8422. Dostupné z: https://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/Recommendations_ITA_TBM.pdf
- [6] THE CONSTRUCTOR. *Tunnel Boring Machine: Working of the Tunnel Construction Giant* [online]. c2009-2019 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/construction/tunnel-boring-machine-working/62033/>
- [7] THE ENGINEERING COMUNITY. *Tunnel Boring Machine Types* [online]. 2021 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.theengineeringcommunity.org/tunnel-boring-machine-types/>
- [8] TRENCHLESSPEDIA. *How Tunnel Boring Machines Work* [online]. 2018, July 5, 2023 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://trenchlesspedia.com/how-tunnel-boring-machines-work/2/3546>
- [9] HERRENKNECHT. *GRIPPER TBM* [online]. c2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/gripper-tbm/>
- [10] HERRENKNECHT. *SINGLE SHIELD TBM* [online]. c2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/single-shield-tbm/>
- [11] HERRENKNECHT. *DOUBLE SHIELD TBM* [online]. c2024 [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/double-shield-tbm/>
- [12] HERRENKNECHT. *EPB SHIELD* [online]. c2024 [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/>

- [13] ITA-AITES. *SLURRY SHIELD* [online]. c2024 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground/construction-methods/mechanized-tunnelling/slurry-shield>
- [14] HERRENKNECHT. *MULTI-MODE TBM* [online]. c2024 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/multi-mode-tbm/>
- [15] ROBBINS. *TBMS IN MINING* [online]. c2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.robbinstbm.com/about/advancements/tbms-in-mining/>
- [16] TRENCHLESSPEDIA. *Drill And Blast Tunneling* [online]. 2017, July 5, 2023 [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://trenchlesspedia.com/definition/3284/drill-and-blast-tunneling>
- [17] TRENCHLESSPEDIA. *Road Header* [online]. 2018, July 5, 2023 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://trenchlesspedia.com/definition/3715/road-header-pipe-jacking-excavation-method>
- [18] MEDIUM. *Tunnel Boring Machine Market 2024 | Size, Trends, Demand And Forecast 2024–2032* [online]. 2024 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://medium.com/@researchmapping888/tunnel-boring-machine-market-2024-size-trends-demand-and-forecast-2024-2032-574355936235>
- [19] STRAITS RESEARCH. *Tunnel Boring Machine Market* [online]. c2024 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://straitsresearch.com/report/tunnel-boring-machine-market>
- [20] METROSTAV. *Ražená a podzemní díla* [online]. c2021 [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/nase-technologie/razena-a-podzemni-dila>
- [21] *Čtrnáctideník Metrostav* [online]. Metrostav, 2018 [cit. 2024-03-27]. ISSN 1211-0736. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/pro-media/1644-noviny-metrostavu-21-2018>
- [22] KORIDORY.CZ. *RoPL: Razicí štít TBM S-799 pokřtěn, jmenuje se Viktorie* [online]. 2015 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.koridory.cz/ropl-razici-stit-tbm-s-799-pokrten-jmenuje-se-viktorie/>
- [23] ZHENG, Y.L., Q.B. ZHANG a J. ZHAO. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology* [online]. 2016, **57**, 287-299 [cit. 2024-04-18]. ISSN 08867798. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2016.01.023
- [24] ROBBINS. *Project Solutions* [online]. c2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.robbinstbm.com/project-solution/>

- [25] TBM: TUNNELING BUSINESS MAGAZINE. *What's New in Tunnel Boring Machine Technology?* [online]. 2024 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://tunnelingonline.com/whats-new-in-tunnel-boring-machine-technology/>
- [26] THE BORING COMPANY. *Prufrock* [online]. c2024 [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: <https://www.boringcompany.com/prufrock>
- [27] CONSTRUCTION BRIEFING. *6 ways tunnel boring machines are evolving* [online]. 2023 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.constructionbriefing.com/news/6-ways-tunnel-boring-machines-are-evolving/8026001.article>
- [28] ELONX. *The Boring Company Projects* [online]. 2019, 2022-07-16 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.elonx.net/list-of-boring-company-projects/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

TBM	Tunnel Boring Machine
UAM	Umbrella Arch Method
EPB	Earth Pressure Balance
USA	United States of America
CRCHI	China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited
CREG	China Railway Engineering Equipment Group
IHI	Ishikawajima-Harima Heavy Industries
PGM	Platinum-Group Metals
IIOT	Industrial Internet of Things