

TUNEL ANNEBERG–SKANSTULL

ANNEBERG–SKANSTULL TUNNEL

JIŘÍ UMLAUF, JAN VESELÝ

ABSTRAKT

Společnost Amberg Engineering působí na skandinávském trhu od roku 2010 a během této doby se podílela na řadě významných projektů. Jedním z nich je kabelový tunel Anneberg–Skanstull, který propojí severní a jižní část města Stockholm a pomůže posílit přenosovou soustavu v metropoli. Tunel je ražen otevřeným TBM do pevných hornin (Gripper TBM), tj. technologií, která je ve Skandinávii nasazována jen zřídka. Tento článek podává základní přehled o projektu a zaměřuje se na aspekty, které ho odlišují od podobných projektů ve střední Evropě.

ABSTRACT

Amberg Engineering has been active in the Scandinavian market since 2010 and has participated in a number of important projects during that time. One of them is the Anneberg–Skanstull cable tunnel, which will connect the northern and southern parts of the city of Stockholm and help strengthen the transmission system in the metropolis. The tunnel is driven by an open TBM in hard rock (Gripper TBM), i.e. a technology that is rarely used in Scandinavia. This article provides a basic overview of the project and focuses on aspects that distinguish it from similar projects in Central Europe.

1 ÚVOD

Rostoucí poptávka po stabilních dodávkách elektrické energie vyžaduje posílení stávající přenosové soustavy, což v kombinaci s rostoucí cenou pozemků vede v mnoha evropských městech k nahrazování nadzemních vedení podzemními. Hlavní město Švédska není výjimkou. Místní provozovatel přenosové soustavy, společnost Svenska kraftnät, realizuje v stockholmské metropolitní oblasti řadu projektů, které mají poptávku po elektrické energii uspokojit. Jedním z nich je kabelový tunel Anneberg–Skanstull.

Společnost Amberg Engineering se na tomto projektu podílí od roku 2019 jako projektant zajištění tunelu a TBM konzultant. V současné době, kdy se projekt nachází v realizační fázi, je společnost zodpovědná za analýzu dat zaznamenaných TBM v průběhu ražby tunelu. Tento článek předkládá obecný přehled o stavbě, uvádí poznatky z projekční fáze a stručně shrnuje zkušenosti z fáze realizační.

2 TUNEL ANNEBERG–SKANSTULL

Tunel Anneberg–Skanstull je tunel pro 400 kV elektrické vedení ražený ve švédské metropoli Stockholm. Tunel spojuje severní rozvodnu Anneberg v obci Danderyd s jižní rozvodnou Skanstull, která se bude nacházet v stockholmské čtvrti Södermalm. Mimo jiné budovy a rezidenční oblasti tunel podchází pod významnou nemocnici v Danderyd, Stockholmskou univerzitou a Královským technologickým institutem.

Plánovaná délka tunelu je 13,4 km a ražba se provádí pomocí otevřeného Gripper TBM. Pro větrání, odvádění tepla generovaného kabely vysokého napětí a čerpání podzemní vody je navrženo celkem šest šachet. V závislosti na hloubce a geologických podmínkách jsou šachty hloubeny buď metodou Drill and Blast, nebo metodou Raise Boring. Situace stavby je schematicky zobrazena na obr. 1 a ilustrováný podélný profil na obr. 2.

1 INTRODUCTION

The growing demand for stable electric power supply requires strengthening of the existing transmission system, which, in combination with the rising cost of land, is leading to the replacement of overhead lines by underground lines in many European cities. The capital of Sweden is no exception. The local transmission system operator, Svenska kraftnät, is realizing a number of projects in the Stockholm metropolitan area to meet the demand for electricity. One of them is the Anneberg–Skanstull cable tunnel.

Amberg Engineering has been involved in this project since 2019 as a tunnel support designer and TBM consultant. Currently, when the project is in the construction phase, the company is responsible for analyzing the data recorded by the TBM during the tunnel excavation. This article presents a general overview of the construction, presents findings from the design phase and briefly summarizes the experience from the construction phase.

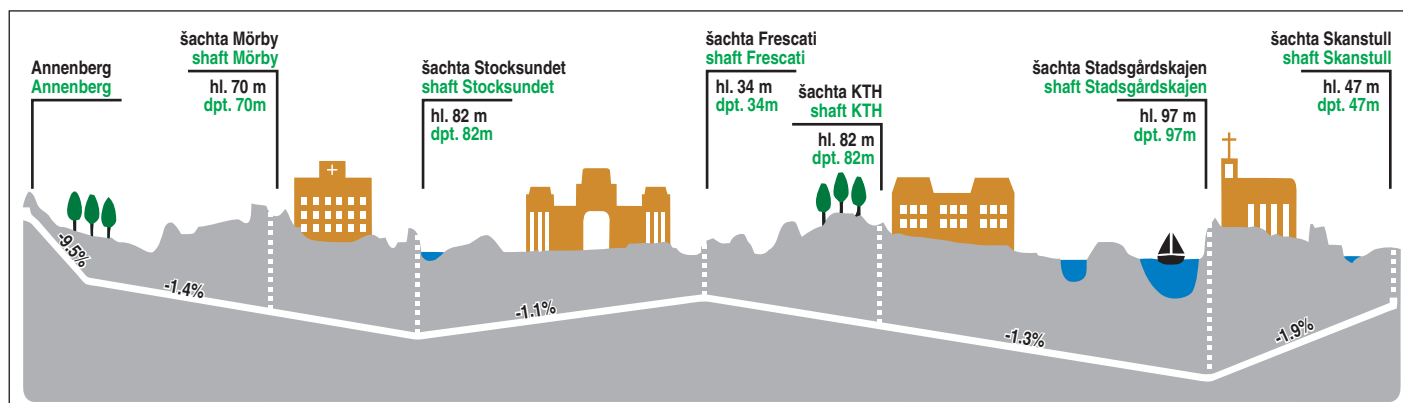
2 ANNEBERG–SKANSTULL TUNNEL

The Anneberg–Skanstull tunnel is a 400kV power line tunnel excavated in the Swedish capital Stockholm. The tunnel connects the northern substation Anneberg station in the municipality of Danderyd with the southern substation Skanstull, which will be located in Stockholm's Södermalm district. Among other buildings and residential areas, the tunnel passes under the prominent hospital in Danderyd, Stockholm University and the Royal Institute of Technology.

The planned length of the tunnel is 13.4km and excavation is carried out using an open Gripper TBM. A total of six shafts are designed for ventilation, removal of heat generated by high voltage cables and groundwater pumping. Depending on the depth and geological conditions, shafts are excavated either by



zdroj: Svenska kraftnät source: Svenska kraftnät
Obr. 1 Schematic situation plan
Fig. 1 Schematic situation plan



zdroj: Svenska kraftnät source: Svenska kraftnät

Obr. 2 Schematický podélný řez
Fig. 2 Schematic longitudinal section

Tab. 1 Klíčové informace o projektu
Tab. 1 Key project information

Umístění stavby Construction location	Stockholm, Švédsko Stockholm, Sweden
Tunelovací metoda Tunneling method	otevřený Gripper TBM Open Gripper TBM
Celková délka tunelu Total length of the tunnel	13,4 km 13.4km
Průměr tunelu Tunnel diameter	5 m 5m
Geologie Geology	žula, rula, metabazit granite, gneiss, metabasite
Zhotovitel Contractor	sdužení Hochtief – Implenia Hochtief – Implenia Joint Venture
Zahájení ražby Start of excavation	únor 2020 February 2020

2.1 Geologické podmínky

Minimální skalní nadloží tunelu je 16 m, celkové nadloží včetně kvartérních pokryvů se pohybuje v rozmezí 20 až 120 m. Geologické podmínky jsou na středoevropské poměry mimořádně příznivé. Horninové prostředí je tvořeno převážně masivní žulou, rulou nebo metabazitem. Dle geologického průzkumu je masiv na více než 85 % trasy tunelu hodnocen indexem GSI > 60.

Poruchové zóny jsou charakterizovány alterovanými a tektonicky porušenými horninami s hodnocením GSI < 37. Predikovány jsou přibližně na 4 % z celkové délky tunelu. Nejnáročnějšími geologickými podmínkami bude tunel procházet ve staničení 11+460 – 11+575, kde ražba podchází pánve Baltského moře. Tato oblast je nazývána Strömmen a vyznačuje se silně rozpukanými a alterovanými horninami s diskontinuitami vyplněnými objemově nestálými jíly. Fotografie výnosu vrtného jádra z průzkumného vrtu v této oblasti je uvedena na obr. 3.

2.2 Tunelovací stroj

Tunelovací stroj vyrobený společností Herrenknecht byl v souladu s účelem tunelu pojmenován Elektra. Hlavní část stroje má délku 23,5 m, hmotnost 355 tun a skládá se z řezné hlavy, krátké ochranné obálky, vrtné soupravy a dvojce radiálních lisů. Za ním následuje návěs – 16 vagonů s podpurnými systémy o celkové délce přibližně 220 m. Logistiku a zásobování materiálem zajišťuje víceúčelové vozidlo na pneumatikách, speciálně navržené pro stísněný prostor raženého tunelu a tunelovacího stroje.

Razicí hlava tvořená jedním segmentem je osazena 28 řeznými disky o průměru 48 cm, z nichž každý má hmotnost přibližně

the Drill and Blast method or by the Raise Boring method. The situation of the construction site is shown schematically in Fig. 1 and the illustrated longitudinal profile in Fig. 2.

2.1 Geological conditions

The minimum rock cover of the tunnel is 16m, the total overburden including Quaternary covers ranges from 20 to 120m. Geological conditions are extremely favorable compared to Central European standards. The rock consists mainly of massive granite, gneiss or metabasite. According to the geological survey more than 85% of the rock along the tunnel route is rated with a GSI index > 60.

Fault zones are characterized by metamorphic and tectonically fractured rocks with a GSI < 37. They are predicted to be approximately 4% of the total length of the tunnel. The tunnel will pass through the most demanding geological conditions at stationing 11+460 – 11+575, where the excavation runs under the Baltic Sea basin. This area is called Strömmen and is characterized by highly fractured and metamorphosed rocks with discontinuities filled with volumetrically unstable clays. A photo of the rock core from an exploratory borehole in this area is shown in Fig. 3.

2.2 Tunneling machine

The tunneling machine manufactured by Herrenknecht was named Elektra in accordance with the purpose of the tunnel. The main body of the machine is 23.5m long, weighs 355 tons and consists of a cutting head, a short shield, a drill rig and a pair of radial grippers. It is followed by a trailing gantries – 16 wagons with support systems with a total length of approximately 220m.

Tab. 2 Klíčová technická data TBM
Tab. 2 TBM key technical data

Výrobce Manufacturer	Herrenknecht Herrenknecht
Název TBM Name TBM	Elektra Elektra
Jmenovitý průměr (s novými řeznými disky) Nominal diameter (with new cutting discs)	5,03 m 5.03m
Teoretická rychlost postupu Theoretical advance speed	200 mm/min 200mm/min
Hlavní pohon Main drive	2 100 kW (6 × 350 kW) 2,100kW (6 × 350kW)
Rychlost Cutterhead speed	0–12 otáček za minutu 0–12rpm
Maximální kroutící moment Maximum torque	3 159 kNm 3,159kNm
Celková délka (s návěsem) Total length (with gantries)	cca 240 m approx. 240m

180 kg. Pro ochranu řezné hlavy a personálu před možným pádem horninových bloků je instalována 6 m dlouhá ochranná obálka (tzv. finger shield – viz obr. 4). Spodní část obálky je teleskopická a slouží jako posuvná rozpěra, která pomáhá stabilizovat stroj proti vibracím při ražbě.

Rozpěrný systém je tvořen dvojicí radiálních lisů, kterými se stroj přes přítlačné desky opírá o stěny tunelu. Ve vhodných geologických podmínkách může systém vyvinout přítlačnou sílu až 14,25 MN a rozpěrnou sílu 36 MN. Maximální délka jednoho záběru je 2 m.

Stroj umožňuje instalovat zajištění výrubu ve dvou oblastech, L1 a L2. Oblast L1 se nachází přímo za razicí hlavou a ochrannou obálkou, tedy přibližně ve vzdálenosti 6 m za čelbou. V tomto úseku je TBM vybaveno vrtnou soupravou pro osazení svorníků a realizaci průzkumných a injektážních vrtů. Dále se zde nachází také erektor pro montáž KARI sítí a ocelových rámců ze zakružených válcovaných profilů. Instalace stříkaného betonu v oblasti L1 je možná pouze manuálně. V oblasti L2, přibližně 26 m za čelbou tunelu je osazen robotický systém pro instalaci stříkaného betonu s integrovaným sběračem spadu. Systém umožňuje automatické nanášení stříkaného betonu v rozmezí mezi 8 a 4 hodinou, na délce 6 m. Obě oblasti jsou znázorněny na obr. 4.

2.3 TBM Elektra vs. Nobel

Ve vlasti slavného Alfreda Nobela, vynálezce dynamitu, se tunelovací stroje stále používají jen zřídka. Tradiční metoda Drill and Blast je obvykle upřednostňována kvůli své flexibilitě a v příznivé skandinávské geologii také vysoké produktivitě. Pro tento typ projektu je však ražba pomocí TBM vhodnou alternativou a byla zvolena z následujících důvodů:

- Rubanina je přepravována pomocí pásového dopravníku, díky čemuž odpadá nutnost razit přístupové tunely. Rubanina se z dopravníku nakládá přímo na nákladní automobily ve startovací kaverně Anneberg, čímž se eliminuje prašnost a negativní dopady spojené s přepravou vytěženého materiálu přes centrum města.
- Tunel je ražen pod hustě obydlenou oblastí, kde legislativa stanovuje přísné limity hluku a vibrací. Zde je výhodou TBM rychlejší postup ražby, což vede ke snížení hlukové zátěže obyvatel.
- Ražba pomocí TBM eliminuje seismické účinky spojené s trhacími pracemi. Metoda je šetrnější a bezpečnější pro citlivé budovy na povrchu.

2.4 Hlavní výzvy projektu

Výjimečná kvalita horninového masivu je pro ražbu příznivá z hlediska mechaniky hornin. Extrémní tvrdost, v kombinaci s pevností v tlaku přesahující 200 MPa, jde ruku v ruce s vysokou abrazivitou. To snižuje rychlost postupu a klade zvýšené nároky na řezné disky.

Tyto geologické podmínky jsou také velmi příznivé pro přenos ražbou způsobených vibrací a hluku do konstrukcí na povrchu. Přísné limity vyžadují rozsáhlý akustický monitoring a omezení pracovní doby při ražbě pod hustě obydlenými oblastmi.

Vzhledem k použité technologii ražby tunelu a místním zvyklostem není tunel navržen s vodotěsným ostěním. Přítoky vody do tunelu jsou omezeny pouze předstihovou injektáží. Místní orgány ochrany životního prostředí stanovily relativně přísné limity na kumulativní přítok vody do tunelu, což v kombinaci s vysokým hydrostatickým tlakem (až 12 bar) činí injektáž značně náročnou.



Obr. 3 Vrtné jádro – oblast Strömmen
Fig. 3 Drill core – Strömmen area

Logistics and material supply is provided by a multi-purpose vehicle on tires, specially designed for the confined space of the driven tunnel and the tunneling machine.

The cutterhead consisting of one segment is equipped with 28 cutting discs with a diameter of 48cm, each of which has a weight of approximately 180kg. A 6m long protective envelope (so-called finger shield – see Fig. 4) is installed to protect the cutting head and personnel from the possible rock fall. The lower part of the envelope is telescopic and serves as a sliding shoe that helps to stabilize the machine against vibrations during excavation.

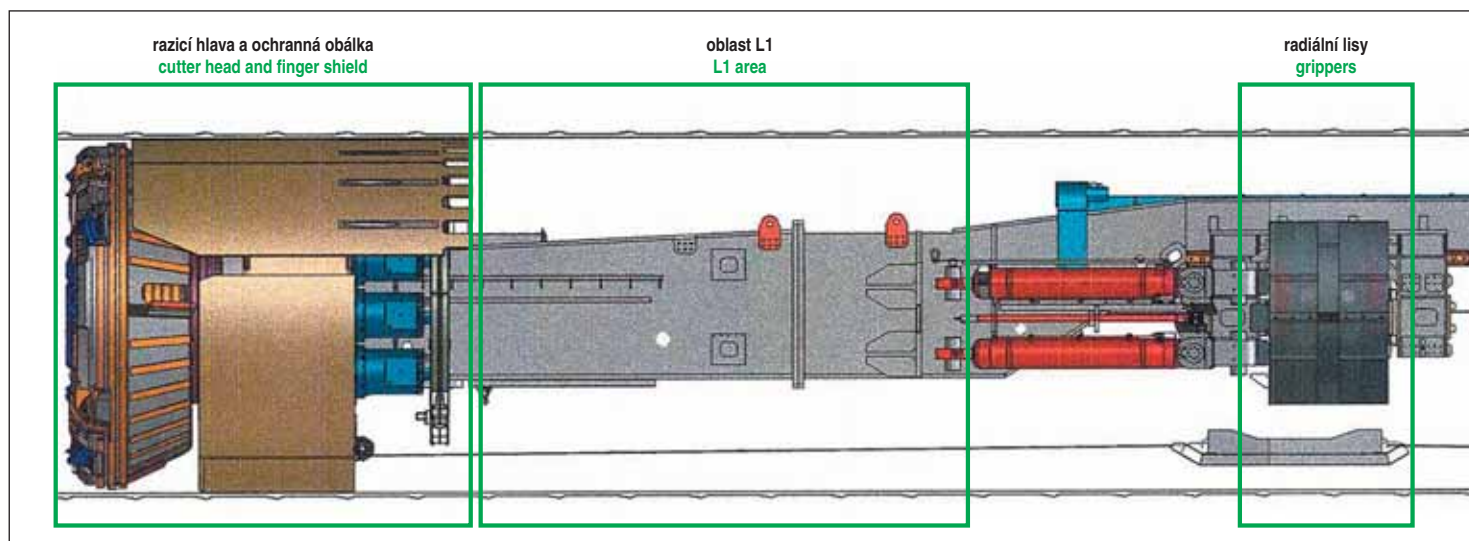
The bracing system consists of a pair of radial grippers, with which the machine braces against the tunnel walls via gripper shoes. In suitable geological conditions, the system can develop a thrust force of up to 14.25MN and a bracing force of 36MN. The maximum length of one stroke is 2m.

The machine allows to install excavation support in two locations, L1 and L2. The L1 location is located directly behind the cutterhead and protective envelope, i.e. approximately 6m behind the face. In this section, the TBM is equipped with a drill rig for the installation of bolts and for the drilling of exploratory and grouting boreholes. There is also an erector for the assembly of wire meshes and curved frames made of steel rolled profiles. Only manual installation of shotcrete in the L1 location is possible. In the L2 location, approximately 26m behind the tunnel face, a robotic system for the installation of shotcrete with an integrated shotcrete rebound collector is installed. The system enables the automatic application of sprayed concrete between 8 and 4 o'clock, over a length of 6m. Both locations are shown in Fig. 4.

2.3 TBM Elektra vs. Nobel

In the homeland of the famous Alfred Nobel, the inventor of dynamite, tunneling machines are still rarely used. The traditional Drill and Blast method is usually preferred due to its flexibility and also high productivity, in the favorable Scandinavian geology. However, TBM excavation is a suitable alternative for this type of project and was chosen for the following reasons:

- The muck is transported using a belt conveyor, which eliminates the need to excavate access tunnels. The muck is loaded from the conveyor directly onto trucks in the Anneberg start-up cavern, thereby eliminating the dust and negative impacts associated with the transport of excavated material through the city center.
- The tunnel is excavated under a densely populated area where legislation sets strict noise and vibration limits. Here, the advantage of the TBM is the faster mining progress, which leads to a reduction in the noise burden of residents.



Obr. 4 Části TBM L1 a L2
Fig. 4 TBM work locations L1 and L2

3 ZAJIŠTĚNÍ TUNELU

V realizační fázi projektu byl optimalizován návrh zajištění tunelu tak, aby byla zohledněna specifika konkrétního tunelovacího stroje. Celkem bylo navrženo následujících pět technologických tříd:

- SC I (GSI 100–60) – žádné systematické zajištění, pouze kotvení potenciálně nestabilních bloků svorníky;
- SC II (GSI 59–45) – v oblasti L1: svorníky v rastru 2,2 × 1,5 m, KARI síť D5 75 × 75, v oblasti L2: 50 mm stříkaného betonu na 180°;
- SC III (GSI 44–30) – v oblasti L1: svorníky v rastru 2,2 × 1,0 m, KARI síť D5 75 × 75, v oblasti L2: 100 mm stříkaného betonu na 220°;
- SC IV (GSI 29–20) – v oblasti L1: svorníky v rastru 2,2 × 1,0 m, KARI síť D5 75 × 75 a rám UPN 140 na 110°, v oblasti L2: 100 mm stříkaného betonu na 220°;
- SC V (GSI 19–10) – v oblasti L1: svorníky v rastru 2,2 × 1,0 m, KARI síť D5 75 × 75 a rám HEA 160 na 360°, v oblasti L2: 200 mm stříkaného betonu na 360°.

Návrh zajištění tunelu musí zohlednit omezení daná konstrukcí TBM. Zejména komplikovanou manuální aplikaci stříkaného betonu v oblasti L1, které je třeba se v ideálním případě vyhnout. Proto jsou v oblasti L1 jako primární zajištění instalovány KARI sítě kotvené

- TBM excavation eliminates the seismic effects associated with blasting. The method causes less disturbance and is safer for sensitive buildings on the surface.

2.4 The main challenges of the project

The exceptional quality of the rock mass is favorable for excavation from the point of view of rock mechanics. However, extreme hardness, combined with compressive strength exceeding 200MPa, goes hand in hand with high abrasiveness. This reduces the advance rate and has increased demands on the cutting discs.

The geological conditions also allow propagation of excavation-induced vibrations and noise to structures on the surface. Strict limits require extensive acoustic monitoring and working time restrictions when excavating under densely populated areas.

Due to the tunnel excavation technology used and local customs, the tunnel is not designed with a waterproof lining. Water inflows into the tunnel are controlled only by pre-grouting. Local environmental protection authorities have set relatively strict limits on the cumulative inflow of water into the tunnel, which combined with high hydrostatic pressure (up to 12 bar) makes grouting quite challenging.

3 TUNNEL SUPPORT

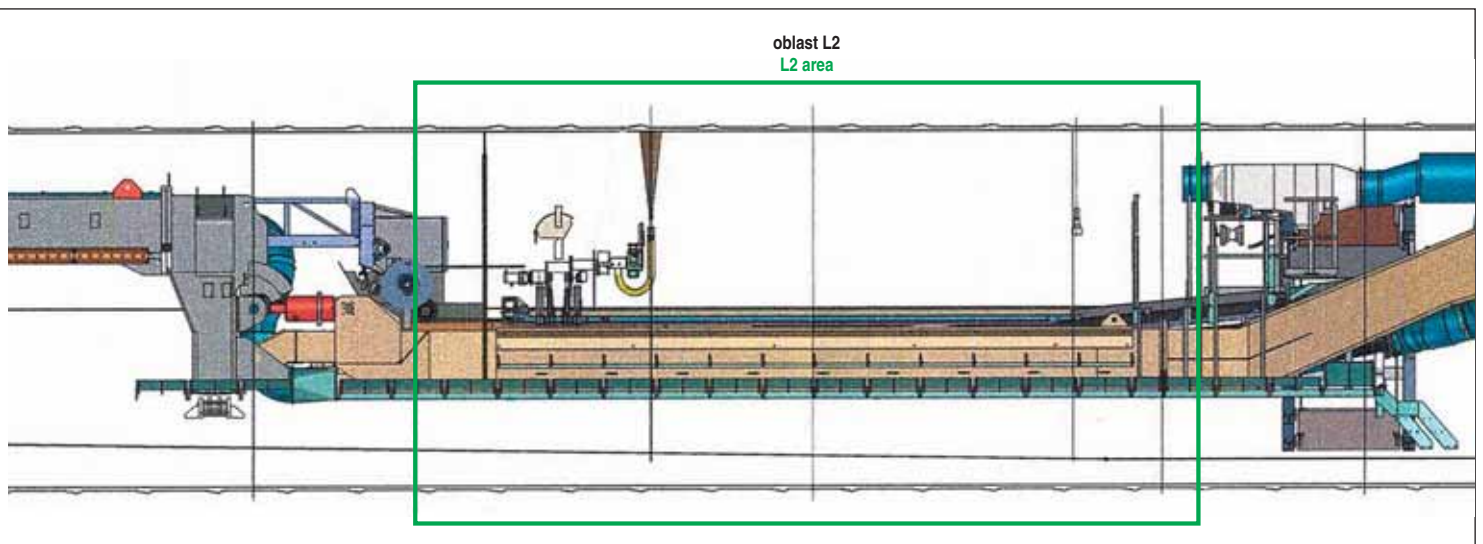
In the construction phase of the project, the design of tunnel support was optimized to take into account the tunneling machine specifics. The following five technology classes were proposed:

- SC I (GSI 100–60) – no systematic support, only bolting of potentially unstable blocks;
- SC II (GSI 59–45) – in location L1: bolts in grid 2.2 × 1.5m, wire mesh D5 75 × 75, in location L2: 50mm shotcrete at 180°;
- SC III (GSI 44–30) – in location L1: bolts in grid 2.2 × 1.0m, wire mesh D5 75 × 75, in location L2: 100mm shotcrete at 220°;
- SC IV (GSI 29–20) – in location L1: bolts in grid 2.2 × 1.0m, wire mesh D5 75 × 75 and frame UPN 140 at 110°, in location L2: 100mm of shotcrete at 220°;



zdroj: DSI Underground source: DSI Underground

Obr. 5 CT svorník
Fig. 5 CT bolt



zdroj: Herrenknecht source: Herrenknecht

svorníky. V závislosti na rastru svorníků může KARI síť D5 75 × 75 stabilizovat horninový blok o tíze až 15 kN a tím eliminovat další rozvolňování horninového masivu v blízkosti výrubu [1]. V nepříznivých geologických podmínkách (technologické třídy SC IV a SC V) jsou síť kombinovány s ocelovými rámy ze zakružených válcovaných profilů UPN 140 a HEA 160.

Specifické požadavky jsou kladeny také na svorníky. Svorník musí být únosný ihned po instalaci, zároveň ale musí být dostatečně ochráněn proti korozi, aby byla garantována jeho funkce po celou dobu životnosti tunelu. To vede k použití kombinovaných CT svorníků. Svorník je ihned po instalaci v oblasti L1 ukotven mechanicky pomocí expanzní hmoždinky. Později se v oblasti L2 svorník injektuje pomocí injektážního adaptéru. Dále je svorník opatřen polyethylenovou manžetou, která společně s cementovou zálivkou poskytuje dostatečnou protikorozi ochranu. CT svorník je zobrazen na obr. 5.

4 STATICKÉ VÝPOČTY

Globální stabilita tunelu byla ověřena 2D numerickou analýzou. Každá technologická třída byla ověřena pro odpovídající geotechnické parametry, minimální nebo maximální nadloží a gravitační nebo změřenou primární napjatost. Každá třída tedy byla posouzena celkem čtyřmi numerickými výpočty.

V kvalitních skandinávských horninách ale není kolaps tunelu v důsledku velkých deformací a vyčerpání únosnosti zajištění výrubu příliš častý. Pravděpodobnějším způsobem porušení je vypadnutí nestabilního horninového bloku z klenby nebo opěří tunelu. Uvolnění jednoho bloku pak může vést k postupnému rozvolnění horninového masivu v okolí výrubu, narušení nosného horninového prstence a celkové ztrátě stability.

Kinematická stabilita potenciálně nestabilních bloků vzniklých nepříznivou orientací diskontinuit byla ověřena analýzou v software UnWedge (Rocscience). Každá technologická třída byla ověřena v oblasti L1, tedy s dočasným zajištěním, a v oblasti L2 s instalovaným finálním zajištěním. Při posouzení finálního zajištění byly konzervativně zanedbány účinky primárních napětí, které mají na nestabilní blok příznivý účinek. Na obr. 6 je jako příklad výstupu z analýzy uvedeno posouzení technologické třídy SC III v oblasti L1, tedy se zahrnutým vlivem primárních napětí.

5 POSTUP RAŽBY TUNELU

V době psaní tohoto článku byla vyražena více než polovina tunelu (7,3 km v červenci 2023). Pro koordinaci všech zainteresovaných osob je každé dva týdny pořádán tzv. „production meeting“,

- SC V (GSI 19–10) – in location L1: bolts in grid 2.2 × 1.0m, wire mesh D5 75 × 75 and HEA 160 frame at 360°, in location L2: 200mm of shotcrete at 360°.

The tunnel support design must take into account the limitations imposed by the TBM structure. In particular, the complicated manual application of shotcrete in the L1 location, which should be avoided. Therefore, bolted wire meshes are installed in the L1 location as primary support. Depending on the grid of the bolts, wire mesh D5 75 × 75 can stabilize a rock block weighing up to 15kN and thus eliminate further rock loosening in the vicinity of excavation [1].

In unfavorable geological conditions (support classes SC IV and SC V), the meshes are combined with round frames from steel rolled profiles UPN 140 and HEA 160.

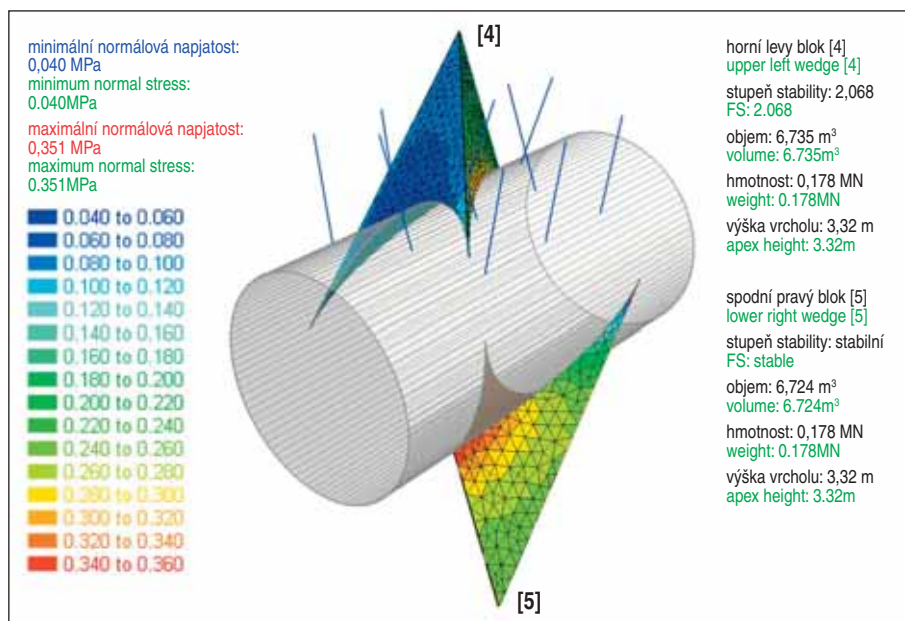
Specific requirements are also placed on bolts. The bolt must be load-bearing immediately after installation, but at the same time it must be sufficiently protected against corrosion in order to guarantee its function throughout the lifetime of the tunnel. This leads to the use of combination CT bolts. Immediately after installation, the bolt is mechanically anchored in the L1 location using an expansion shell. Later, in the L2 location, the bolt is injected using an injection adapter. Furthermore, the bolt is equipped with a polyethylene sleeve, which, together with the cement grout, provides sufficient anti-corrosion protection. The CT bolt is shown in Fig. 5.

4 STATIC CALCULATIONS

The global stability of the tunnel was verified by 2D numerical analysis. Each support class was verified for the corresponding geotechnical parameters, minimum or maximum overburden and geostatical or measured primary stresses. Therefore, each class was verified with a total of four numerical calculations.

However, in high-quality Scandinavian rocks, tunnel collapse due to large deformations or by exceeding the support bearing capacity is not very common. A more likely failure mode is the fall of an unstable rock block from a tunnel vault or abutment. The loosening of one block can then lead to the gradual loosening of the rock mass around the excavation, disruption of the rock arching and a total loss of stability.

The kinematic stability of potentially unstable blocks created by the unfavorable orientation of discontinuities was verified by analysis in the UnWedge software (Rocscience). For each technology class, the primary support was verified in the L1 location, and the final support in the L2 location. The impact of



Obr. 6 Kinematická stabilita horninového bloku

Fig. 6 Kinematic stability of a rock block

což je obdoba rady monitoringu známé z českých tunelových staveb. Na těchto schůzkách se diskutuje hydrogeologický a akustický monitoring, injektáž a měření přítoků vody do tunelu a v neposlední řadě také instalované zajištění tunelu v kontextu dat zaznamenaných v průběhu ražby TBM.

V následující části příspěvku jsou stručně shrnuty postřehy projektanta z realizační fáze díla.

5.1 Injektáž a opatření pro omezení přítoků do tunelu

Většina budov ve Stockholmu a blízkém okolí je založena na vrstvách mořských jííl, kde i malý pokles pórových tlaků může vyvolat významné sedání s důsledky na infrastrukturu a budovy na povrchu. Aby se těmto negativním dopadům výstavby tunelu zabránilo, jsou místními orgány ochrany životního prostředí stanoveny limity pro kumulativní přítok vody do tunelu. Dodržování těchto limitů je kontrolováno jak v průběhu výstavby, tak po celou životnost tunelu.

Dlouhodobý limit kumulativního přítoku je stanoven v průměru 10 l/min na 100 m tunelu a liší se v závislosti na lokální míře rizika. Jedná se o poměrně přísný požadavek, jehož výsledkem je téměř suchý tunel. Aby byly tyto požadavky splněny, realizují se každých 15 m vějíř předstihové injektáže do předpolí čelby (tzv. „pre-grouting“). Délka injektážních vrtů je až 25 m a injektáž se řídí podle časových, průtokových a tlakových kritérií na základě požadované injektážní třídy. V místech, kde předstihová injektáž nepostačuje pro splnění limitů, je realizována dodatečná injektáž za TBM (tzv. „post-grouting“).

Injektáže jsou ve Skandinávii samostatným oborem a na jejich návrhu a realizaci se podílí týmy vysoce specializovaných inženýrů. Jedná se tedy o komplikovanou problematiku, jejíž rozsah by vydal na samostatný článek.

5.2 Průzkumné vrty a vodní tlakové zkoušky

Každých 18 metrů ražby se pomocí vrtné soupravy osazené v L1 provádí 25 m dlouhé rozbíhavé dovrchní vrty pod úhlem 5,5°. Tyto vrty slouží k provádění vodních tlakových zkoušek a zároveň také k predikci vlastností horninového masivu.

Během vrtání jsou pomocí systému MWD („Measure While Drilling“) zaznamenávány jeho parametry, jako rychlost otáčky nebo přítlak. Následně jsou tato data interpretována a analyzována. Z dat

insitu stress, which have a favorable influence on the rock block stability, was conservatively neglected in the verification of the final support. Fig. 6 shows the verification of technology class SC III in the L1 location as an example of the analysis output, i.e. with the insitu stress included.

5 TUNNELING ADVANCE

At the time of writing this paper, more than half of the tunnel has been driven (7.3km by July 2023). For the coordination of all interested parties, a so-called “production meeting” is held every two weeks, which is similar to the monitoring board known in Czech tunnel construction. At these meetings, hydrogeological and acoustic monitoring, grouting and measurement of water inflows into the tunnel and, last but not least, also the installed tunnel support are discussed in the context of the data recorded during TBM excavation.

In the following, the designer’s observations of the construction phase are briefly summarized.

5.1 Grouting and measures to limit inflows into the tunnel

Most of the buildings in and around Stockholm are founded on layers of marine clays, where even a small drop in pore pressures can cause significant settlement with consequences for infrastructure and buildings on the surface. To prevent these negative impacts of tunnel construction, local environmental protection authorities set limits for the cumulative inflow of water into the tunnel. Adherence to these limits is checked both during construction and throughout the lifetime of the tunnel.

The long-term cumulative inflow limit is set at an average of 10L/min per 100m tunnel and varies depending on the local level of risk. This is a fairly strict requirement, resulting in an almost dry tunnel. In order to meet these requirements, fan-shaped grouting is carried out every 15m in the forefield of the face (so-called “pre-grouting”). The length of the grouting boreholes is up to 25m and the grouting is controlled by the time, flow and pressure criteria in correspondence to required grouting class. In places where pre-grouting is not sufficient to meet the limits, additional grouting behind the TBM (so-called “post-grouting”) is realized.

Grouting is a separate profession field in Scandinavia, and teams of highly specialized engineers participate in grouting design and construction. It is therefore a complex issue, the scope of which would require a separate publication.

5.2 Exploratory boreholes and water pressure tests

Every 18 meters of excavation, 25m long boreholes at an angle of 5.5° are performed using a drill rig installed in L1. These boreholes serve to perform water pressure tests and at the same time to predict the properties of the rock mass.

During drilling, its parameters such as penetration, revolutions or pressure are recorded using the MWD (“Measure While Drilling”) system. Subsequently, these data are interpreted and analyzed. From the data obtained from at least four boreholes, a geological forecast for the next approximately 20m of excavation is compiled on the basis of empirical relationships and criteria. On an ongoing basis, the forecasts are compared with the actually encountered geology,

získaných z minimálně čtyř vrtů je pak na základě empirických vztahů a kritérií sestavena geologická prognóza pro dalších přibližně 20 m ražby. Průběžně jsou prognózy zpětně porovnávány se skutečně zastíženou geologií, vztahy a kritéria jsou tak kalibrovány pro dosažení co nejpřesnějších prognóz.

Vodní tlakové zkoušky se provádí v jedné etáži utěsněním vrtu jednoduchým obturátorem v hloubce 8 m. Dle výsledků zkoušky je pak stanovena nebo upřesněna injektážní třída.

Data jsou na TBM v průběhu ražby zaznamenávána každých 20 sekund a jsou přístupná v reálném čase prostřednictvím aplikace Tunneling Process Control od společnosti Tunnelsoft. Vyhodnocování jsou především následující parametry:

- rychlost postupu [mm/min];
- penetrace [mm/ot];
- krouticí moment [MN/m];
- přítlak [MN].

Základní představu o geologických podmínkách lze získat pouhým pozorováním hodnot přítlaku razičí hlavy. K poklesu přítlaku obvykle dochází, když TBM prochází poruchovou zónou. Pro přesnější a komplexnější odhad zastížené geologie se však využívají následující parametry:

- jednoosá pevnost v tlaku [MPa], určená dle empirického Gehringova modelu [2];
- specifická penetrace [mm/kN*rev], na základě [3];
- faktor krouticího momentu [-], stanovený na základě [4].

Otevřená konstrukce TBM umožňuje vizuální kontrolu líce výrubu a podrobnou geologickou dokumentaci ražby. Kvalitní geologická dokumentace je s výhodou použita k nalezení korelace mezi výše uvedenými parametry a zastíženou geologií a k definování mezních a varovných hodnot. Pro dosažení co nejrelevantnějších výsledků je však nutná pravidelná kalibrace a kritické zhodnocení empiricky vypočtených parametrů.

6 ZÁVĚR

Pod městem Stockholm se pomocí otevřeného Gripper TBM razí kabelový tunel, který místní přezdívají „dálnice pro elektřinu“. Tato pro Švédsko netradiční tunelovací metoda prokázala svou vhodnost pro tento typ projektu navzdory výzvám, které představují například přísné limity přítoku vody do tunelu nebo extrémně pevné horniny.

Ražba tunelu probíhá bez výraznějších technických problémů a s velkým důrazem na bezpečnost práce a ochranu zdraví pracovníků. To je krásně vystiženo sloganem na plakátech rozmístěných po stavěništi: „*Safety first ...and then as fast as possible to Skanstull*“.

Ing. JIŘÍ UMLAUF,
jumlauf@amberg.cz, AMBERG Engineerig Brno, a.s.,
Ing. JAN VESELÝ, Ph.D.,
jvesely@amberg.ch, AMBERG Engineering AG

Recenzoval **Reviewed by: prof. Ing. Jiří Barták, Dr.Sc.**

relationships and criteria are thus calibrated to achieve the most precise forecasts.

Water pressure tests are performed at one stage by sealing the borehole with a single obturator at a depth of 8m. The grouting class is then determined or refined according to the test results.

The machine records the data every 20 seconds during excavation which can be accessed in real-time via Tunnelsoft's Tunneling Process Control application. The following parameters are mainly evaluated:

- advance speed [mm/min];
- penetration [mm/rev];
- torque [MN/m];
- thrust force [MN].

A basic idea of the geological conditions can be obtained simply by observing the data values of the cutterhead. A drop in the thrust usually occurs when the TBM passes through a fault zone. However, the following parameters are used for a more accurate and comprehensive estimate of the geology encountered:

- uniaxial compressive strength [MPa], determined according to the empirical Gehring model [2];
- specific penetration [mm/kN*rev], based on [3];
- torque factor [-], based on [4].

The open structure of the TBM allows visual inspection of the excavation face and detailed geological documentation of the excavation. High-quality geological documentation is preferably used to find the correlation between the above parameters and the geology encountered and to define limit and warning values. However, in order to achieve the most relevant results, regular calibration and critical evaluation of empirically calculated parameters is necessary.

6 CONCLUSION

Under the city of Stockholm, a cable tunnel is being excavated using an open Gripper TBM, which the locals call the “highway for electricity”. This tunneling method, which is unusual for Sweden, proved its suitability for this type of project despite the challenges posed by, for example, strict limits on water inflow into the tunnel or extremely hard rock.

Excavation of the tunnel takes place without significant technical problems and with great emphasis on occupational safety and health protection of workers. This is beautifully captured by the slogan on the posters spread around the construction site: “*Safety first ...and then as fast as possible to Skanstull*”.

Ing. JIŘÍ UMLAUF,
jumlauf@amberg.cz, AMBERG Engineerig Brno, a.s.,
Ing. JAN VESELÝ, Ph.D.,
jvesely@amberg.ch, AMBERG Engineering AG

LITERATURA / REFERENCES

- [1] DOLINAR, D. R. Performance characteristics for welded wire screen used for surface control in underground coal mines. In: *Proceedings of Society for Mining, Metallurgy and Exploration; SME annual meeting & exhibit, and CMA's 111th National Western Mining Conference 2009*. Denver: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2009, s. 659–666. ISBN 9781615671533.
- [2] GEHRING, K. H., Leistungs- und Verschleißprognose im maschinellen Tunnelbau, In *Felsbau 13*, 1994, Nr. 6, s. 439–448.
- [3] BRULAND, A. *Hard rock tunnel boring*. Trondheim, 1998. Disertační práce. Norwegian University of Science and Technology.
- [4] RADONCIC, N., B. MORITZ. Determination of the system behaviour based on data analysis of a hard rock shield TBM/Analyse der Maschinenparameter zur Erfassung des Systemverhaltens beim Hartgesteins-Schildvortrieb. *Geomechanik und Tunnelbau*, 2014, 7(5), 565–576. ISSN 1865-7362.