

ZDOKONALENÁ TECHNOLOGIE ÚPRAVY VLASTNOSTÍ ZEMIN PRO PLNOPROFILOVÉ TUNELOVACÍ STROJE (TBM) ADVANCED TECHNOLOGY OF SOIL CONDITIONING FOR TUNNEL BORING MACHINES (TBM)

LARS LANGMAACK, MICHAL ZÁMEČNÍK

1. ÚVOD

Zeminové (EPB = Earth Pressure Balance) štíty používající přísady pro úpravu vlastností zemin jsou ve světě tunelování používané stále častěji. Jejich schopnost vytvořit a udržovat rovnovážný stav tlaku zeminy a jejich ekologické a toxikologické vlastnosti patří mezi nejdůležitější hlediska úspěšné ražby plnoprofilovým tunelovacím strojem.

Správné a efektivní použití přísad pro úpravu vlastností zemin není vždy zřejmé. Úspěch zeminových štítů, zvláště v podmínkách nehomogenních, vysoce pórovitých nebo lepivých zemin, závisí na dobré konstrukci stroje v kombinaci s vysoce účinnými přísadami pro úpravu vlastností zeminy. Příklady těchto úspěšných kombinací je MetroSur v Madridu [1], metro v Tolouse a železnice v Římě.

Dalším důležitým hlediskem pro výběr přísad pro úpravu vlastností zemin je jejich možný vliv na okolní prostředí. Je nezbytné provádět hodnocení rizik týkajících se znečištění podzemní vody v průběhu jejich používání, koncentrací na pracovišti a emisí skládek felonií upravené zeminy.

2. NÁVRH ZEMINOVÉHO ŠTÍTU DLE GEOLOGICKÝCH PODMÍNEK

Zeminové štíty se používají pro ražbu v homogenních i heterogenních geologických podmínkách. Známé příklady ražeb zeminovým štítem ve velmi heterogenních geologických formacích jsou stavby vnitřního silničního okruhu BPNL v Lyonu se štítem firmy NFM o průměru 10,98 m [2] a trasa L9 barcelonského metra se štítem Herrenknecht o průměru 12,06 m [3]. Křivky zrnitosti na těchto dvou stavbách je uvedena na obr. 1.

V důsledku heterogenity zemin se nemohou zeminové štíty optimalizovat pro specifické geologické podmínky, ale jsou navrhovány na vše zahrnující optimum [4]. Z toho plyne kompromis s ohledem na technologii stroje v tom, že musí být optimalizována

1. GENERAL

Earth Pressure Balancing (EPB) tunnel boring machines using soil conditioning additives are becoming more and more common in the world of tunnelling. Their ability to create and maintain the earth pressure equilibrium and their ecological and toxicological properties are a few amongst the most important aspects of a successful TBM drive.

The correct and effective use of soil conditioning additives is not always obvious. The success of EPB machines – especially in non-homogeneous, highly porous or adhesive ground conditions depends on good mechanical engineering combined with highly effective soil conditioning additives. Examples of these successful combinations are Madrid MetroSur, Toulouse Metro and Rome Railway.

An additional important point for the choice of soil conditioning additives is their possible impact on the surrounding environment. A risk assessment concerning emissions into ground water during application, workplace concentrations and emissions from the land filling of the treated soil is necessary.

2. TBM DESIGN VS GEOLOGY

EPB tunnelling is used in homogeneous as well as heterogeneous ground conditions. Famous examples for EPB drives in very heterogeneous geological formation are BPNL Lyon with a 10,98m diameter NFM machine (Bentz et al. 1997) and Barcelona Metro L9 with a 12,06m diameter Herrenknecht machine (Gabarró et al. 2003). The soil distribution of these two projects is indicated in fig. 1.

As a consequence of the soil heterogeneity, the TBMs itself cannot be optimised for a specific geology, however are designed for the overall optimum (Rehm 2004). This implicates a compromise with respect to the machine technology in that it has to be optimised by using different soil conditioning agents.

The 3 most important factors for soft ground tunnelling - apart from the hard rock geology - are the

- Soil permeability
- Ground water pressure
- Risk of clogging and adhesion

2.1 Soil Permeability

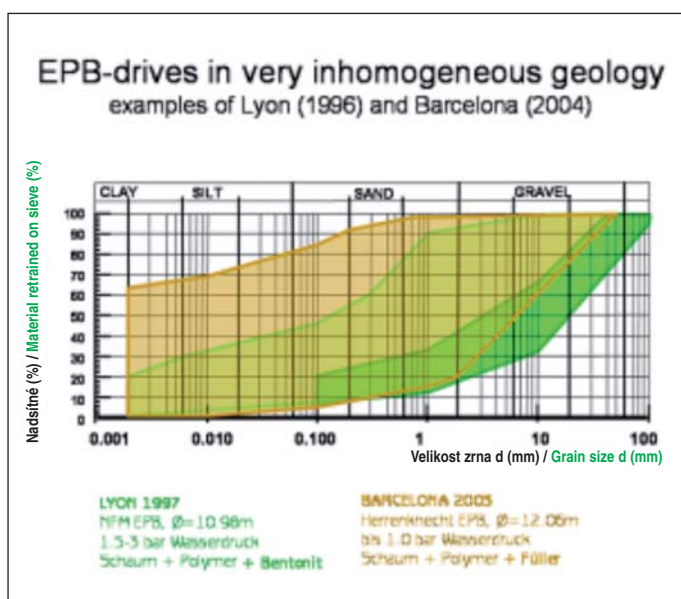
The soil permeability for EPB drives can reach values of up to $k=10^{-3}$ for the most porous soils (BPNL Lyon, Turin) and decreases to practically impermeable clay (Heathrow T5).

The TBM drives in clay soil – either full face or mixed face – often face clogging and adhesion problems as described in 2.3.

In porous soils, the problems faced are very instable tunnel face, uncontrolled soil and water income as well as loss of face pressure through the soil. These problems have been recently described for the Milan Metro project (Grandori et al., 2003). The mechanical adaptation of the TBM itself, including shield opening factor, number and choice of tools and finally the right soil conditioning (foams and polymers) combined with a complete filled working chamber, is important for a successful TBM drive. The use of pure foams will not be successful – details see in chapter 3.2.

GROUND WATER

An important factor in EPB drives in soft ground is the ground water level respectively the ground water pressure. The higher the



Obr. 1 Křivky zrnitosti v Lyonu a Barceloně (Langmaack 2004)
Fig. 1 Soil distribution of Lyon and Barcelona (Langmaack 2004)

pomocí různých přísad pro úpravu vlastností zeminy.

Tři nejdůležitější faktory pro ražbu tunelu v zeminách (mimo skalní horniny) jsou:

- Propustnost zeminy
- Tlak podzemní vody
- Riziko ucpávání a lepení

2.1. Propustnost zeminy

Propustnost zeminy pro ražbu zeminovým štítem může dosahovat hodnot do $k=10^{-3}$ pro většinu pórovitých zemin (BPNL Lyon, Turín) a snižuje se až k prakticky nepropustnému jílu (Heathrow T5).

Ražby plnoprofilovým tunelovacím strojem v jílovité zemině, která je v celém profilu nebo v části profilu, často čelí problémům s ucpáváním a lepivostí, jak je popsáno v kapitole 2.3.

V pórovitých zeminách spočívají problémy, kterým štíty čelí, ve velmi nestabilní čelbě výrubu, nekontrolovanému přísunu zeminy a vody a ztrátě tlaku na čelbě únikem do zeminy. Tyto problémy byly nedávno popsány pro stavbu metra v Miláně [5]. Strojní úprava tunelovacího stroje samotného, včetně součinitele otevření štítu, počtu a volby nástrojů a konečně i správné úpravy vlastností zeminy (pěny a polymery) v kombinaci s úplným naplněním pracovní komory je důležitá pro úspěch TBM ražby. Použití čistých pěn nebude úspěšné – podrobnosti jsou kapitole 3.2.

2.2. Podzemní voda

Důležitým faktorem při TBM ražbě v zeminách je úroveň hladiny podzemní vody, respektive tlak podzemní vody. Čím vyšší je hydrostatický tlak, tím obtížnější je zabránit nekontrolovaným přítokům vody a sedání povrchu. Co se týká návrhu stroje, je jen málo úprav, které se dají provést, jako například přidání dlouhých šnekových dopravníků pro snížení tlakového spádu nebo instalace pístových čerpadel za šnekový dopravník. Nejdůležitější faktor pro úspěšnou kontrolu vody je úplné vyplnění pracovní komory tunelovacího stroje homogenní a nepropustnou pastou ze zeminy pomocí pěn a polymerů. Příklady staveb jsou tunel Botlek a kanalizační tunel v Alives [6].

2.3. Ucpávání a lepení

Ražby zeminovým štítem v jílových formacích, které jsou v celém profilu či v jeho části, se často dostávají do problémů ucpávání a lepení.

Obr. 2 ukazuje, jak snadno se otvory v řezné hlavě mohou ucpat a řezné nástroje na razicí hlavě se mohou stát neúčinnými přilepeným jílem. Problém ucpávání jílem a lepení vždy povede k potížím při řízení tunelovacího stroje, ke zpomalení postupu a potřebě rozsáhlého čištění. Z hlediska strojní technologie je pouze několik věcí, které lze udělat. Je to například řešení otevřené řezné hlavy – zvláště v jejím středu – a vhodné umístění mísícího zařízení v pracovní komoře. I v tomto případě je jedním z nejdůležitějších faktorů pro úspěšné zmenšení ucpávání a lepení použití pěny nebo speciálních polymerů do jílu (podrobně viz kapitola 3.3). Příklady ze staveb jsou madridský okruh MetroSur (MBT Online) a železniční tunel Roma 4 Venti v Římě (MBT Online), které jsou popsány v kapitole 6.2, nebo metro v Toulouse popsané v kapitole 6.3.

3. POTŘEBA UPRAVOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ZEMIN

Úplné naplnění pracovní komory TBM je možné pouze při použití přísad pro upravování vlastností zemin. To je nutné pro snížení krouticího momentu stroje a tření. Žádné jiné režimy postupu vpřed nejsou pro nestabilní horniny a citlivé oblasti na povrchu vhodné [7], jak je vidět na obr. 3.

Rovnováha zemního tlaku se dá dosáhnout, pouze když je pracovní komora stroje úplně vyplněná zeminou [8, 9]. Zemina se proto musí v průběhu ražby ošetřovat přísadami pro upravování vlastností zemin:

- Pěny
- Polymery pro pórovité zeminy
- Polymery pro jílovité zeminy buď samostatně, nebo ve vzájemné kombinaci.

3.1. Pěna

Hlavní požadavek na pěny, které mají působit jako upravující přísady, je zajištění vhodných reologických vlastností zemin, aby



Obr. 2 Ucpání řezné hlavy tunelovacího stroje jílem
Fig. 2 Clay clogging on the TBM cutterhead

water pressure, the more difficult it is to avoid uncontrolled water income and surface settlement. In relation to the machine design, only few modifications can be made such as the addition of long screw conveyors to decrease the pressure gradient or installation of piston pumps behind the screw conveyor. The most important factor for the successful control of water is to fill the TBM working chamber completely with a homogeneous and impermeable soil paste with the aid of foams and polymers. Site examples therefore are Botlek Tunnel and Alives Sewage Tunnel as described in the Fernandez et al. 2002 paper and in chapter 6.1.

2.3 Clogging and adhesion

EPB drives in clay formations – either full face or mixed face – often run into clogging and adhesion problems.

Fig. 2 shows how easily the cutterhead openings can be closed and cutterhead tools can be turned ineffective by clogging clay. The problem of clay clogging and adhesion will always lead to difficult TBM guiding, slow advance rates and extensive cleaning. From the machine technique point of view only few things can be done like the design of an open cutterhead – especially in the center – and well placed mixing devices in the working chamber. Again one of the most important factors to reduce successfully the clay clogging and adhesion is the use of Foams or / and special anti-clay Polymers (details in chapter 3.3). Site examples are Madrid MetroSur (MBT Online) and Roma 4 Venti (MBT Online) as described in chapter 6.2 or Toulouse Metro in chapter 6.3.

3. NECESSITY OF SOIL CONDITIONING

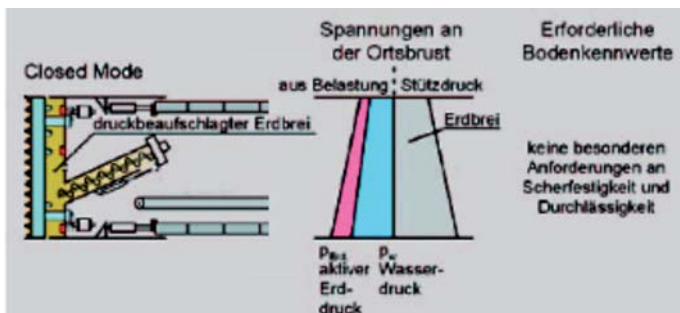
Only the use of soil conditioning additives enables the complete filling of the TBM working chamber. This is necessary to reduce the TBM torque and abrasion. No other modes of advance are suitable for instable ground and sensitive surface areas (Babendererde 2003) as shown in figure 3.

The earth pressure equilibrium can only be achieved if the TBM working chamber is completely filled with soil (Herrenknecht et al. 2003, Steiner et al. 1994). Therefore the soil must be treated during excavation with soil conditioning agents:

- Foams
- Polymers for porous soil
- Polymers for clay soil
- either alone or in combination with one another

3.1 Foam

The main demand on foams as conditioning additives is to obtain the suitable rheology of the soil in order to build up and to main-



Obr. 3 Režim EPB (Babendererde 2003)

Fig. 3 EPB mode (Babendererde 2003)

se vytvořil a udržoval potřebný tlak v pracovní komoře, zajišťující čelbu výrubu, a aby se zabránilo velkému kolísání tlaku. Pěna vstříkovaná do zeminové pasty má stejný účinek jako velká vzduchová bublina u bentonitových štítů. Snížení krouticího momentu a abrazivity jsou také výrazné výhody. Pěna se vytváří vířivým mícháním roztoku detergentu se vzduchem [10].

Hlavní vlastnosti detergentu jsou:

- ztekucující účinek na zeminy v důsledku snížení povrchového napětí. Částice zeminy přestanou být vzájemně vázány vodou v pórech;
- účinek elektrostatického odpuzování může oddělit dvě částice, které jsou k sobě přitahovány elektrostatickými silami.

Laboratorní zkoušky a zkušenosti ze staveb ukazují, že k dosažení maximální účinnosti každý typ zeminy, od tuhé jíly až k písčitému štěrku, často vyžaduje víceméně vlastní typ pěny. Na obr. 4 jsou ukázány účinky pěnnotvorného roztoku na prachovitou zeminu, pěny s polymery na štěrkovitou zeminu a pěny s přísadami do jílu na jílovitou zeminu.

Typ přísady na upravování vlastností zeminy, který se použije pro konkrétní stavbu, se musí stanovit předběžnými laboratorními zkouškami původního typu zeminy na stavbě.

3.2. Protijílové přísady („anti-clay“)

Přísady pro upravování vlastností zemin snižují vlastnosti jílovité zeminy, co se týká ucpávání a přilnavosti. Protijílové polymery proto musí být absorbovány do povrchu jílových částic. Aby se oddělily částice zeminy, musí nést velkou hustotu náboje, a měly by být dále schopné vytvořit prostorovou bariéru tak, aby se zabránilo účinkům opětovného shlukování.

Tyto požadavky mohou splnit jak detergenty, tak protijílové přísady, avšak ty druhé jsou mnohem účinnější a silnější. Protijílové přísady se užívají hlavně k podpoře vlastností pěny rozbíjejících strukturu zeminy, ale dají se použít i bez pěny. Obr. 5 ukazuje účinek těchto polymerů v jílovité zemině.

Použije-li se pouze voda s pěnou, částice jílu se okamžitě shlukují a vykazují silnou přilnavost ke kovovým povrchům (obr. 5 – levá část). Při použití TBM v tomto režimu se řezná hlava a pracovní komora ucpe. Použití protijílového polymeru povede k oddělování kusů jílu a k drastickému snížení přilnavosti (obr. 5 – pravá část). Pouze za těchto podmínek je možný správný režim zeminového štítu s přiměřenou rychlostí stroje a přiměřenou údržbou.

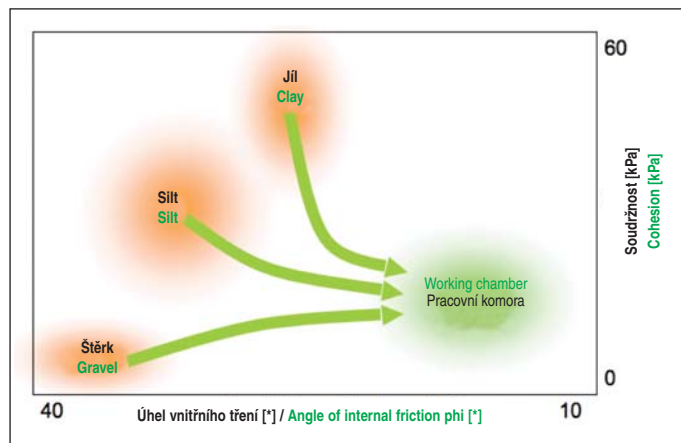
3.3. Polymer pro pórovitě zeminy

Na rozdíl od protijílových přísad, polymery pro pórovité zeminy vytvářejí soudržnost pro to, aby zemina získala reologické vlastnosti pasty.



Obr. 5 Chování jílu bez protijílové přísady a s přísadou

Fig. 5 Clay behavior without and with anti-clay agent



Obr. 4 Účinky tunelové pěny, přísady do jílu a polymeru na soudržnost zeminy a tření

Fig. 4 Tunnel foam, anti-clay and polymer effects on soil cohesion & friction

tain the necessary support pressure in the working chamber and to prevent high pressure variations. Foam incorporated in the soil paste has got the same effect as the big air bubble in slurry machines. The reduction of torque and abrasion are also very important benefits. Foam is produced by turbulent mixing of a surfactant solution with air (Langmaack 2000).

The main surfactant properties are:

- fluidising effect on soils because of the decrease of surface tension. Soil particles are no longer bound to each other by linked water,
- electrostatic repulsion effect which can separate two particles attracting each other by electrostatic forces.

Laboratory tests as well as site experience show, that often each soil type, from stiff clay to sandy gravel, requires more or less an own type of foam to reach its maximum effectiveness. Figure 4 demonstrates the effects of a foaming solution on silty soil, foam & polymers on gravelly soil and foam and anti-clay-additives on clayey soil.

The type of soil conditioning agent that shall be used for a specific site has to be determined by preliminary laboratory tests of the original insitu type of soil.

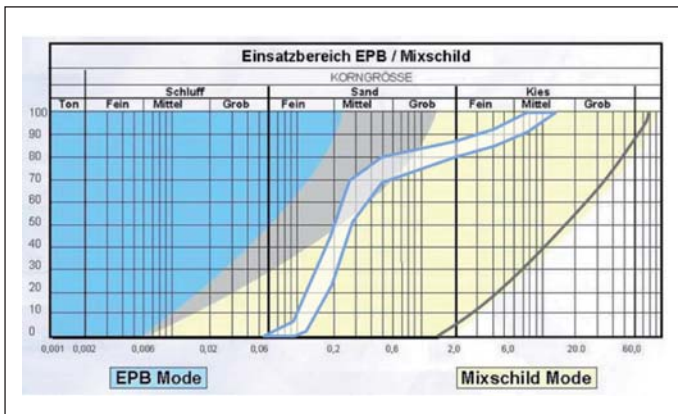
3.2 Anti-clay agents for clay soils

Soil-conditioning additives shall decrease the clogging and adhesion characteristics of clay soil. Therefore anti-clay polymers have to adsorb at the clay particle surface. They have to carry a high charge density to separate the soil particles and they should furthermore be able to create a steric barrier in order to avoid re-agglomeration effects.



Obr. 6 Porovnání původní zcela suché pórovité zeminy a homogenní pasty ze zeminy po jejím smíchání s pěnou a polymerem

Fig. 6 Comparison of original pure dry porous soil and as homogeneous paste after mixing with foam and polymer



Obr. 7 Křivka zrnitosti písků v Aviles

Fig. 7 Grain size distribution curve of Aviles Sand

V pórovitých zeminách se dá použít několik polymerů:

- Vodu vázající polymery – k vysušení (tekutých) zemin
- Polymery měnící strukturu zeminy – používají se pro změnu reologických vlastností sypkých, hrubozrnných zemin a k bránění usazování.
- Pěnu stabilizující polymery

Některé polymerové preparáty jsou založeny na uhlovodíkových řetězcích a vyrábějí se bakteriální fermentací. Tyto polymery jsou vodou ředitelné, biologicky rozložitelné a kompatibilní s detergenty. Jak polymery, tak i detergenty jsou při použití v generátoru pěny bezpečné a mohou se tedy mísit s pěnотvorným vodním roztokem a projít generátorem pěny. Polymery také vyvolávají stálejší tlak v komoře, zajišťující čelo výrubu během ražby a při zastavení stroje.

Všechny polymery by měly být přednostně v kapalně formě, aby se předešlo problémům s dávkováním a potřebě instalovat další zařízení na přeměnu prášku na roztok nebo suspenzi.

4. VHODNÉ VÝROBKY PRO ÚPRAVU VLASTNOSTÍ ZEMIN

Výrobky vhodné pro úpravu vlastností zemin by měly být pouze ty, které mají požadované funkční vlastnosti a současně jsou co nejbezpečnější pro pracovníky a životní prostředí. To znamená, že je potřeba identifikovat pomocí hodnocení rizik akutní závadnost pro vodní organismy, možnost bioakumulace, biologické degradace a chronické závadnosti pro vodní organismy, a jejich potenciální poškození. Tato hodnocení rizik by měla být vydávána pouze nezávislými a specializovanými společnostmi.

5. PŘÍKLADY STAVEB

Následující kapitoly představují 3 stavby, na kterých se ražba zeminovým štítem prováděla v obtížných geologických podmín-



Obr. 9 Ražba v písku s pomocí pěny a polymerů

Fig. 9 Sand excavation with Foam & Polymer



Obr. 8 Ražba v písku pouze s použitím pěny

Fig. 8 Sand excavation only with foam

These demands can be fulfilled by both surfactants and anti-clay agents, however anti-clay agents are much more efficient and powerful. Anti-clay agents are mainly used to support the destructuring properties of the foam, but they may also be introduced without foam. Figure 5 illustrates the effect of these polymers in clay soil.

Using foam and water alone, the clay particles agglomerate immediately and show extensive adhesion to metal surfaces (figure 5 left part). Using a TBM in this mode, the cutterhead as well as the working chamber will clog up. The use of anti-clay polymer will result in separated clay lumps and a drastically decreased adhesion (figure 5 right part). A proper EPB mode with a reasonable TBM speed and reasonable maintenance work is only possible under these conditions.

3.3 Polymer for porous soils

In contrast to the anti-clay agents, the polymers for porous soil create cohesion in order to obtain a pasty soil rheology.

A couple of polymers can be used in porous soils:

Water binding polymers - to dry out (liquid) soils,

Soil structuring polymers - which are useful in loose, coarse soils to change the soil rheology and which prevent sedimentation, Foam stabilizing polymers.

Some polymer formulations are based on hydrocarbon chains and are produced by bacterial fermentation. These polymers are water soluble, biodegradable and compatible with foam surfactants. Both polymer and surfactants are safe when used in the foaming generator, and can therefore be mixed with the foaming solution and pass the foam generator. Polymers also induce a more stable support pressure in the working chamber during boring and when stopping the machine.

All Polymers should be preferably in liquid form to avoid dosing problems and to avoid additional installation to get a solution or suspension out of the powder.

4. SUITABLE SOIL CONDITIONING PRODUCTS

Suitable soil conditioning products should only be those that show the desired functional properties and at the same time are as safe as possible to workers and the environment. This implicates the identification of the acute aquatic toxicity, potential for bioaccumulation, biodegradation and chronic aquatic toxicity and their potential harm through risk assessments. These risk-assessments should be issued by independent and specialised companies only.

5. SITE EXAMPLES

The following chapters introduce 3 TBM sites with difficult geologies, where the soil conditioning performance and ecotoxicological properties lead to success.

5.1 Aviles Sewer (Spain)

The Aviles Site works with a Lovat EBP machine, diameter 3,40 m. After facing stiff clayey silt, the soil changed over a length



Obr. 9 Ražba v písku s pomocí pěny a polymerů
Fig. 9 Sand excavation with Foam & Polymer

kách a provádění úprav vlastností zemin a ekotoxikologických vlastností vedlo k úspěchu.

5.1. Kanalizační stoka v Aviles (Španělsko)

Na stavbě v Aviles pracuje zeminový štít Lovat o průměru 3,40 m. Po průchodu pevnými jílovitými náplaveninami se zemina změnila v asi 1000 m dlouhém úseku na čistý šterkovitý plážový písek s mořskou vodou s tlakem až 3 bary. Křivka zrnitosti je vidět na obr. 7.

U tohoto typu geologie vedlo použití pěny pouze k nesprávnému tlaku v pracovní komoře, nekontrolovanému přítoku vody a velmi malým rychlostem postupu TBM.

Stroj neumožňoval přidávání další výplňové suspension do pracovní komory. Zvláštní instalace by byla příliš nákladná a časově náročná. Alternativním řešením bylo použití dodatečných polymerů, aby se zemina co nejvíce plastifikovala, aby bylo možné vyvinout protitlak proti mořské vodě a snížit obsah vody v zemině. Výsledek, který je vidět na obr. 9, ukazuje ohromnou změnu.

Při výše uvedených úpravách vlastností zeminy, kombinací pěny a polymeru upravujícího strukturu, dosáhl denní postup 27 metrů s maximálním denním postupem 50,50 metru. Pracovní komora byla plně zaplněná s tlakem 3 bary bez problémů s přítokem vody [6, 11].

5.2. Roma 4 Venti (Itálie)

Zeminový štít EPB TBM S-184 o průměru 7,90 m firmy Herrenknecht, použitý sdružením Astaldi/Impregilo JV, pracoval na stavbě železničního tunelu v Římě v Itálii. Po prvním úseku ražby procházející formací pískových usazenin (tufy) se hornina změnila na vysoce lepkavý a přilnavý vatikánský jíla. Aby se překonalo ucpávání řezné hlavy jílem a odstranily se problémy s řízením stroje a zrychlil se postup ražby, bylo nutné použít pěnu v kombinaci s protijílovými přísadami.

Na obr. 10 je prorážka tunelovacího stroje do přijímací šachty – při použití pěny a protijílových přísad byla řezná hlava čistá. Problémy s ucpáváním se daly drasticky zmenšit a rychlost stroje se zvýšila [12, 13].

5.3. Metro v Toulouse (Francie)

Zeminový štít EPB TBM S-208 o průměru 7,72 m firmy Herrenknecht, použitý sdružením Vinci/Eiffage JV, pracoval na stavbě stavebního oddílu 2 prodloužení metra v Toulouse ve Francii. Geologická formace je suchý jílovitý prachovec s čůčkami písku s tlakovou vodou. V homogenním jílu bylo možné razit se strojem v režimu do suchých podmínek, ale sotva se narazilo na čůčky písku, zajištění čela výrubu povolilo a byly pozorovány přítoky vody. To vedlo k celkovému zpomalení postupu, rozsáhlému čištění stroje, problémům s pásovým dopravníkem a v neposlední řadě k pochybám o stabilitě čelby výrubu a o sedání povrchu.

Vytvoření nelepivé a neucpávající se zeminy ve formě pasty která by zcela zaplnila pracovní komoru a zahájení práce v režimu zeminového štítu bylo možné pouze při použití pěny, protijílovému polymeru a vody. Obr. 11 ukazuje kvalitu vytěžené zeminy.

Plnoprofilový tunelovací stroj dosahoval slušné výkony 40–50 mm/min i v režimu zeminového štítu, k přítokům vody již

of approximately 1000m to pure gravely beach sand with a seawater pressure of up to 3,0 bar. The grain size distribution is shown in figure 7:

In this type of geology, the use of foam only resulted in incorrect pressure in the working chamber, uncontrolled water inflow and very slow TBM advance rates.

There was no possibility on the machine to introduce additional filler suspension into the working chamber. An extra installation had been too costly and too time intensive. The alternative solution was to use additional polymers – in order to make the soil as plastic as possible to be able to install a counter pressure against the seawater and to reduce the water content of the outcoming soil. The result is shown in figure 9 and visualises the tremendous change.

With the above mentioned soil conditioning, a combination of foam and structuring polymer, the average daily progress achieved 27 meters with a maximum daily performance of 50,50 meters with fully filled and pressurized working chamber up to 3 bars and without any trouble with water income.

Details concerning this jobsite are given by Fernandez 2002 and Langmaack 2001.

5.2 Roma 4 Venti (Italy)

The Herrenknecht 7,90 m diameter EPB TBM S-184 operated by Astaldi / Impregilo JV was working on the Rail Link Tunnel project in Rome, Italy. After heading first through silty sand (tuff) formation, the ground later changed into very sticky and adhesive Vatican Clay. In order to overcome clay clogging at the cutterhead and stirring problems as well as very low advance rates, it was necessary to use foam in combination with anti-clay additives.

Figure 10 shows the TBM breakthrough in the reception shaft with a clean cutterhead, using foam and anti-clay additives. The clogging problems could be drastically reduced and the TBM speed increased. Further project details are given by Marchionni et al. 2002 and MBT Online Roma 4 Venti.

5.3 Toulouse Metro (France)

The Herrenknecht 7,72 m diameter EPB TBM S-208 operated by Vinci / Eiffage JV was working on the Toulouse metro extension project Lot 2 in France. The geologic formation is dry clayey silt with incorporated sand lenses under water pressure. In homogenous clay formation it was possible to excavate in dry mode under air pressure, but as soon as the sand lenses were hidden, the face support collapsed and water ingress was observed. This resulted in overall slow advance rates, extensive TBM cleaning, conveyor belt difficulties and last but not least in doubts on face stability and surface settlements.

Only by using foam and anti-clay polymer together with water it was possible to create a non adhesive, non-clogging soil paste to fill the working chamber completely and work in EPB mode. Figure 11 illustrates the quality of the excavated soil.



Obr. 10 Čistá řezná hlava po prorážce
Fig. 10 Clean cutterhead after breakthrough



Obr. 11 Plastická ale nelepivá zemina po vytěžení
Fig. 11 Plastic but not adhesive soil after excavation

nedocházelo a bylo možné zajistit podepření čela výrubu. Na obr. 12 je vidět čistou řeznou hlavu po prorážce TBM.

6. ZÁVĚR

Jak bylo ukázáno na příkladech ze staveb, plnoprofilový tunelovací stroj může procházet úspěšně a rychle i obtížnými geologickými podmínkami. Kromě správné volby TBM je rozhodující použití správných přísad pro úpravu vlastností zeminy – pro velmi propustnou zeminu pod hladinou spodní vody i pro jílovitou zeminu potenciálně schopnou ucpávání nebo lepidlosti.

Všechny přísady použité na uvedených stavbách prošly přísným posouzením vlivu na pracovníky a životní prostředí. Ani v tunelech, ani na skládkách nebyl negativní vliv přísad pro úpravu vlastností zeminy pozorován.

DIPL.-ING. LARS LANGMAACK,
lars.langmaack@basf.com, **BASF CONSTRUCTION**
CHEMICALS (EUROPE) LTD, ZÜRICH,
ING. MICHAL ZÁMEČNÍK, michal.zamecnik@basf.com,
BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA, s. r. o.

Recenoval: Doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.



Obr. 12 Čistá řezná hlava po prorážce
Fig. 12 Clean cutterhead after breakthrough

The TBM showed reasonable advance rates of 40–50mm/min also in the EPB mode, no water ingress occurred any more and the face support could be secured. Figure 12 shows the clean cutterhead after the TBM breakthrough.

6. CONCLUSION

As demonstrated by the site examples, it is possible to drive a TBM successfully and rapidly also through difficult geologies. In addition to the choice of a well adopted TBM machine, the use of the right soil conditioning additives is vital - for very permeable soil under the water table as well as for clay soil with high clogging and adhesion potential.

All additives used in the site examples passed a strict risk assessment study to ensure minimum impact on workers and the environment. Neither during construction nor at the disposal sites negative influence of the soil conditioning additives could be observed.

DIPL.-ING. LARS LANGMAACK,
lars.langmaack@basf.com, **BASF CONSTRUCTION**
CHEMICALS (EUROPE) LTD, ZÜRICH,
ING. MICHAL ZÁMEČNÍK, michal.zamecnik@basf.com,
BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA, s. r. o.

LITERATURA / REFERENCES

- MEYCO Online Madrid MetroSur www. ugc.basf.com
- Bentz a kol. 1997: *Optimierung des schaumgestützten EPB-Vortriebs*, Boulevard Périphérique Nord de Lyon. STUVA Tagung Berlin 1997, Alba Verlag Berlin, 1998, svazek 37, str. 88, ISBN 3 87094 6369
- Gabarró a kol. 2003: *Metro Barcelona Trasa 9 – největší stavba metra pomocí velkopřůměrových tunelovacích strojů*. ITA 2003 Amsterdam, str. 637 ff, Balkema ISBN2: 90 5809 542 8
- Rehm 2004: *Maschinellet Tunnelvortrieb unter sehr schwierigen geologischen Verhältnissen*. Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Győr, str. 99 ff
- Grandori a kol. 2003: *Systémy metra v Turinu – Návrh a provoz zeminových štítů za hranic možností této technologie*. Felsbau 21 (2003), č. 6, str. 34 ff
- Fernandez 2002: *Kanalizační stoka v Aviles, tunel pod úrovní hladiny mořské vody*. AFTES 2002 Toulouse, str. 131 ff, Specifique ISBN 951 04 16 2 4
- Babendererde 2003: *TBM mit Slurry- oder Erddruckstützung – Einsatzbereiche und Zuverlässigkeitsanalyse*. Felsbau 21 (2003), č. 5, str. 155 ff
- Herrenknecht a kol. 2003: *Geotechnische und mechanische Interaktion beim Einsatz von Erddruckschilden im Fels*. STUVA Tagung 2003, Dortmund, str. 175 ff, Bauverlag ISBN 3 7625 3602 3
- Steiner a kol. 1994: *Zajištění čela výrubu u velkého smíšeného štítu v heterogenních horninových podmínkách*. Proc. of Tunnelling '94. London: Chapman & Hall
- Langmaack 2000: *Zdokonalená technologie úpravy vlastností zemin*. North American Tunnelling Congress, Boston 2000, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 2000, str. 525, ISBN 90 5809 162 7
- Langmaack 2001: *Použití nových přísad při ražbě tunelovacími stroji*. BAUMA 2001, 6. mezinár. sympozium k tunelovým stavbám. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2001, str. 27, ISBN 3 7739 5964 8
- Marchionni a kol. 2002: *Galleria Quattro Venti v Římě*. Tunnel č. 8, 2002, str. 8 ff
- MEYCO Online Roma 4 Venti www. ugc.basf.com
- Jancsecz a kol. 1999: *Výhody úpravy vlastností zemin při štítování*. Zkušenosti ze stavby lehkého metra v Izmiru. ITA 1999 Oslo, str. 865 ff., Balkema ISBN 90 5809 063 9
- Langmaack 2004: *EPB-Vortrieb in inhomogenen Böden: Möglichkeiten neuer Konditionierungsmittel*. Tunnel- und Tiefbautagung 2004, Győr, str. 121 ff