

TBM TUNNELLING CHALLENGES – REDEFINING THE STATE OF THE ART

PROBLÉMY PŘI RAŽBÁCH TUNELOVACÍMI STROJI (TBM) – NOVÁ DEFINICE SOUČASNÉHO STAVU VÝVOJE

MARKUS THEWES

INTRODUCTION

International TBM Tunnelling Challenges in soft ground, which were mastered during recent years, have triggered manifold innovations and technology developments. With tunnel boring machines, tunnels of unprecedented dimensions in terms of length, depth, and diameter have been or are being realised. In resemblance to the well-known Latin Olympic motto “citius – altius – fortius”, the motto of the tunnelling industry seems to be “faster – larger – deeper – longer”.

Faster: rates of advance in problematic soil (e.g. abrasive or clogging) were substantially increased.

Larger: shield machines with diameters in excess of 15 m were built (see Figure 1).

Deeper: locations down to 60 m in permeable, soft ground carrying groundwater were exploited.

Longer: More than 50 % of the work on the 57 km Gotthard Base Tunnel, the world’s longest, has been completed

In general, the ranges of application, especially of Slurry-supported- and EPB-machines have greatly been increased. However, there were also a few less successful cases in which the limits of applicability of particular types of TBMs had to be acknowledged. The paper approaches this topic in four logical steps:

In the first step, a systematic analysis of the requirements regarding the key components of TBMs for soft ground applications is performed. A particular distinction is made between basic requirements and especially challenging site conditions (i.e. obstacles in the ground, high water and ground pressure, abrasiveness, stickiness, complex geology), which can only be mastered by using highly advanced technology.

Then an overview of the most significant technology developments for soft ground TBMs to approach highly demanding requirements from challenging site conditions is given. These options for additional equipment of a TBM have to be chosen carefully on the basis of a thorough risk analysis of expected requirements. In this case, the result should be well-equipped TBMs for tunnel drives with good adherence to budgets and schedules.

The systematic analysis of site requirements and technological solutions is completed with a discussion of the range of applicability of soft ground TBMs with particular focus on Slurry-supported- and EPB-machines.

ÚVOD

Úspěšně zvládnutí mezinárodních problémů ražeb tunelovacími stroji v zeminách v minulých létech odstartovalo tvorbu různých inovačních a technologických zlepšení. Pomocí tunelovacích strojů se realizovaly nebo jsou realizovány tunely nevídané délky, v nevídané hloubce nebo s nevídanými průměry. Obdobou známého latinského olympijského hesla “citius – altius – fortius” by mohlo být heslo stavitelů tunelů “rychleji – hlouběji – s větší délkou – s většími rozměry”.

Rychleji: rychlost postupu v problémových zeminách (např. abrazivních nebo způsobujících ucpávání) se značně zvýšily.

Hlouběji: byly využity polohy v hloubce až 60 m v propustných zvodnělých zeminách.

S větší délkou: bylo již dokončeno přes 50 % ražeb nejdelšího tunelu na světě, 57 km dlouhého Gotthardského bázového tunelu.

S většími rozměry: byly postaveny štíty s průměry přesahujícími 15 m (obr. 1).

Obecně se rozsah použití tunelovacích strojů, obzvláště těch, u kterých je rovnováha na čelbě zajišťována tlakem suspenze (tzv. bentonitových štítů) nebo zeminy (štítů EPB), velmi zvětšil. Vyskytlo se ale i několik méně úspěšných případů, ve kterých se musela uznat existence hranic použitelnosti konkrétních typů tunelovacích strojů. Tento článek rozebírá dané téma ve čtyřech logických krocích:

V prvním kroku je provedena systematická analýza požadavků na klíčové části tunelovacích strojů pro ražby v zeminách. Zvláštní rozdíl je činěn mezi základními požadavky a požadavky vyplývajícími z obzvláště obtížných podmínek výstavby (tj. překážek v zemině, vysokého tlaku vody a zeminy, abrazivity, lepidlosti, složité geologie), které se dají zvládnout pouze použitím vysoce vyspělých technologií.

Následuje přehled nejdůležitějších technologických vylepšení štítů pro ražby v zeminách, řešících vysoce náročné požadavky, vyplývající z obtížných podmínek výstavby. Možnosti přídavných zařízení tunelovacího stroje se musí volit opatrně, na základě důkladné analýzy rizik očekávaných potřeb. V takovém případě by měl být výsledkem tunelovací stroj správně vybavený pro ražbu tunelu, umožňující dodržení plánovaných nákladů a časových harmonogramů.

Systematická analýza potřeb, vyplývajících z podmínek na staveništi, a analýza technologických řešení se zakončí diskusí o rozsahu použitelnosti zeminových štítů se zvláštním zaměřením na bentonitové štíty a štíty EPB.

Fig. 1 Trend towards increasing diameters: EPB-shield (Spain, 2005) Ø 15,20 m and Mixshield (China, 2006) Ø 15,43 m (Pictures: Herrenknecht AG)

Obr. 1 Trend směrem k větším průměrům: štít EPB (Španělsko, 2005) Ø 15,20 m a štít pro proměnlivé horninové poměry Mixshield (Čína, 2006) Ø 15,43 m (Fotografie: Herrenknecht AG)



Finally, an outlook is presented on emerging research developments coming up to increase the reliability of TBMs in the most severe environment conditions, to improve quality control and to further better working conditions in the tunnel.

REQUIREMENTS FOR THE DEFINITION OF KEY COMPONENTS OF SHIELD MACHINES

In the process of many major shield tunnelling projects during recent years new technological standards were achieved by conquering a diversity of extreme project requirements. This has led to the development of a catalogue of auxiliary measures and equipment, which can be made use of in case of need, e.g. in the event of difficult geological or hydro-geological conditions. As a consequence, it was possible to extend the fields of application for shield machines.

The condition for a successful - meaning safe, reliable and economic - machine concept is a thorough identification of the associated risks. These can be of a geotechnical, operational or ecological nature or relate to the existing infrastructure. To correctly identify risks it is necessary a thorough assessment of the ground, which in addition to the general subsoil data must reveal all available information about sporadically occurring risks such as obstacles or locally difficult subsoil conditions. Further conditions to be considered are operational constraints during tunnelling, i.e. the accessibility of the excavation chamber for tool changes, and ecological constraints, i.e. the handling

Nakonec je předložen názor na nově vznikající výsledky výzkumu, které budou k dispozici pro zvýšení spolehlivosti tunelovacích strojů v těch nejnáročnějších podmínkách prostředí, aby se zlepšilo řízení jakosti a dále zlepšily pracovní podmínky v tunelu.

POŽADAVKY NA DEFINOVÁNÍ KLÍČOVÝCH ČÁSTÍ RAZIČÍCH ŠTÍTŮ

V průběhu mnoha velkých tunelových staveb v uplynulých letech se dosáhlo nových technologických standardů tím, že byly zvládnuty různorodé extrémní požadavky staveb. To vedlo k vyvinutí celé řady pomocných opatření a zařízení, která se dají využít v případě potřeby, např. v případě obtížných geologických nebo hydrogeologických podmínek. V důsledku toho bylo možno oblast použitelnosti mechanizovaných razičích štítů rozšířit.

Podmínkou pro vytvoření úspěšné (tj. bezpečné, spolehlivé a hospodárné) koncepce mechanizovaného štítu je důkladná identifikace souvisejících rizik. Ta mohou být geologické, provozní nebo ekologické povahy, nebo mohou být spojena se stávající infrastrukturou. Pro správnou identifikaci rizik je potřebné důkladné posouzení zeminy, které musí kromě obecných údajů o základové půdě zjistit i všechny dostupné informace o občas se vyskytujících rizicích, jako jsou překážky nebo místní výskyt těžkých geologických podmínek. Další podmínky, které se musí zvažovat, jsou provozní omezení v průběhu ražeb, tj. omezení přístupu do těžní komory za účelem

| Shield Components | BASIC requirements | EXTENDED requirements |
|--------------------------------|---|--|
| Shield skin | <ul style="list-style-type: none"> ● ground water pressure ● earth- or rock pressure ● reaction forces from steering | |
| Shield joint / Tail skin joint | <ul style="list-style-type: none"> ● ability to make curves ● reliable sealing ● replaceable sealing | |
| Tunnel face | <ul style="list-style-type: none"> ● reliable face support in unstable ground ● avoiding ground water inflow ● removing of obstacles and boulders ● accessibility of excavation chamber | <ul style="list-style-type: none"> ● advance exploration, locating obstacles ● advance ground stabilisation ● maintenance work given support pressures > 3,6 bar |
| Excavation | <ul style="list-style-type: none"> ● high tool service life ● soil conditioning ● avoiding overbreak (loss of ground) ● overcut ● replaceable tools | <ul style="list-style-type: none"> ● Excavation in highly variable soil conditions ● Excavation in highly variable soil conditionsvery abrasive ground ● Excavation in highly variable soil conditionsnatural gas in the ground ● Excavation in highly variable soil conditionsmastering of boulders in soft ground ● Excavation in highly variable soil conditionsmastering of transitions between soft soil and hard rock |
| Muck flow | <ul style="list-style-type: none"> ● little time need for tool change ● avoiding wear ● material flow continuity ● mastering boulders and obstacles | <ul style="list-style-type: none"> ● avoiding clogging with clay ● quantity control of conveyed excavation ● mastering of liquid muck consistency with EPB shields |
| Main bearing | <ul style="list-style-type: none"> ● seal against pressurised support medium ● low default risk ● replacement underground | |
| Segment erector | <ul style="list-style-type: none"> ● low ring erection time ● precision and quality ring building ● safety during ring erection | |
| Tail skin seal | <ul style="list-style-type: none"> ● reliable sealing against grout and groundwater pressure ● bridging over segment erection tolerances ● replacement underground ● low consumption of sealing compound ● little environmental impact | |
| Grouting of annular gap | <ul style="list-style-type: none"> ● full round bedding of the tunnel tube ● no cause of downtime ● avoiding leaks of mortar into the excavation chamber ● maintenance friendliness | |
| Control system | <ul style="list-style-type: none"> ● processing and visualisation of TBM survey data ● full control in changing ground conditions ● thrust reserves for steerability ● pitch correction | <ul style="list-style-type: none"> ● complex conditions for control and monitoring |
| Machine data | <ul style="list-style-type: none"> ● operating data visualisation ● fault analysis ● objectives for essential control parameters | <ul style="list-style-type: none"> ● quality monitoring of tunnel lining |

Tab. 1 Requirements for the shield driving technology

| Součásti štítu | ZÁKLADNÍ požadavky | ROZŠÍŘENÉ požadavky |
|---|--|---|
| Obálka štítu | <ul style="list-style-type: none"> tlak spodní vody tlak zeminy nebo horniny síly reakce na řízení štítu | |
| Kloubové spojení dílů štítu / kloubové připojení koncové obálky štítu | <ul style="list-style-type: none"> schopnost provádět oblouky spolehlivé těsnění vyměnitelné těsnění | |
| Čelo ražby | <ul style="list-style-type: none"> spolehlivé zajištění čelby v nestabilní zemině/hornině ochrana proti přítoku spodní vody odstranění překážek a balvanů možnost přístupu do těžní komory | <ul style="list-style-type: none"> průzkum před čelbou, lokalizace překážek stabilizace zeminy/horniny před čelbou údržbářské práce v prostředí tlaku pažicího média > 3,6 bar |
| Ražba | <ul style="list-style-type: none"> dlouhá životnost nástrojů vylepšování zemin nevznikání nadvýlomů (ztráty zeminy) nadvýřez výmenné nástroje krátká doba, potřebná pro výměnu nástrojů | <ul style="list-style-type: none"> ražba ve velmi proměnlivých zeminových poměrech velmi abrazivní hornina/zemina zemní plyn v hornině/zemině zvládání balvanů v zemině zvládání přechodů mezi zeminou a skalní horninou |
| Proud rubaniny | <ul style="list-style-type: none"> neopotřebování plynulost toku materiálu zvládání balvanů a překážek | <ul style="list-style-type: none"> neucpávání se jílem řízení množství dopravované rubaniny zvládání tekuté konzistence rubaniny u štítů EPB |
| Hlavní ložisko | <ul style="list-style-type: none"> utěsnění proti pronikání stlačeného média zajišťujícího čelbu nízké riziko poruchy možnost výměny v podzemí | |
| Ukladač segmentů ostění | <ul style="list-style-type: none"> krátká doba sestavení prstence přesné a kvalitní sestavení prstence bezpečnost při sestavení prstence | |
| Těsnění koncového dílu obálky štítu | <ul style="list-style-type: none"> spolehlivé těsnění proti pronikání tlakové injektáže a spodní vody překlenutí montážních tolerancí skládaného ostění možnost výměny v podzemí malá spotřeba těsnicí směsi malý vliv na životní prostředí | |
| Výplňová injektáž za ostění | <ul style="list-style-type: none"> uložení tunelové trouby po celém obvodu bez prostojů nepronikání injekční směsi do těžní komory šetřnost vůči údržbě | |
| Řídicí systém | <ul style="list-style-type: none"> zpracování a vizualizace dat, zastížených tunelovacím strojem plná kontrola v proměnlivých horninových podmínkách rezervy přítlaku pro potřeby řízení štítu úpravy sklonu | <ul style="list-style-type: none"> složitě podmínky pro řízení a monitoring |
| Údaje o stroji | <ul style="list-style-type: none"> vizualizace provozních údajů analýza poruchy cíle základních parametrů řízení sledování kvality tunelového ostění | |

Tab. 1 Požadavky na technologii při ražbě štítem

of (possibly polluted) spoil. Finally, it must be assured that existing structures are not affected by harmful settlements within the area of influence of a tunnel drive.

The resulting list of identified risks leads to a catalogue of requirements concerning the engineering technology. This catalogue is the basis for the choice of both the standard type and features of a shield machine as well as the auxiliary installations that may be needed for particular risks at certain locations of the excavation route.

Apart from the presentation of project-related requirements and the resultant solution concepts, a systematic classification of basic demands and possible additional requirements is undertaken in the following.

The detailed issues that must be discussed when analysing the requirements posed on a shield machine stem from the following, fundamental thematic sectors:

- stability of the face, the shield machine and the tunnel lining
- minimising the influence of settlement on neighbouring structures
- mastering groundwater during construction and operation
- environmental protection in conjunction with groundwater and subsoil
- work safety when working at the face and within the shield machine

výměny nástrojů a ekologická omezení, tj. nakládání s (možná znečištěnou) vytěženou zeminou. Nakonec se musí zajistit, aby nedošlo k ovlivnění stávajících staveb nepřiměřeným sedáním v oblasti ražeb.

Výsledný seznam identifikovaných rizik se použije pro vytvoření katalogu požadavků týkajících se strojní technologie. Tento katalog je základem jak pro výběr standardního typu mechanizovaného štítu a jeho prvků, tak pro volbu přídavných zařízení, která mohou být potřebná pro konkrétní rizika v určitých místech na trase ražby.

Kromě uvedení požadavků, souvisejících se stavbou a s výslednou koncepcí řešení, se následně provede systematická klasifikace základních požadavků a možných dodatečných požadavků.

Detailní otázky, které se musí řešit při analyzování požadavků, kladených na mechanizovaný štít, mají původ v následujících základních tematických oblastech:

- stabilita čelby, štítu a ostění tunelu,
- minimalizace vlivu sedání na okolní konstrukce,
- zvládání spodní vody v průběhu výstavby i za provozu,
- ochrana životního prostředí ve spojení s podzemní vodou a základovou půdou,
- bezpečnost práce na čelbě a uvnitř mechanizovaného štítu,

| Shield Components | EXTENDED requirements | Solution Approaches |
|-------------------|---|---|
| Tunnel face | a) advance exploration, locating obstacles b) advance ground stabilisation c) maintenance work given support pressures > 3,6 bar (German Compressed Air Regulation) | a) advance drillings, geophysical advance exploration b) grouting umbrellas and sealed zones from the shield machine c) accessible cutter arms with tool locks, installation of professional diving equipment (special respiration gases, installations for saturation diving) |
| Excavation | a) Excavation in highly variable soil conditions b) very abrasive ground c) Natural gas in the ground d) mastering of boulders in soft ground e) mastering of transitions between soft soil and hard rock | a) adaptable shield machines with combined process technology b) conditioning measures, special tools, wear protection and monitoring c) flameproof protection, conversion to fluid-support d) combination of cutter knives and disc cutters e) cutterhead contact pressure control, wear protection + monitoring, advance injections |
| Muck flow | a) avoiding clogging with clay b) quantity control of conveyed excavation c) mastering of liquid muck consistency with EPB shields | a) central cutter, flow optimisation, high pressure jets b) conveyor belt scale, laser scanning, flow meter, density sensors c) thick matter pump, auxiliary hydraulic circuit |
| Control system | a) complex conditions for control and monitoring | a) Controlled Boring Process: guide parameters from interdisciplinary processing of geotechnical, geodetic and machine data |
| Machine data | a) quality monitoring of tunnel lining | a) automatic tail skin gap measurement, measurements of ring movements |

Tab. 2 Extended Requirements and Solutions approaches

| Součásti štítu | ROZŠÍŘENÉ požadavky | Přístupy k řešení |
|----------------|--|--|
| Čelba | a) průzkum před čelbou, lokalizace překážek b) stabilizace zeminy/horniny před čelbou c) údržbářské práce v prostředí tlaku pažicího média > 3,6 bar (německý předpis pro práci ve stlačeném vzduchu) | a) vrtání před čelbou, geofyzikální průzkum před čelbou b) ochranné deštníky z injektáže a utěsněné oblasti, vytvářené zevnitř mechanizovaného štítu c) možnost vstupu do ramen řezné hlavy s pouzdry nástrojů, instalace profesionálního potápěčského zařízení (speciální respirační plyny, zařízení pro saturační potápění) |
| Ražba | a) ražba ve velmi proměnlivých zeminových podmínkách b) velmi abrazivní hornina/zemina c) zemní plyn v hornině/zemině d) zvládání balvanů v zemině e) zvládání přechodů mezi zeminou a skalní horninou | a) adaptabilní mechanizované štíty s kombinovanou technologií práce b) opatření pro úpravu vlastností, speciální nástroje, ochrana proti opotřebení a monitoring c) zabezpečení proti výbuchu, přeměna na systém zajištění rovnováhy na čelbě kapalinou d) kombinace nožových nástrojů a valivých dlát e) řízení kontaktního tlaku řezné hlavy, ochrana proti opotřebení + monitoring, injektáž před čelbu |
| Tok rubaniny | a) neucpávání se jílem b) řízení množství dopravované rubaniny c) zvládání tekuté konzistence rubaniny u štítů EPB | a) střední řezná hlava, optimalizace toku, vysokotlaké trysky b) pásový dopravník vybavený vahou, laserový snímač, průtokoměr, senzory hustoty c) čerpadlo na husté látky, pomocný hydraulický okruh |
| Řídicí systém | a) složité podmínky pro řízení a monitorování | a) proces řízení ražby: parametry pro vedení štítu z interdisciplinárního zpracování geotechnických a geodetických údajů a údajů o stroji |
| Údaje o stroji | a) sledování kvality tunelového ostění | a) automatické měření mezery mezi obálkou koncového dílu štítu a ostěním, měření pohybů prstence ostění |

Tab. 2 Rozšířené požadavky a přístupy k řešení

- guarantee of a lasting quality for the tunnel lining and its waterproofing over a service life of 100 years and more
- concept for the driving technology to allow for high rates of advance with little downtime regarding:
 - face support
 - soil removal at the face
 - removal and transport of excavated spoil
 - ring building
 - annular gap grouting
 - wear of machine components
 - accessibility for maintenance and time needed for maintenance jobs.

Table 1 distinguishes between basic requirements and additional requirements regarding the key components of shield machines. Whereas the basic requirements are covered by the basic functions of modern shield machines, the additional requirements necessitate a special design of the shield machine in individual cases. If these additional requirements are neglected, this may lead to substantial problems and delays in the construction process of an individual project.

- záruka trvalé jakosti tunelového ostění a jeho vodotěsnosti po dobu životnosti 100 let a delší,
- koncepce technologie ražby, která má umožnit vysoké rychlosti ražby s nízkými prostoji, souvisejícími s:
 - zajištěním čelby
 - odklizením zeminy na čelbě
 - odklizením a dopravou vytěžené zeminy
 - stavbou prstence ostění
 - výplňovou injektáží za ostění
 - opotřebením součástí stroje
 - přístupností pro údržbu a časem potřebným pro provedení úkonů údržby.

Tabulka 1 rozlišuje mezi základními požadavky a doplňujícími požadavky na hlavní součásti mechanizovaných štítů. Zatímco základní požadavky jsou plněny základními funkcemi moderních mechanizovaných štítů, splnění doplňujících požadavků vyžaduje speciální návrhy mechanizovaných štítů pro jednotlivé případy. Zanedbání těchto doplňujících požadavků může vést k velkým komplikacím a zpožděním v procesu výstavby daného díla.

TECHNICAL EQUIPMENT OF SHIELD MACHINES

Table 2 presents possible approaches for solutions concerning extended requirements. These solutions largely relate to progress in developments over the last 10 years. Before and after the table, some selected requirements and the corresponding possible solutions are described in detail.

MAINTENANCE WORK UNDER HIGH SUPPORTING PRESSURE

In the case of conventional compressed air operations with transfer into and out of the chamber through an airlock, an increasing air pressure results in increasingly shorter working times and ever greater transfer times. Given the limit of 3.6 bar pressure, such operations i.e. in Germany are no longer permissible in accordance with the National Compressed Air Regulation.

Given such a situation, a new method for undertaking maintenance jobs on the cutting wheel must be developed – allowing professional divers to enter the extraction chamber. For their assignment, the divers wear special helmets, through which they breathe a Trimix gas mixture of oxygen, helium and nitrogen. With Trimix gas the narcotic effect of the nitrogen is considerably less than with conventional compressed air.

In the event of higher pressures, the ratio of working times to transfer times can be extremely unfavourable even given the application of Trimix gas. As a result, it is advisable to use the saturation diving method for extensive maintenance operations under high pressure.

When saturation diving, the divers do not decompress after they finish their working shift but also remain “under pressure” during their breaks. From the shield machine they are brought above ground by means of a transport shuttle, which is also pressurised. They then spend their break until they have to go down again while staying in a pressurised habitat with beds, sanitary installations and medical facilities. Permanent medical supervision is mandatory.

The shield machine for the work carried out under compressed air must possess special connectors for the Trimix gas, a special flange for coupling the mobile transport lock to the pressure locks and the necessary transport equipment for the mobile lock (see Figure 2).

EXTREMELY STICKY CLAY SOILS

When excavating very adhesive clay soils the clogging of a shield machine may cause delays in schedule, complicated cleaning operations and expensive retrofitting of the tunnelling technology. This especially applies to shield machines with fluid-supported face. This risk can be successfully reduced by a consistent optimisation of the cutting wheel, the extraction chamber, the intake zone and the jetting system.

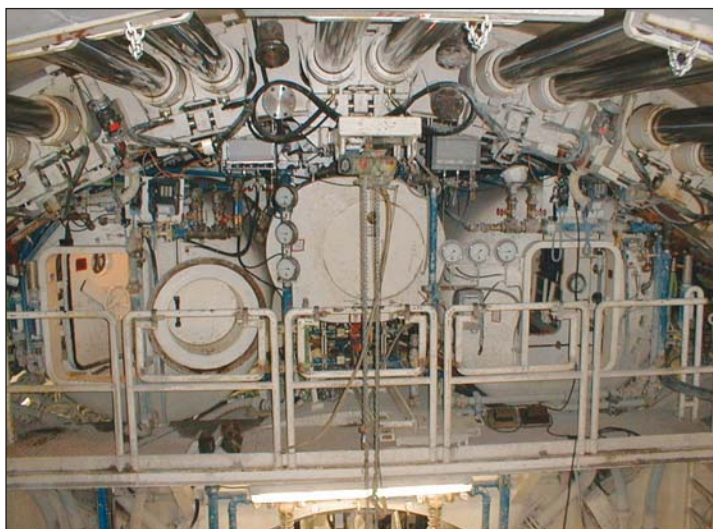


Fig. 2 Lock with additional transport flange, diver with helmet for Trimix-gas

Obr. 2 Tlakový uzávěr s přidanou přírubou pro dopravní komoru, potápěč s přilbou pro plyn Trimix

TECHNICKÉ VYBAVENÍ MECHANIZOVANÝCH ŠTÍTŮ

Tabulka 2 obsahuje možné přístupy k řešením rozšířených požadavků. Tato řešení se převážně týkají pokroku ve vývoji v uplynulých 10 letech. Před a za tabulkou je podrobný popis některých vybraných požadavků a příslušných možných řešení.

ÚDRŽBAŘSKÉ PRÁCE V PROSTŘEDÍ VYSOKÉHO TLAKU PAŽICÍHO MÉDIA

V případě tradičních prací ve stlačeném vzduchu s přestupy do komory a z komory přes tlakový uzávěr má zvyšování tlaku vzduchu za následek stále zkracování doby pro výkon práce a prodloužení času potřebného pro přestupy. V podmínkách tlaku nad 3,6 baru již tyto operace nejsou přípustné, například v Německu podle národní normy pro práci ve stlačeném vzduchu.

V takové situaci se musí vyvinout nová metoda pro provádění údržbářských prací na řezné hlavě, která umožní vstup do odtěžovací komory profesionálním potápěčům. Aby mohli plnit své úkoly, musí mít potápěči speciální přilby, kterými dýchají směs kyslíku, hélia a dusíku Trimix. Při použití plynu Trimix je narkotický účinek dusíku podstatně nižší než v případě tradičního stlačeného vzduchu.

V případě vyšších tlaků může být poměr mezi pracovními časy a časy pro přestupy extrémně nepříznivý, i když se použije plyn Trimix. Proto se pro rozsáhlé údržbové operace za vysokého tlaku doporučuje použití metody saturačního potápění.

Při saturačním potápění potápěči nepodstupují dekompresi po skončení své pracovní směny, ale zůstávají „pod tlakem“ i v době svých přestávek. Z prostoru mechanizovaného štítu jsou odváženi na povrch kyvadlovou dopravou – důlním vozem, ve kterém je také přetlak. Přestávky pak tráví společně, dokud nemusí jít opět dolů, v prostředí přetlaku, ve kterém jsou lůžka a sociální a zdravotní zařízení. Trvalý lékařský dohled je povinný.

Mechanizovaný štít pro práce prováděné v podmínkách stlačeného vzduchu musí mít speciální spojky pro přívod plynu Trimix, speciální přírubu pro napojení mobilní dopravní tlakové komory na tlakové uzávěry a potřebné dopravní zařízení pro mobilní tlakovou komoru (obr. 2).

EXTRÉMĚ LEPIVÉ JÍLOVITÉ ZEMINY

Při ražbách ve velmi lepidivých jílovitých zeminách může ucpávání mechanizovaného štítu způsobovat zpoždování oproti harmonogramu prací, potřebu náročného čištění a nákladné doplnění tunelovací technologie. To obzvláště platí pro štíty s rovnováhou na čelbě zajišťovanou tlakem kapaliny. Toto riziko se dá úspěšně snížit důslednou optimalizací řezné hlavy, odtěžovací komory, vstupní zóny a systému trysek.



The shape of the cutting arms must be optimised for smooth material flow. Broad cutter teeth should be employed as tools because they enable the excavated clay chips to separate more quickly within the suspension. The application of an independent central cutter at the heart of the cutting wheel is recommendable to avoid a clay segment in front of the cutting wheel blocking it. The extraction chamber should be lined in such a way that corner zones susceptible to clogging are avoided.

Static obstacles in the flow path must be avoided in the working chamber's intake area. This can be accomplished by doing without an intake screen and setting up rotary crushers in front of the intake port of the feed line. Additional turbulence can be produced in these areas, which are especially susceptible to clogging with clay, by installing agitators as well.

If possible an improved jetting concept for distributing the suspension inflow should be installed at the extraction chamber and the intake area so that the feed suspension can be distributed throughout all areas susceptible to clogging. This may also necessitate the installation of additional pump capacity.

COMPLEX CONDITIONS DURING CONTROL AND MONITORING: CONTROLLED BORING PROCESS

Urban tunnelling sites are becoming even more complex and place increasingly high demands on the execution and monitoring of construction. Tunnels under densely populated urban areas or where there are geologically difficult conditions require a greater amount of control and supervision.

The Controlled Boring Process (CBP) represents a safety and monitoring system with evaluation and analysis functions in order to secure safer process guidance in mechanised tunnelling. For this purpose, different kinds of data sources are linked up with each other via a CBP system. This embraces a large variety of data starting with maps, pictures and geological sections by way of the measurement data and parameters of the shield machine, navigation data, and measurements for movement or deformation monitoring up to general documents and reports. The measured data are stored, prepared and checked on the basis of intended and limit values. The warning and report system monitors the incoming data during the drive and reports discrepancies to the given responsible or appropriate places.

The core of the CBP system is the CBP server with data base. All data and documents run together there. The project panes provide a geographical and geological overview on the latest advance stage reached by the shield machine and the results of movement and deformation monitoring. Sensors, which are located within a defined zone of influence around the shield machine, are selectively displayed automatically through definition of a zone of influence around the tunnelling installation. The tendencies produced by these sensors can directly be visualised. Further modules e.g. display the control guidance system, the warning and report archive and a diagram administration, which serves to prepare data in diagrams. Freely combinable presentations of all available measurement data, intended values and limit values are all possible here. With the aid of such diagrams, it is for instance, possible to draw conclusions about the shield skin friction or alternatively the annular gap fill can be checked. Most important, however, is the possibility of getting a direct feedback from online surface settlement measurements to the shield driver, providing for a very helpful tool to supervise the success of the applied face support pressure.

APPLICATION RANGE OF SLURRY-SUPPORTED AND EPB-SHIELDS

Over the recent years the ranges of application of Slurry-supported- and EPB-shields have both been widely extended. Especially the EPB-shields, originally designed for soils with at least 30% of fines, due to the advances in soil conditioning have successfully been applied in coarse-grained soils.

Figure 3 comparatively shows the typical areas of grain size distribution for the application of both types, slurry-supported and EPB. These ranges of application seem to be widely overlapping. However, the use of either type of shield under increasingly chal-

Tvar ramen řezné hlavy by se měl optimalizovat, aby se dosáhlo plynulého toku materiálu. Měly by se používat široké řezné nástroje, jelikož umožňují rychlejší oddělování odřezávaných „trísk“ jílu v suspenzi. Doporučuje se použití samostatně střední řezné hlavy uprostřed řezného kola, aby nedocházelo k zablokování řezného kola kusem jílu před ním. Odtěžovací komora by měla mít takový obrys, který nemá rohy náchylné k zanášení.

Nesmějí se vyskytovat statické překážky v cestě proudu ve vstupní oblasti pracovní komory. Toho se dá dosáhnout prací bez vstupního síta a osazením otáčivých drtičů před vstupní otvor přírodního potrubí. Je také možné vytvořit další víření osazením vířících zařízení v oblastech, které jsou zvláště náchylné na zanášení.

Je-li to možné, měl by se v odtěžovací komoře a ve vstupní oblasti instalovat zlepšený systém trysek, aby se přítok suspenze rozdělil do všech oblastí, které jsou náchylné k zanášení. K tomu také může být potřebná instalace dodatečné kapacity čerpadel.

SLOŽITÉ PODMÍNKY PRO ŘÍZENÍ A MONITORING: PROCES ŘÍZENÉ RAŽBY

Výstavba tunelů ve městech se stává ještě složitější a klade stále vyšší nároky na provádění a monitoring stavby. Tunely, budované pod hustě zastavěnými územími měst nebo v obtížných geologických podmínkách, vyžadují více řízení a kontroly.

Proces řízené ražby (PŘR) je systém bezpečnosti a monitoringu s vyhodnocovacími a analytickými funkcemi pro zajištění bezpečnějšího řízení procesu při mechanizované ražbě tunelu. Pro tento účel se prostřednictvím systému PŘR navzájem spojují různé druhy zdrojů údajů. Tento systém zahrnuje velkou škálu údajů, počínaje mapami, fotografiemi a geologickými řezy, přes údaje z měření a parametry mechanizovaného štítu, údaje o směru ražby a měření pohybů nebo monitoring deformací, až po obecné dokumenty a zprávy. Naměřené údaje se ukládají, připravují a kontrolují z hlediska očekávaných a limitních hodnot. Varovný a oznamovací systém monitoruje příchozí údaje v průběhu ražeb a oznamuje neshody příslušným odpovědným nebo vhodným místům.

Jádrem systému PŘR je server PŘR s databází. Tím procházejí všechna data a dokumenty společně. Příslušná okna počítačového programu poskytují geografické a geologické přehledy z posledního záběru, vyraženého mechanizovaným štítem, a výsledky monitoringu pohybů a deformací. Údaje čidel, umístěných v definované oblasti vlivu kolem štítu, jsou selektivně zobrazovány pomocí definice oblasti vlivu kolem razicího zařízení. Vývojové tendence, které vyplývají z údajů těchto čidel, se dají přímo vizualizovat. Další moduly jsou např. zobrazení řídicího systému vedení štítu, archiv varovných hodnot a zpráv a správa diagramů, která slouží pro přípravu údajů v grafických znázorněních. Je zde možné volně kombinovat zobrazení všech existujících údajů z měření, očekávaných hodnot a limitních hodnot. Pomocí těchto zobrazení je například možné dělat závěry o plášťovém tření štítu nebo se alternativně dá kontrolovat vyplnění obvodové mezery injektáží. Nejdůležitější ale je možnost poskytovat obsluze štítu přímou zpětnou vazbu z měření sedání povrchu a tím jí dát do rukou velmi užitečný nástroj pro dohled nad účinností použitého tlaku, kterým je zajišťována rovnováha na čelbě.

ROZSAH POUŽITÍ BENTONITOVÝCH ŠTÍTŮ A ŠTÍTŮ EPB

V posledních letech se rozsah použití bentonitových štítů i štítů EPB značně rozšířil. Zvláště štítů EPB, které byly původně konstruovány pro zeminy s obsahem jemných částic větším než 30 %, avšak díky pokroku v úpravách zemin již byly úspěšně použity i v hrubozrnných zeminách.

Na obr. 3 je srovnání typických zrnitosti pro použití obou typů štítů, bentonitových a EPB. Zdá se, že se tyto rozsahy použití široce překrývají. Použití jednoho nebo druhého typu štítu ve stále náročnějších geotechnických podmínkách může být spojeno se závažnými dodatečnými požadavky.

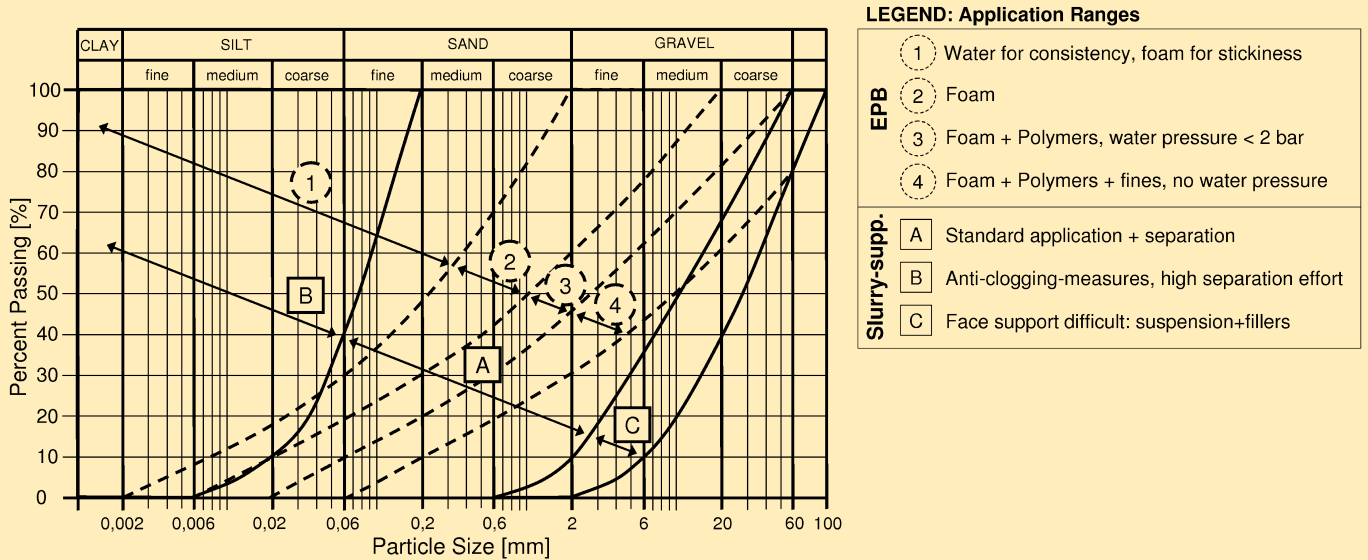


Fig 3 Application ranges of Slurry-supported- and EPB-shields
Obr. 3 Rozsahy použití bentonitových štítů a štítů EPB

lenging ground conditions may be linked to important additional requirements.

It should be noted that the grain size distribution of the governing soil layers alone is not the only decisive factor when choosing between the two systems. There may be other extremely important factors such as the presence of layers of hard rock or layers with a high content of boulders. Other factors could be surroundings that are extremely sensitive to settlements, accessibility for maintenance at the tunnel face under high earth and water pressures, the possibility of compressed air face support in highly permeable ground, high water pressures in coarse ground, gaseous ground and the available possibilities for treatment and depositing of the muck.

In Table 3 a comparison of advantages and disadvantages of both systems, slurry-supported and EPB, is given. It should be noted that in this connection the slurry-supported shield is understood to be built according to the hydro-shield principle, where the support pressure is finely controlled by using a compressed air reservoir.

According to Table 3, the advantages of the slurry-supported shield by and large are on the side risk-reducing factors, such as more precise face support control, better control of coarse ground, better wear control, easier face access and lower risk of settlements. On the other hand the advantages of the EPB-shield are on the side of economic factors. Especially the latter will in many cases make the EPB-shield the primary choice of the market. However, against the background of recent critical situations paired with long standstills of EPB-shields under extremely difficult ground conditions (i.e. mixed face conditions with combinations of hard rock, coarse sand and gravel, and high ground water pressure) it has become clear that a ground-related risk analysis is of particular importance to EPB-drives. Additionally, in many cases it has proven to be important to associate a risk-analysis with a cost-analysis to overcome certain failure scenarios. This may lead to the insight that the initial cost benefit of an EPB-shield may be lost by more and longer standstills under adverse geological conditions. In situations where ground conditions are extremely difficult it is therefore advisable to perform such a risk analysis on the client's side, which if necessary could lead to a requirement for the use of a slurry-supported shield in the tender documents. Under difficult ground conditions the decision for the type of shield machine to be employed should not be entirely left up to the market, where economical pressure naturally causes a different perspective on the associated risks.

Je nutno podotknout, že zrnitost převládajících vrstev zeminy samotná není jediným rozhodujícím faktorem při volbě jednoho z těchto dvou systémů. Mohou existovat jiné extrémně důležité faktory, jako přítomnost vrstev tvrdé horniny nebo vrstev obsahujících velké množství balvanů. Jinými faktory by mohlo být okolí ražeb, které je velmi citlivé na sedání, možnost přístupu pro údržbu na čelbě v podmínkách vysokého tlaku zeminy a vody, možnost použití stlačeného vzduchu pro zajištění rovnováhy na čelbě ve vysoce propustných zeminách/horninách, vysoké hydrostatické tlaky v hrubozrnných zeminách/horninách, plynující zemina/hornina, nebo možnosti pro čištění a ukládání rubaniny.

V tabulce 3 je porovnání výhod a nevýhod obou systémů, tj. systému se zajištěním rovnováhy na čelbě suspenzí (bentonitový štít) a systému se zajištěním této rovnováhy zeminou (štít EPB). V této souvislosti je potřeba poznamenat, že bentonitový štít je konstruován na principu hydroštítu, kde tlak, zajišťující rovnováhu, je jemně ovládán s použitím zásobníku stlačeného vzduchu.

Podle tabulky 3 jsou výhody bentonitového štítu hlavně na straně faktorů snižování rizik, jako je přesnější řízení chování čelby, lepší řízení chování hrubozrnných zemin, lepší řízení opotřebení, snadnější přístup k čelbě a nižší riziko sedání. Naproti tomu výhody štítu EPB jsou na straně ekonomických faktorů. Zvláště tyto ekonomické faktory v mnoha případech způsobí, že štít EPB bude zvolen jako nejvýhodnější z nabídky trhu. Avšak na pozadí nedávných kritických situací spojených s dlouhodobými zastaveními štítů EPB v extrémně těžkých geotechnických podmínkách (proměnlivé poměry na čelbě, kde se kombinuje skalní hornina, hrubozrnný písek a šterka a velký hydrostatický tlak) začalo být jasné, že pro štítu EPB je zvláště důležitá analýza rizik spojených se zeminou/horninou. Kromě toho se v mnoha případech ukázalo jako důležité pro to, aby se překonaly určité scénáře poruch, spojit analýzu rizik s analýzou nákladů. To může vést k pochopení skutečnosti, že počáteční výhodný poměr vynaložených prostředků k zisku, dosažený u štítu EPB, se může v případě většího počtu a delších přestávek v nepříznivých geologických podmínkách obrátit. V situacích, kde jsou podmínky zvláště obtížné, je proto vhodné, aby tuto analýzu rizik zajistil sám investor. To by mohlo, pokud by to bylo nutné, vést k začlenění požadavku na použití bentonitového štítu již do soutěžních podmínek. V obtížných geologických podmínkách by nemělo být rozhodnutí, který typ mechanizovaného štítu se má použít, ponecháno zcela na trhu, kde ekonomický tlak přirozeně způsobí, že na související rizika bude nahlíženo z jiné perspektivy.

| Criteria | Slurry-supported shield | EPB-shield |
|--|--|--|
| Settlement control | very precise, defined linear distribution of support pressure | less precise, fluctuation and nonlinear distribution of face support pressure |
| Boulders | less wear on disc cutters, stone crusher possible | higher wear on disc cutters, blocking of screw possible |
| Mixed face rock/soft | better control of face support and wear | higher risk of instability and wear |
| High fines content | high separation effort, danger of clogging | ideal for soil with high fines content |
| Coarse soil with groundwater | better face control, less wear, easier compressed air interventions | more wear, compressed air without extra measures not possible |
| High wear ground conditions | less wear | higher wear |
| Accessibility to face under adverse conditions | Faster emptying of chamber, compressed air easier, low temperature | longer preparation time, compressed air more difficult, higher temperature because of friction |
| Face control during long downtime | continuous uninterrupted face support | desegregation of foam and soil in excavation chamber |
| Gaseous ground | no exposition in the tunnel | exposition in the tunnel possible |
| Contaminated soil | no exposition in the tunnel, higher volume of muck for special treatment | exposition in tunnel, lesser volume of muck for special treatment |
| Disposal of muck | no direct disposal higher cost | direct disposal possible lower cost |
| Complexity of installation | more complex | less complex |
| Complexity of operation | more complex for additional slurry circuit less complex in standard situation | more complex with difficult conditioning + face support |
| Size of jobsite installation | larger for additional size of separation plant | smaller |
| Capital investment | higher | lower |

Tab. 3 Advantages and disadvantages of slurry-supported- and EPB-shields

| Kritéria | Bentonitový štít | Štít EPB |
|--|---|---|
| Řízení sedání | velmi přesné, definováno lineární rozdělení tlaku zajišťujícího rovnováhu na čelbě | méně přesné, výkyvy a nelineární rozdělení tlaku zajišťujícího rovnováhu na čelbě |
| Balvany | menší opotřebení valivých dlát, možnost instalace drtiče kamene | větší opotřebení valivých dlát, možnost zablokování šnekového dopravníku |
| Proměnlivé podmínky – skalní hornina / zemina | lepší řízení zajištění rovnováhy na čelbě a opotřebení | větší riziko nestability a opotřebení |
| Vysoký obsah jemných částic | velké úsilí potřebné pro oddělení frakcí, nebezpečí zanášení / ucpávání | ideální pro zeminy s vysokým obsahem jemných částic |
| Hrubozrná zemina se spodní vodou | lepší řízení chování čelby, menší opotřebení, jednodušší zásahy pomocí stlačeného vzduchu | větší opotřebení, nemožnost použití stlačeného vzduchu bez zvláštních opatření |
| Ražba v zemině, způsobující velké opotřebení | menší opotřebení | větší opotřebení |
| Možnost přístupu na čelbu za nepříznivých podmínek | rychlejší vyprazdňování komory, snadnější zásahy pomocí stlačeného vzduchu, nízká teplota | delší čas pro přípravu, obtížnější zásahy pomocí stlačeného vzduchu, vyšší teplota v důsledku tření |
| Řízení chování čelby po dobu dlouhých přestávek (prostoju) | trvale nepřerušované zajištění čelby desegregace pěny a zeminy v těžní komoře | plynující zemina/hornina k vystavení vlivu v tunelu nedochází vystavení vlivu v tunelu je možné |
| Kontaminovaná zemina | k vystavení vlivu v tunelu nedochází, větší objem rubaniny potřebuje zvláštní úpravu | vystavení vlivu v tunelu, menší objem rubaniny potřebuje zvláštní úpravu |
| Uložení rubaniny na skládku | přímé uložení není možné vyšší náklady | přímé uložení je možné nižší náklady |
| Složitost instalace | složitější | méně složitá |
| Složitost provozu | složitější kvůli dodatečnému okruhu pro oběh suspenze složitější v případě obtížného upravování zeminy + zajištění čelby | méně složitý ve standardních situacích |
| Velikost zařízení na staveništi | větší o přidané zařízení pro oddělování frakcí | menší |
| Investiční náklady | vyšší | nižší |

Tab. 3 Výhody a nevýhody bentonitového štítu a štítu EPB

CURRENT RESEARCH AND EMERGING TECHNOLOGIES

The risks associated with a tunnel project have to be thoroughly assessed to result in adequate basic and extended requirements which have to be satisfied by the design of the machine while making use of the various items of equipment that are available

SOUČASNÝ VÝZKUM A NOVĚ VYVÍJENÉ TECHNOLOGIE

Rizika, související s tunelovou stavbou, se musí důkladně posoudit tak, aby vedla ke stanovení dostatečných základních a rozšířených požadavků, kterým musí konstrukce stroje vyhovět, přičemž se využijí různá dnes dostupná zařízení. Na základě této

today. Based on this condition, the shield driving method represents a construction method by means of which a tunnel project can be accomplished with above-average likelihood for success, both with regard to costs and construction deadlines.

Still, there is still a great potential for innovations, which will presumably be exploited in the course of the next few years. These innovations will help en route to ensure that shield machines will develop even higher safety standards, will provide for more intensive monitoring of the control parameters that influence the surrounding area and will further improve working conditions, which still are quite rough. A small selection of possible approaches for further innovations is provided in the following:

The theoretical knowledge about the interaction of subsoil and machine as well as subsoil and tunnel lining is still very much based on comparatively simple model assumptions. Improved awareness of the safety level that actually exists can be attained for calculating the machine and lining by means of new measurement and monitoring techniques during execution and by means of improved three dimensional numerical simulations. In order to determine realistic input parameters for the numerical calculations it is necessary to obtain even more detailed measurement results on the kinematical behaviour of a shield machine and on stresses as well as deformations that occur in interaction of the shield machine with the subsoil.

When excavating with shield machines, enormous amounts of data are recorded, which so far have to a large extent simply been archived. The systematic analysis and evaluation of these data accompanying the drive and the incorporation of external measurement systems, e.g. to monitor settlement, affords a considerable optimisation potential to register, correct and avoid unscheduled operating states. Current research concerning the application of fuzzy logic and artificial neuronal networks represents an important contribution in this respect. It is aiming at a systematic evaluation of the complex interrelationships between varying data sources in conjunction with expert knowledge making use of fuzzy decision criteria.

On the basis of these mentioned developments the next step will be to improve techniques for the forecasting of settlements and to combine them with online monitoring of the actual settlements. In this way, automated models that work in real time for interactive coupling of drive control with algorithms to forecast settlement and with measured settlements will become possible.

As a result of such systems will become possible to introduce automation for sub-processes during shield driving in addition to conventional data analysis. These developments are geared to coming up with a process guidance system, which is capable of taking over the essential control functions of the shield machine in order to provide more possibilities for the responsible crew to identify and avoid unscheduled operating states.

Further development is needed towards improved monitoring methods for the volume of excavated spoil for early indication of excessive settlements. There is a need for systems, which can provide very rapid and precise details about such incidents. Concerning the different types of shield machines, EPB and fluid-supported, different solutions are required. With respect to fluid-supported shields, the level of knowledge relating to the mass balance could be considerably improved with the help of flow and density probes. Given the precision error of 10-15% of current systems, a precise indication of over-excavation in real time is still not possible. It is quite desirable to obtain further reductions of the error in precision to establish the solid mass flow by introducing improved sensor technology. This particularly also applies to excavation control systems for EPB shields with the aid of conveyor belt scales and laser scanners.

**PROF. DR.-ING. MARKUS THEWES,
INSTITUTE FOR TUNNELLING,
PIPELINE TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION MANA-
GEMENT, RUHR-UNIVERSITY BOCHUM,
markus.thewes@rub.de**

podmínky představuje metoda štítování stavební metodu, jejíž pomocí se dá tunelová stavba provést s nadprůměrnou pravděpodobností úspěchu, jak co se týká nákladů, tak termínů výstavby.

Je zde stále velký potenciál pro inovace, který bude pravděpodobně využit během několika málo příštích let. Tyto inovace pomohou na cestě k tomu, aby se zajistilo, že mechanizované štíty budou vyvíjeny s ještě vyššími standardy bezpečnosti, umožní intenzivnější monitoring parametrů řízení, které ovlivňují okolí, a dále zlepší pracovní podmínky, které jsou dosud dosti drsné. Malý výběr možných přístupů k dalším inovacím je nabídnut v dalším textu.

Teoretické znalosti vzájemného působení okolní zeminy/horniny a ostění tunelu jsou dosud z velké míry založeny na relativně jednoduchých předpokladech modelu. Zlepšení znalostí skutečně existující úrovně bezpečnosti pro výpočty stroje a ostění lze dosáhnout pomocí nových metod měření a monitoringu v průběhu ražby a pomocí zlepšených trojrozměrných numerických simulací. Pro určení reálných vstupních parametrů pro numerické výpočty je zapotřebí získat ještě podrobnější výsledky měření kinematického chování mechanizovaného štítu a napětí a deformací, které vznikají při vzájemném působení štítu a okolní zeminy/horniny.

Při ražbě mechanizovanými štíty se zaznamenává ohromné množství dat, která se dosud z velké části pouze archivují. Systematická analýza a vyhodnocování těchto dat, provázejících ražbu, a připojení externích systémů měření, např. monitoringu sedání, skýtá velký optimalizační potenciál pro zaznamenání neplánovaných provozních stavů, jejich opravu a vyhnutí se jim. V tomto směru představuje významný příspěvek současný výzkum týkající se fuzzy logiky a umělých neuronových sítí. Má za cíl systematické posuzování komplexních vzájemných vztahů mezi zdroji proměnlivých dat ve spojení s odbornými znalostmi při využití fuzzy kritérií rozhodování.

Na těchto nejnovějších zdokonaleních bude založen další krok, kterým bude zlepšení metod předpovídání sedání a jejich kombinování s online monitoringem skutečného sedání. Tímto způsobem se stanou možnými v reálném čase pracující automatizované modely pro interaktivní spojování řízení ražby s algoritmy pro předpovídání sedání a s naměřenými sednutími.

Výsledkem těchto systémů bude, že kromě tradičních analýz dat se při řízení štítu stane možným zavedení automatizace i do subprocesů. Tato zdokonalení jsou nachystána, aby se objevila spolu se systémem řízení procesu, který je schopný převzít hlavní řídicí funkce mechanizovaného štítu, aby odpovědná obsluha měla více možností rozpoznat neplánované provozní stavy a vyhnout se jim.

Další vývoj je potřebný ve směru k zlepšování metod monitorování objemu vytěžené rubaniny za účelem včasného rozpoznání náznaků nadměrných sedání. Jsou potřebné systémy, které budou velmi rychle poskytovat velmi přesné detailní informace o takových událostech. Pokud jde o různé typy mechanizovaných štítů, tj. štítů EPB a štítů, kde je rovnováha na čelbě zajištěna kapalinou (bentonitových štítů), jsou potřebná rozdílná řešení. U bentonitových štítů by se dala úroveň znalostí, týkajících se hmotové bilance, značně zlepšit pomocí průtokoměrných a hustotměrných sond. Jestliže je odchylka přesnosti současných systémů 10 – 15 %, je přesné zjištění nadvýrubů v reálném čase stále nemožné. K tomu, aby se určil hmotnostní tok, je zapotřebí dosáhnout dalšího snížení odchylky přesnosti tím, že se zavedou technologicky zdokonalená čidla. To obzvláště platí pro systémy řízení ražby (těžby) u štítů EPB s využitím pásových dopravníků vybavených váhou a laserovými snímači.

**PROF. DR.-ING. MARKUS THEWES,
INSTITUTE FOR TUNNELLING,
PIPELINE TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION MANA-
GEMENT, RUHR-UNIVERSITY BOCHUM,
markus.thewes@rub.de**