ZAJIŠTĚNÍ ÚSEKU E4 POD JEZEREM MÄLAREN VE STOCKHOLMU
STABILISATION OF THE E4 SECTION UNDER THE LAKE MÄLAREN IN STOCKHOLM

JAN FALTÝNEK

ABSTRAKT

FSE209 Bergtunnlar Skärholmen je název projektu, jenž realizuje od roku 2017 jako generální zhotovitel společnost SBT Sverige AB (dceřiná společnost společnosti Subterra a.s.). Je jedním z osmi úseků E4 Förbifart Stockholm – silničního obchvatu švédské metropole. Součástí FSE209 je i přibližně 240 m dlouhý úsek přímo pod jezerem Mälaren, který představoval jednu z nejproblematičtějších a nejrizikovějších částí výstavby celého obchvatu Stockholmu. Ražba v tomto úseku byla velice komplikovaná a náročná. Velkou výzvou bylo překonat velmi nekvalitní zvodnělé horninové prostředí a vypořádat se s nízkou výškou nadloží pode dnem jezera. Jako sekundární zajištění výrubu bylo přímo zadavatelem navrženo masivní, silně vyztužené monolitické železobetonové ostění s rozpětím klenby 15 m, jehož tloušťka dosahuje v některých místech až úctyhodných 4 m. To přineslo v průběhu realizace řadu komplikací, se kterými se bylo třeba vypořádat. O základních aspektech návrhu a realizace této specifické železobetonové konstrukce a dalších zajímavostech z výstavby tunelového ostění pojednává předložený článek. Ten tematicky navazuje na předchozí články o projektu FSE209, které jsou uvedeny v [1], [2] a především v [3], kde je detailně popisována ražba pod jezerem Mälaren.

ABSTRACT

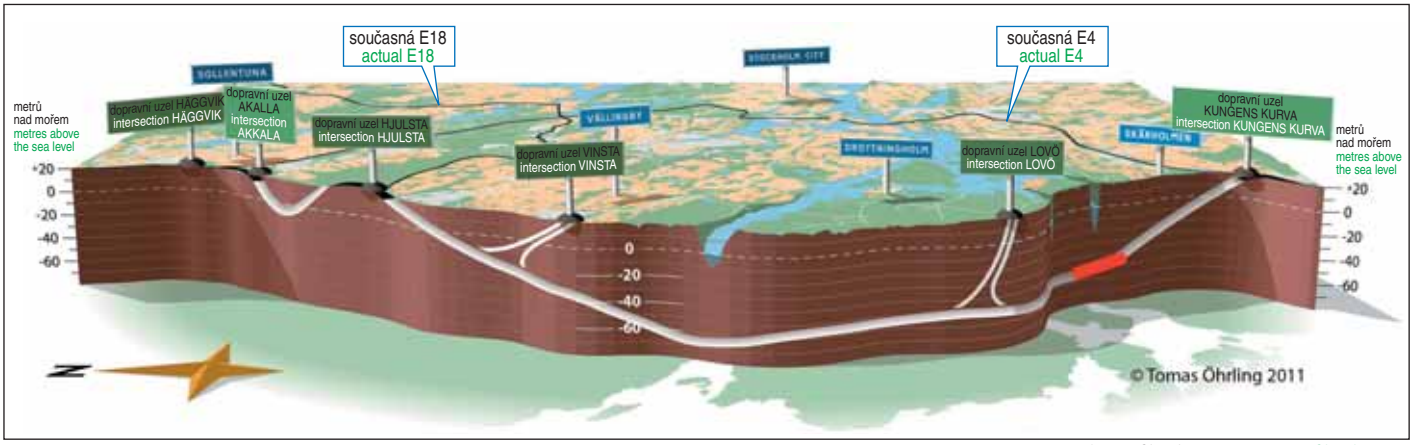
FSE209 Bergtunnlar Skärholmen is the name of the project that has been implemented since 2017 by SBT Sverige AB (subsidiary of Subterra a.s.) as the general contractor. It is one of the eight sections of the E4 Förbifart Stockholm – the road bypass of the Swedish capital. FSE209 also including an approximately 240m long section directly under Lake Mälaren, which represented one of the most problematic and risky parts of the construction of the entire Stockholm bypass. Tunnel excavation in this section was very complicated and demanding. The big challenge was to overcome the very poor quality water-bearing ground environment and to deal with the low height of the overburden below the lake bed. A massive, heavily reinforced monolithic concrete lining with a vault span of 15m, whose thickness reaches respectable 4m in some places, was proposed directly by the client as a secondary support of the excavation. This brought a number of complications that had to be dealt with during the construction. The presented article discusses the basic aspects of the design and construction of this specific reinforced concrete structure and other interesting aspects of the construction of the tunnel lining. Thematically, it is a follow-up to the previous papers on the FSE209 project, which are presented in [1], [2] and especially in [3], where the excavation under Lake Mälaren is described in detail.

OBCHVAT STOCKHOLMU

Ambiciózní projekt světového měřítka E4 Förbifart Stockholm tvoří západní propojení severní a jižní části švédské metropole (obr. 1). Ta je přirozeně rozdělena jezerem Mälaren a Baltským mořem na část pevninskou a izolované ostrovy. Důvodem výstavby obchvatu je především převedení tranzitní dopravy z centra města do jeho periférií a snížení zranitelnosti velice křehkého a přetíženého dopravního systému Stockholmu, který je závislý především na průchodnosti mostních objektů spojujících severní a jižní část

STOCKHOLM BYPASS

The ambitious world-scale project E4 Förbifart Stockholm forms the western connection between the northern and southern parts of the Swedish metropolis (Fig. 1). It is naturally divided by Lake Mälaren and the Baltic Sea into a mainland part and isolated islands. The reason for the construction of the bypass is primarily to transfer transit traffic from the city centre to its outskirts and to reduce the vulnerability of Stockholm's very fragile and congested transport system, which is primarily dependent on the passability



zdroj Trafikverket, 2022 *source Trafikverket, 2022*

Obr. 1 Schematický řez stavby E4 Förbifart Stockholm
Fig. 1 Schematic cross-section through the E4 Förbifart Stockholm project

metropole a řadu malých ostrovů. Nové spojení usnadní každodenní život obyvatelům města a vytvoří další příležitosti pro budoucí rozvoj silniční sítě. Pro minimalizaci negativního vlivu stavby na okolní prostředí je z celkové délky 21 km celých 18 km vedeno v podzemí. Celý obchvat je rozdělen na osm částí, jež zadavatel soutěžil samostatně. Úsek FSE209 Bergtunnlar Skärholmen nacházející se v jižní části Stockholmu realizuje od roku 2017 jako generální zhotovitel společnost SBT Sverige AB. Zadavatelem je státní organizace Trafikverket (švédská obdoba českého ŘSD ČR nebo slovenské NDS). Předpokládaným termínem dokončení celého obchvatu je rok 2035. Po zprovoznění všech částí se E4 Förbifart Stockholm stane jedním z nejdelších městských silničních tunelových komplexů na světě s intenzitou dopravy přibližně 140 tisíc automobilů denně [4]. Pro srovnání denní intenzita nejvytíženější české dálnice D1 u Prahy je přibližně 103 tisíc automobilů [6].

RAŽBY V ÚSEKU POD JEZEREM MÄLAREN A PRIMÁRNÍ ZAJIŠTĚNÍ VÝRUBU

Součástí úseku FSE209 Bergtunnlar Skärholmen s délkou obou tunelů hlavní trasy cca 4 km, čtveřicí nájezdových a výjezdových rampových tunelů délky 4 km a 1,5 km únikových cest je i přibližně 240 m dlouhý úsek pod jezerem Mälaren (na obr. 1 červeně vyznačený), který představoval nejproblematičtější a nejrizikovější část z pohledu výstavby celého obchvatu Stockholmu. Důvodem byla především nízká výška nadloží tunelu pode dnem jezera, dosahující jen 25 m, a velmi nepříznivé geologické podmínky, ve kterých se daný úsek nachází. Ve zvětralých a rozpukaných rulách byla totiž zastižena masivní zvodnělá poruchová zóna tvořená především rozrušeným grafitem a kataklazitem.

Před samotnou ražbou tunelů hlavní trasy probíhala řada průzkumných sond jak do dna jezera, tak z předstihových vrtů vrtaných z čelby. Na základě výsledků průzkumu bylo rozhodnuto o ražbě dvou bočních obchozích tunelů menšího profilu, které umožnily problémový úsek pod jezerem v předstihu obejít, důkladněji zmapovat, provést průzkumné práce v oblasti poruchových zón a současně pokračovat v následných ražbách dál ke konci úseku tak, aby nedošlo k významnému zpoždění celého projektu. Na základě detailních výsledků získaných z doplňujícího průzkumu bylo přistoupeno ke změně projektové dokumentace zajištění výrubu hlavních tunelů oproti původnímu plánu. Horninový masiv byl v prostoru hlavní trasy zabezpečen předstihovými těsnicími injektážemi předpolí a kalota mikropilotovým deštníkem. V nejhorších úsecích byl výrub členěn jak vertikálně, tak horizontálně, čelba přitížena a zajištěna samozávrtnými kotvami. Primární ostění tvoří 200 mm silná vrstva vyztuženého stříkaného drátkobetonu, jež je navíc přikotvena radiálními kotvami. Více podrobností lze najít v [3], kde je detailně popsána jak ražba pod jezerem Mälaren, tak celková změna způsobu vyztužení výrubu.

SEKUNDÁRNÍ ZAJIŠTĚNÍ VÝRUBU POD JEZEREM MÄLAREN

V souvislosti se změnou způsobu ražeb a primárního zajištění horninového masivu došlo i ke změně sekundárního zajištění výrubu. Zadavatel se rozhodl pro návrh monolitického tunelového ostění, které je v severských zemích méně obvyklé. Realizace monolitického ostění se zpravidla uplatňuje pouze v příportálových úsecích, kde dochází k přechodu mezi raženým a hloubeným úsekem tunelu. Ve Skandinávii je běžné, pokud vzhledem ke kvalitě horninového masivu zůstane výrub po provedení primárního zajištění dál již nezabezpečený, provádět systém sekundárního ostění jako kombinaci prefabrikovaných stěnových panelů zavěšených na horninových svorníčích a stropu ze stříkaného betonu. Ten je aplikován na membránu, která je rovněž zavěšena na horninových svorníčích

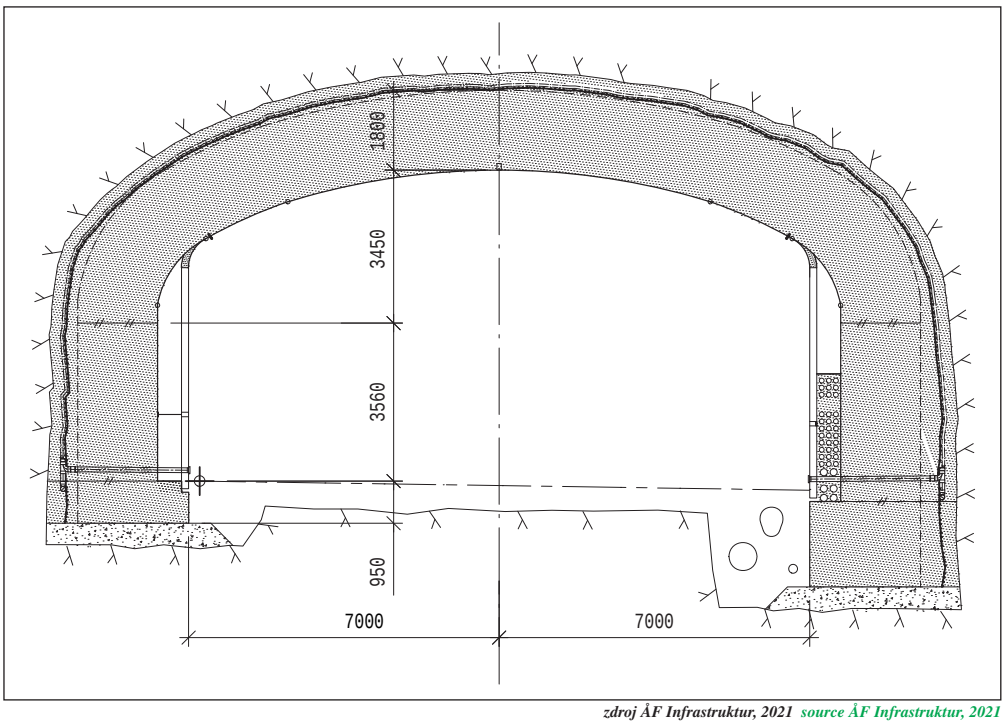
of bridge structures connecting the northern and southern parts of the metropolis and a number of small islands. The new connection will make everyday life easier for the city's residents and create additional opportunities for the future development of the road network. The entire bypass is divided into eight parts, which the contracting authority tendered separately. The FSE209 Bergtunnlar Skärholmen section located in the southern part of Stockholm has been implemented by SBT Sverige AB as the general contractor since 2017. The contracting authority is the state organisation Trafikverket (Swedish equivalent of the Czech ŘSD CR or Slovak NDS). The anticipated completion date for the entire bypass is 2035. When all parts are operational, the E4 Förbifart Stockholm will become one of the longest urban road tunnel complexes in the world with a traffic volume of approximately 140 thousand vehicles per day [4]. For comparison, the daily traffic volume on the busiest Czech highway D1 near Prague is approximately 103 thousand cars [6].

TUNNEL EXCAVATION IN THE SECTION UNDER LAKE MÄLAREN AND PRIMARY EXCAVATION SUPPORT

The part of the FSE209 Bergtunnlar Skärholmen section, with the length of both tunnels of the main route of approx. 4km, four entrance and exit ramp tunnels with the length of 4km and 1.5km of escape routes, is also an approximately 240m long section under Lake Mälaren (marked in red in Fig. 1), which represented the most problematic and risky part from the point of view of the construction of the entire bypass of Stockholm. The reason was primarily the low height of the overburden of the tunnel under the lake bed, reaching only 25m, and the very unfavourable geological conditions in which the given section is located. In the weathered and fractured gneiss, a massive water-bearing fault zone was found, consisting mainly of deteriorated graphite and cataclasite. Before driving tunnels of the main route itself, a number of exploration probe holes were carried out both into the bottom of the lake and from wells drilled ahead of the face. Based on the results of the survey, it was decided to excavate two lateral bypass tunnels of a smaller profile, which made it possible to bypass the problematic section under the lake in advance, to map it more thoroughly, to carry out survey work in the area of fault zones, and at the same time to continue subsequent excavations further towards the end of the section so that there was no significant delay of the entire project. Based on the detailed results obtained from the supplementary survey, the design documents of the support of the main tunnels were changed compared to the original plan. The rock massif was stabilised in the area of the main route with advance injections of grout into the advance core and the top heading with a canopy tube pre-support. In the worst sections, the excavation was divided both vertically and horizontally, the face was surcharged and secured with self-drilling anchors. The primary lining consists of a 200mm thick layer of sprayed reinforced concrete, which is additionally tied back with radial anchors. More details can be found in [3], where both the excavation under Lake Mälaren and the overall change in the method of the excavation support are described in detail.

SECONDARY EXCAVATION SUPPORT UNDER MÄLAREN LAKE

In connection with the change in the method of excavation and the primary support of the rock massif, there was also a change in the secondary support of the excavation. The client decided to use the design of a monolithic tunnel lining, which is less common in the Nordic countries. The construction of a monolithic lining is usually applied only in the near-portal sections, where there is a transition between the mined and cut-and-cover section of the tunnel. In



zdroj ÅF Infrastruktur, 2021 source ÅF Infrastruktur, 2021

Obr. 2 Příčný řez sekundárním tunelovým ostěním
Fig. 2 Cross-section through secondary tunnel lining

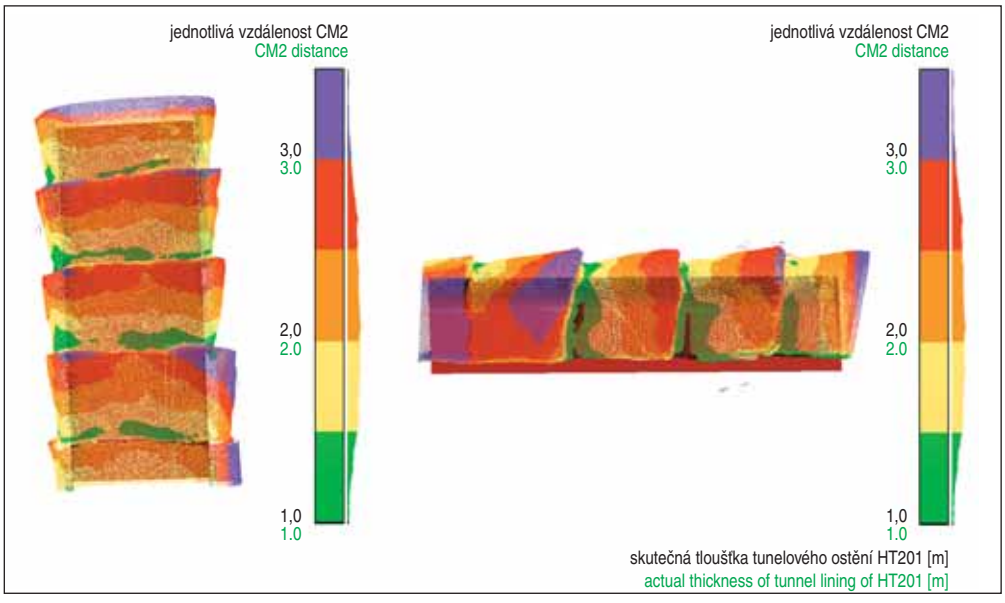
instalovaných přes vrstvu stříkaného betonu primárního ostění kaloty. Tento systém sekundárního ostění byl použit po celé délce tunelu Skärholmen, vyjma úseku pod jezerem Mälaren, kde bylo navrženo unikátní silně vyztužené monolitické ostění, jež patří k nejsložitějším prvkům celého projektu FSE209. Z tohoto důvodu byl jak návrh, tak samotná realizace pod pečlivým drobnohledem zadavatele i autorského dozoru.

V každé tunelové troubě (HT201, HT202) bylo vybetonováno celkem pět sekcí s proměnnou délkou bloku betonáže (maximálně 10 m) a rozpětím klenby 15 m. Celková délka kritického úseku s nepříznivým horninovým prostředím pod jezerem, kde bylo navrženo monolitické sekundární ostění, je 40 m v obou tunelových troubách. Každá sekce je v příčném řezu rozdělena pracovní spárou s průběžnou výztuží na základové pásy, dvě stěny a horní klenbu (obr. 2). Kvůli použití mikropilotového deštníku k zajištění stability výrubu při ražbách a nutnému zhotovení nik pro jeho vrtání je tloušťka ostění v podélném směru v rámci jednoho bloku betonáže variabilní a ostění dosahuje teoretické tloušťky 0,8 m až 1,8 m. Jeden blok betonáže má tak „trychtýřovitý tvar“. V některých místech je ale reálná tloušťka kvůli vysokým geologickým nadvýlomům pod mikropilotovými deštníky větší a překračuje hranici 3,5 m (obr. 3). To kladlo při realizaci obrovské nároky nejen na únosnost bednicí formy klenby ostění, ale rovněž na dopravu a ukládku čerstvého betonu a na následné chlazení betonové směsi při její hydrataci.

Mezi primární ostění ze stříkaného betonu a monolitické sekundární ostění byla ukládána separační vrstva z nopové matrace potažené geotextilií. Za ní byly umístěny navíc drenážní

Scandinavia, if, due to the quality of the rock massif, the excavation remains unsecured after the primary protection has been carried out, it is common to implement a secondary lining system as a combination of prefabricated wall panels suspended on rock bolts and a shotcrete roof. Shotcrete is applied to the membrane, which is also suspended from rock bolts installed through the shotcrete layer of the primary lining of the top heading. This secondary lining system was used along the entire length of the Skärholmen tunnel, except for the section under Lake Mälaren, where a unique heavily reinforced monolithic lining was designed, which is one of the most complex elements of the entire FSE209 project. For this reason, both the design and the actual construction were under the careful scrutiny of the client and the author‘s supervision.

In each tunnel tube (HT201, HT202), a total of five sections were concreted with a variable length of the concrete casting block (maximum 10m) and the crown span of 15m. The total length of the critical section with unfavourable rock environment under the lake, where the monolithic secondary lining was designed, is 40m in both tunnel tubes. Each section is divided in cross-section by a working joint with continuous reinforcement into foundation strips, two walls and an upper vault (Fig. 2). Due to the use of a canopy tube pre-support to ensure the stability of the excavation during work and the necessary construction of niches for its drilling, the thickness of the lining in the longitudinal direction within one concrete casting block is variable, and the theoretical thickness of the lining reaches 0.8m to 1.8m. One concrete casting block thus has a „funnel shape“. In some places, however, the real thickness due to high geological overbreaks above the canopy tube umbrellas is greater and exceeds the limit of 3.5m (Fig. 3). During



Obr. 3 Vyhodnocení skutečné tloušťky sekundárního tunelového ostění HT201
Fig. 3 Assessment of actual thickness of secondary tunnel lining of HT201

trubice svádějící vodu z pláště ostění do hlavní tunelové drenáže. Návrhová životnost tunelového ostění jakožto i ostatních prvků a částí tunelu je projektovou dokumentací stanovena na 120 let. Všechny prvky trvale instalované v tunelu musí mít tuto trvanlivost garantovanou. Tento smluvní požadavek zadavatel důsledně kontroloval a vyžadoval.

RECEPTURA ČERSTVÉ BETONOVÉ SMĚSI

První výzvou, se kterou bylo nutno se před vlastní realizací ostění vypořádat, byl návrh čerstvé betonové směsi, která by byla vhodná k betonáži ostění těchto dimenzí v daných podmínkách. Kvůli nerovnoměrnému tvaru a velkým tloušťkám ostění a požadavku na co nejdokonalejší vyplnění nadvýlomů nebylo technicky možné použít klasické hutněné betonové směsi pro betonáž klenby ostění. Příložné vibrátory umístěné na plášti formy bednění nemohou v tomto případě zajistit dokonalé zhutnění betonu. Proto bylo nutné přistoupit k návrhu samozhutnitelného betonu. Podle projektové dokumentace byla navíc předepsána poměrně vysoká pevnostní třída C35/45, odolnost betonu vůči působení mrazu s CHRL (stupeň vlivu prostředí XF4) a další technické specifikace. Povoleno bylo použití pouze čistých portlandských cementů CEM I. Dalším požadavkem se stala protipožární odolnost ostění s kritérii EI 60 a R 180. Ta vedla na základě požárních zkoušek betonu k nutnosti doplnit recepturu o polypropylénová mikrovlákna v dávkování 1 kg/m^3. Kvůli častým dopravním komplikacím při transportu čerstvého betonu přes hlavní město byl přidáván navíc zpomalovač tuhnutí.

Ve spolupráci s dodavatelem betonu a po provedení velké řady testů a zkoušek k zjištění deklarovaných vlastností jak čerstvé betonové směsi, tak ztvrdlého betonu byla nakonec nalezena a následně zadavatelem schválena vhodná receptura betonu. Výsledkem byl samozhutnitelný, provzdušněný, vysokohodnotný vláknobeton.

BEDNĚNÍ SEKUNDÁRNÍHO TUNELOVÉHO OSTĚNÍ

Požadavkem zadavatele, souvisejícím s realizací železobetonových konstrukcí v rámci projektu FSE209, byl zákaz použití klasického rádlování nebo jiných prvků, které nabízejí tradiční dodavatelé v rámci svých typizovaných řad systémového bednění. Jedinou možnou alternativou, jak bednění sepnout a zachytit vodorovné síly, bylo využití sklolaminátových nebo nerezových táhel, která po odbednění zůstanou součástí vlastní monolitické konstrukce. Důvodem je obava zadavatele z možného porušení vodotěsnosti ostění a snížení trvanlivosti konstrukce v případě průsaků skrze ucpávky po rádlování.

Bednění základových pásů nebylo v ničem výjimečné. Na stěny bylo použito jednostranné bednění, jež bylo zajištěno sklolaminátovými táhly uchycenými přímo do horninového masivu. Na realizaci obou těchto konstrukčních částí bylo použito klasické systémové bednění.

Další výzvou, kterou bylo nutno intenzivně řešit před zahájením vlastní realizace, byl návrh formy bednění horní klenby tunelového ostění. Ze všech oslovených dodavatelů bednění předložil koncepční návrh pouze jeden. Ostatní poptávku odmítli kvůli obavám o bezpečnou únosnost bednicího vozu v průběhu betonáže. Důvodem byla bezesporu kombinace navržené receptury samozhutnitelného betonu a vysokých nadvýlomů vedoucích k abnormálnímu tlaku čerstvé betonové směsi. Světlá výška mezi vrcholem a patou klenby ostění dosahovala v některých místech až 8 m. Tento tlak by v případě hydrostatického působení betonu nebyla žádná bednicí forma schopna přenést. Proto bylo v návrhu uvažováno s postupným náběhem pevnosti čerstvého betonu a následnou redukcí horizontální složky zatížení na formu bednění. Ve spolupráci s dodavatelem betonu a dodavatelem bednění byl na staveništi uspořádán test při

construction, this placed huge demands not only on the load-bearing capacity of the formwork of the lining vault, but also on the transport and placement of fresh concrete and on the subsequent cooling of the concrete mixture during its hydration.

Between the primary lining made of sprayed concrete and the monolithic secondary lining, a separation layer made of a dimpled sheet mattress covered with geotextile was placed. In addition, drainage tubes were placed behind it, directing water from the cladding to the main tunnel drainage. The design life of the tunnel lining as well as other elements and parts of the tunnel is set at 120 years by the design documents. All elements permanently installed in the tunnel have to have this durability guaranteed. This contractual requirement was consistently checked and required by the contracting authority.

FRESH CONCRETE MIX RECIPE

The first challenge that had to be dealt with before the lining construction itself was the design of a fresh concrete mix that would be suitable for concreting the lining of these dimensions in the given conditions. Due to the uneven shape and large thicknesses of the lining and the requirement to fill the overbreaks as perfectly as possible, it was technically impossible to use classic compacting of concrete mixes for the concreting of the lining vault. External vibrators placed on the shell of the formwork cannot ensure perfect compaction of the concrete in this case. Therefore, it was necessary to proceed to the design of self-compacting concrete. According to the design documents, a relatively high strength class C35/45, frost resistance of concrete with CHRL (exposure degree XF4) and other technical specifications were also prescribed. Only CEM I pure Portland cements were allowed to be used. Another requirement was the fire resistance of the cladding with the EI 60 and R 180 criteria. Based on concrete fire tests, this led to the need to supplement the recipe with polypropylene microfibres in a dosage of 1kg/m^3. Due to frequent traffic complications when transporting fresh concrete through the capital, a setting retarder was added.

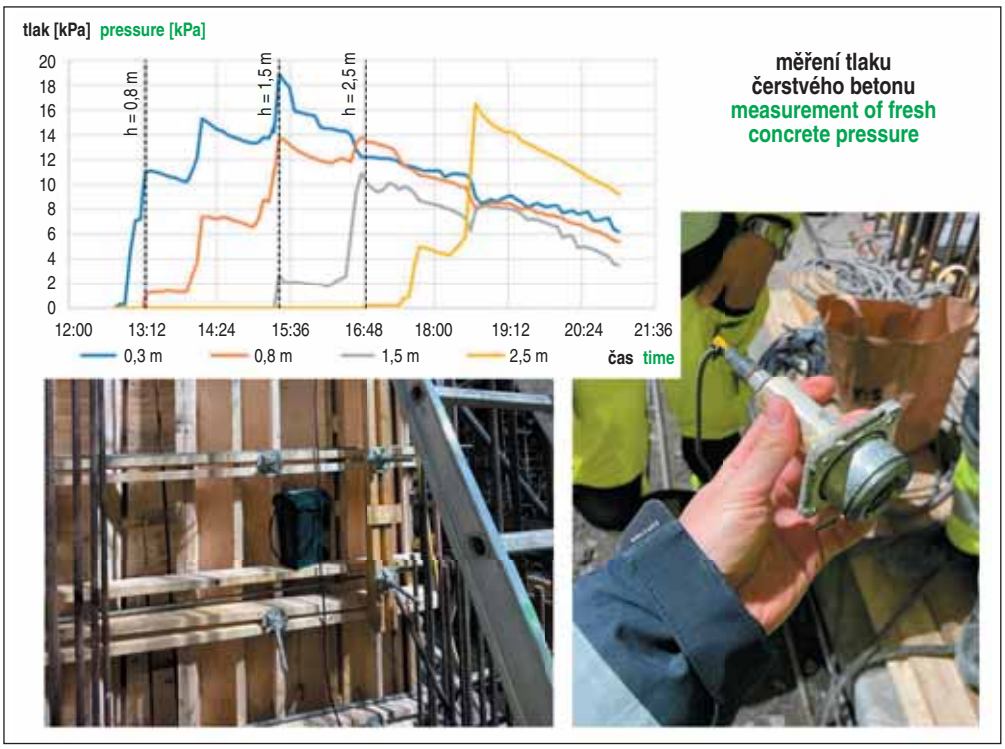
In cooperation with the concrete supplier and after carrying out a large number of tests and trials to determine the declared properties of both the fresh concrete mixture and the hardened concrete, a suitable concrete formula was finally found and subsequently approved by the client. The result was a self-compacting, aerated, high-quality fibre reinforced concrete.

FORMWORK OF THE SECONDARY TUNNEL LINING

The request of the client, related to the construction of reinforced concrete structures within the FSE209 project, was the ban on the use of classic formwork tying or other elements offered by traditional suppliers within their typical series of formwork systems. The only possible alternative to tying the formwork and capturing the horizontal forces was the use of fibreglass or stainless steel tie rods, which remain part of the monolithic structure itself after the formwork is removed. The reason is the client‘s fear of a possible breach of the waterproofing of the lining and a reduction in the durability of the structure in the event of leaks through the seals after formwork tying.

The formwork of the footings was nothing special. One-sided formwork was used for the walls. It was stabilised by fibreglass ties attached directly to the rock massif. Classic formwork system was used for the execution of both of these structural parts.

Another challenge that had to be intensely addressed before starting the actual construction was the design of the formwork for the upper vault of the tunnel lining. Of all the formwork suppliers



Obr. 4 Měření tlaku čerstvého samozhutnitelného betonu (nahoře výsledek měření, vlevo datalogger umístěný na bednění, vpravo detail snímače)
Fig. 4 Measurement of pressure exerted by self-compacting concrete (top –measurement result, left – datalogger installed on formwork, right – transducer detail)

betonáži tunelových stěn, jehož cílem bylo stanovit skutečné vodorovné tlaky, které navržená čerstvá betonová směs na bednění vyvíjí. Ve třech výškových úrovních byly do bednění vloženy tlakoměrné snímače a postupně byl v průběhu betonáže zaznamenáván tlak na bednění (obr. 4). Výsledky měření byly pro návrh bednění klenby velice příznivé, změřené hodnoty neodpovídaly teoretickým hodnotám, byly podstatně nižší. Z tohoto důvodu bylo provedeno ještě opětovné měření, aby se, pokud možno, vyloučily některé případné chyby měření. I výsledky druhého měření potvrdily stejný trend. Pro ověření všech naměřených dat bylo provedeno ještě klasické měření tlaků bednění spočívající ve sledování síly v jednotlivých táhlech a přepočtení této síly na tlak na bednění. I toto měření ale prokázalo, že reálný tlak čerstvé betonové směsi na bednění je nižší než teoretický. Po zohlednění všech výsledků měření a zavedení patřičných bezpečnostních koeficientů byla bednicí forma horní klenby ostění

Obr. 5 Bednicí forma klenby ostění
Fig. 5 Formwork for vault of lining

contacted, only one submitted a conceptual proposal. The others rejected the request due to concerns about the safe load-bearing capacity of the tunnel form traveller during concreting. Undoubtedly, the reason was the combination of the proposed self-compacting concrete recipe and high overbreaks leading to abnormal pressure of the fresh concrete mixture. The clearance height between the top and the bottom of the lining vault reached up to 8m in some places. No formwork would be able to withstand this pressure in the case of hydrostatic concrete action. Therefore, the proposal considered a gradual increase in the strength of fresh concrete and a subsequent reduction of the horizontal component of the load on the formwork. In cooperation with the concrete supplier and the formwork supplier, a test was organised on the construction site during the concreting of the tunnel walls, the aim of which was to determine the actual horizontal pressures that the designed fresh concrete mixture exerts on the formwork. Pressure sensors were inserted into the formwork at three height levels and the pressure on the formwork was gradually recorded during concreting (Fig. 4). The measurement results were very favourable for the design of the vault formwork, the measured values did not correspond to the theoretical values; they were significantly lower. For this reason, a re-measurement was carried out in order to exclude, if possible, some possible measurement errors. The results of the second measurement also confirmed the same trend. In order to verify all the measured data, a classic measurement of pressure on formwork consisting of monitoring the force in individual tie rods and converting this force into pressure on formwork was performed. Even this measurement proved that the real pressure of the fresh concrete mixture on the formwork is lower than the theoretical one. After taking into account all measurement results and introducing appropriate safety coefficients, the formwork of the upper vault of the lining was successfully designed and gradually assembled after several weeks underground (Fig. 5). The total weight of the formwork of the lining vault exceeded 90 tonnes. After the formwork of the concrete block was removed, the form was always split in half at the top of the vault and moved in halves along the rails from one block to the other, where it was then set up in the correct geometric position and connected. In order to save time, after all the concreting of the first tunnel tube was completed, the entire formwork of the vault was subsequently moved in halves through the tunnel cross passage. A special six-axle self-propelled carriage was used for this operation, enabling the transport of excessive loads.

Due to the very high vertical load exerted by the formwork of the vault during concreting, a static load test of the compacted gravel layers under the rails was carried out. Based on the results of measurements and load calculations, for safety reasons and in order to ensure favourable load distribution and to minimise uneven subsidence of the formwork during concreting, massive spreading steel sheets placed under the individual rails were used.

úspěšně navržena a po několika týdnech v podzemí postupně sestavena (obr. 5). Celková hmotnost formy bednění klenby ostění přesahovala 90 tun. Po odbednění daného bloku betonáže byla forma vždy rozpůlena ve vrcholu klenby a po polovinách po kolejnicích přesunuta z jednoho bloku na druhý, kde byla následně ustavena do správné geometrické polohy a spojena. Z důvodu úspory času po dokončení všech betonáží první tunelové trouby byla následně celá bednicí klenba po polovinách přesunuta přes tunelovou propojku. K této operaci byl využit speciální šestinápravový samohybný podvozek umožňující transport nadměrných nákladů.

Z důvodu velmi vysokého vertikálního zatížení od bednění klenby v průběhu betonáže bylo přistoupeno k provedení statické zatěžovací zkoušky hutněných štěrkových vrstev pod kolejnicemi. Na základě výsledků měření a přepočtu zatížení došlo z bezpečnostních důvodů a kvůli zajištění příznivého roznosu zatížení a minimalizaci nerovnoměrných poklesů formy bednění v průběhu betonáže k použití masivních roznášecích ocelových plechů umístěných pod jednotlivými kolejnicemi.

Uzavření čílek nebylo možné zajistit kompletně systémovým bedněním. Kvůli vyvedení těsnicích profilů a nepravidelnému tvaru výrubu zde bylo nutné použít řezivo. V některých případech tak bylo zhotoveno až 3,5 m široké nebo vysoké dřevěné bednění proměnných dimenzí. Všechna čílka byla proti vodorovným tlakům zajištěna zabetonovanými ocelovými táhly, jež vedla po celé délce bloku betonáže. Před uzavřením formy bednění byly do nejvyšších míst v klenbě výrubu umístěny dvojice tzv. „špionů“, pomocí kterých bylo možno kontrolovat, zda došlo ke správnému vyplnění všech dutin čerstvým betonem a zároveň sloužily k odvzdušnění prostor za formou. Tyto kontrolní trubice byly vyvedeny přes čílko bednění k armovacímu vozíku, ze kterého probíhala vlastní betonáž.

Pro plnění formy čerstvým betonem bylo na plášti bednicího vozu umístěno celkem osmnáct plnicích otvorů osazených tzv. „gilotinami“, ke kterým bylo možno připojit hadice betonové pumpy. Ve třech příčných profilech bylo umístěno symetricky na každé straně bednění klenby ve třech výškových úrovních celkem šest gilotin. Rozmístění jednotlivých plnicích míst bylo sladěno s délkou nejmenšího bloku betonáže a celkovým postupem výstavby. Plnění formy bednění nad úrovní vrcholu bednicího vozu bylo zajištěno prostřednictvím několika gilotin osazených přímo v čílku bednění. Aby došlo k co nejlepšímu vyplnění bednicí formy, bylo vždy alespoň jedno plnicí místo vedoucí z čílka prodlouženo prostřednictvím zabetonovaného ocelového potrubí dále k již vybetonovanému bloku ostění. Tím bylo zajištěno, že bude i ve vyšších partiích v podélném směru plnění rovnoměrné a nedojde tak k lokálnímu přetěžování formy nebo ke vzniku nežádoucích kaveren.

VÝZTUŽ SEKUNDÁRNÍHO TUNELOVÉHO OSTĚNÍ

Klenba ostění je v příčném řezu geometricky tvořena třemi oblouky rozdílných poloměrů. V kombinaci s trychtýřovým tvarem každého bloku betonáže v podélném směru to mělo za následek, že každý vnější prut armokoše ostění měl jinou délku a jiný tvar a musel být vyroben individuálně na míru. Na začátku realizace byla snaha produkovat výztuž ve specializované armovně. Po několika prvních dodávkách a výměně subdodavatele se však ukázalo, že bude výhodnější, když bude výztuž vyráběna přímo na stavbě. Důvodem byla neschopnost dodavatelů vyrobit a dopravit na staveniště výztuž v potřebné kvalitě a především tvaru. Celý armokoš ostění byl zavěšen na kotvách vrtaných přes primární ostění a separační vrstvu do horninového masivu. Průměrné vyztužení sekundárního tunelového ostění dosahovalo 160 kg na m^3 betonu. Jako hlavní nosná výztuž byly použity primárně pruty průměru 25 mm (obr. 6), v některých

It was not possible to completely close the ends with system formwork. Because of the sealing profiles and the irregular shape of the excavation, it was necessary to use timber here. In some cases, up to 3.5m wide or high timber formwork of variable dimensions was made. All the stop ends were secured against horizontal pressure by steel tie rods that ran in the concrete along the entire length of the concreting block. Before closing the formwork, a pair of so-called „spies“ were placed in the highest places in the vault of the excavation, with the help of which it was possible to check whether all the cavities had been correctly filled with fresh concrete and at the same time they served to de-aerate the space behind the form. These checking tubes were brought out through the stop end of the formwork to the reinforcement installation traveller, from which the actual concreting took place.

To fill the form with fresh concrete, a total of eighteen filling holes fitted with so-called „guillotines“ were installed on the shell of the tunnel formwork traveller, through which the hoses of the concrete pump could be connected. In three transverse profiles, a total of six guillotines were placed symmetrically on each side of the vault formwork at three height levels. The filling of the formwork above the level of the top of the formwork traveller was secured by means of several guillotines installed directly in the formwork stop end. In order to achieve the best possible filling of the formwork, at least one filling point leading from the stop end was always extended by means of a steel pipe filled with concrete, further to the already concreted lining block. This ensured that even in the higher parts in the longitudinal direction, the filling would be uniform and that there would be no local overloading of the formwork or the formation of unwanted cavities.

REINFORCEMENT OF THE SECONDARY TUNNEL LINING

In cross-section, the lining vault is geometrically formed by three arches with different radii. Combined with the funnel shape of each concreting block in the longitudinal direction, this meant that the length and shape of each external rebar of the lining reinforcement cage was different and had to be individually made to measure. At the beginning of the work, there was an effort to produce reinforcement in a specialised rebar processing shop. However, after the first few deliveries and a change of subcontractor, it became clear that it would be more advantageous when the reinforcement was processed directly on site. The reason was the inability of the suppliers to produce and deliver reinforcement to the construction site in the required quality and, above all, shape. The entire reinforcement cage of the lining was suspended on anchors drilled through the primary lining and the separation layer into the rock massif. The average quantity of reinforcement of the secondary tunnel lining reached 160kg per m^3 of concrete. Rebars 25mm in diameter, in some places of the cross-section placed in up to three layers, were primarily used as the principal reinforcement (Fig. 6). In all places where the actual shape of the lining differed from the theoretical one by more than 0.3m, it was necessary to add reinforcement to the overbreak. The actual assembly of the reinforcement was carried out from the reinforcement installation traveller.

To ensure the waterproofing of the lining, a rubber waterbar was inserted into each transverse joint between the individual blocks of concreting. The working joints between the strip footings, the walls and the lining vault were treated by inserting a bentonite sealing gasket. The entire reinforcement cage of the lining was tied up and outlets were installed on the surface of the lining to measure the electrochemical potential and monitor the risk of corrosion of the concrete reinforcement. The stress in the secondary lining was

místech průřezu umístěné až ve třech vrstvách. Ve všech místech, kde se skutečný tvar ostění lišil od teoretického více než o 0,3 m, bylo nutné nadvýlom dovyztužit. Samotná montáž výztuže probíhala z armovacího vozíku.

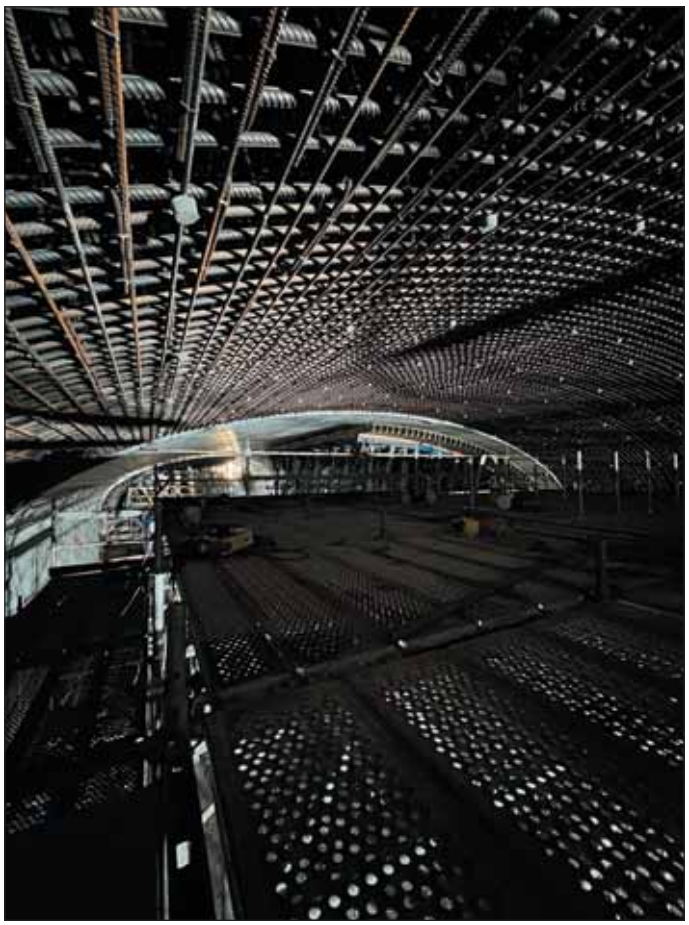
K zajištění vodonepropustnosti ostění byl do každého příčného spoje mezi jednotlivé bloky betonáže vložen gumový těsnicí pás. Pracovní spáry mezi základovými pásy, stěnami a klenbou ostění byly ošetřeny vložením bentonitového těsnicího pásku. Celý armokoš ostění byl provázán a na povrch ostění byly instalovány vývody pro měření elektrochemického potenciálu a sledování rizika koroze betonářské výztuže. Napětí v sekundárním ostění bylo na každém bloku betonáže monitorováno v několika měřičských profilech strunovými tenzometry. Vzhledem k nepravidelnému tvaru ostění a jeho dimenzím vznesl zhotovitel na zadavatele dotaz, zda trvá na umístění tenzometrů do teoretické polohy s odpovědí, že má být sledován původní návrh beze změn.

CHLAZENÍ BETONOVÉHO OSTĚNÍ

Jak již bylo zmíněno v předchozí části příspěvku, tloušťka tunelového ostění přesahovala v některých místech navržené hodnoty tloušťky sekundárního ostění. Z pohledu technických norem a předpisů se jedná o masivní monolitickou konstrukci i v případě, že by byly dodrženy všechny teoretické rozměry ostění. Pro zajištění správné hydratace betonu, nepřekročení limitních hodnot teploty v jádru průřezu a udržení teplotního gradientu mezi jádrem průřezu a povrchem v bezpečných mezích je možné zvolit více přístupů. Ve Skandinávii k této problematice přistupují nejčastěji chlazením vlastní betonové konstrukce v průběhu hydratace betonu. V praxi se používají dva základní systémy. První, sofistikovanější, využívající uzavřený systém cirkulace chladicího média a druhý, kdy chlazení konstrukce zajišťuje běžná užitková voda, která je rozvedena po délce tunelu. U uzavřeného systému, kdy nelze použít k chlazení užitkovou vodu, je třeba zajistit nákladný výměník tepla a technologii k vlastnímu řízení procesu chlazení. V případě tunelového ostění pod jezerem Mälaren byl využit systém chlazení užitkovou vodou.

Na základě zvolené receptury čerstvé betonové směsi (především obsahu a typu cementu), průměrných denních teplot v daném měsíci, teploty čerstvého betonu a teploty chladicího média byl projektantem navržen systém chladicího potrubí. Podmínkou pro regulaci přítoku a tlaku v potrubí byl rozdíl mezi teplotou chladicí kapaliny na vstupu a na výstupu. Projektantem byla předepsána rovněž minimální doba, po jakou se musí ostění chladit. Současně se sledováním všech relevantních údajů na chladicím potrubí probíhalo také měření teploty vzduchu a zaznamenávání teplotního profilu po tloušťce ostění v několika profilech. Na každé klenbě bylo podle projektové dokumentace osazeno celkem 28 měřicích bodů (obr. 7).

Jednotlivé chladicí okruhy, jejichž délka z praktických důvodů neměla přesahovat 100 m, byly přes dřevěné čílko vyvedeny vně formy bednění, pečlivě označeny a napojeny na zhotovený distributor chladicího média, který umožňoval zapínat a vypínat každý okruh zvlášť a rovněž regulovat tlak a přítok (obr. 8). Před uzavřením bednění a vlastní betonáží bylo doporučeno provést důkladnou tlakovou zkoušku celého chladicího systému. Voda ohřátá v průběhu tuhnutí a tvrdnutí betonu byla shromažďována v kádi, odkud byla následně přečerpávána do tunelové drenáže. Samotné chladicí potrubí bývá nejčastěji zhotoveno z tenkostěnných ocelových trubek připevněných v předepsaných roztečích přes gumovou separaci na armokoš. Celý systém chlazení je po odbednění zainjektován. Společně s chlazením ostění bylo nutné chladit i prostor všech nadvýlomů přídavnými chladicími okruhy.

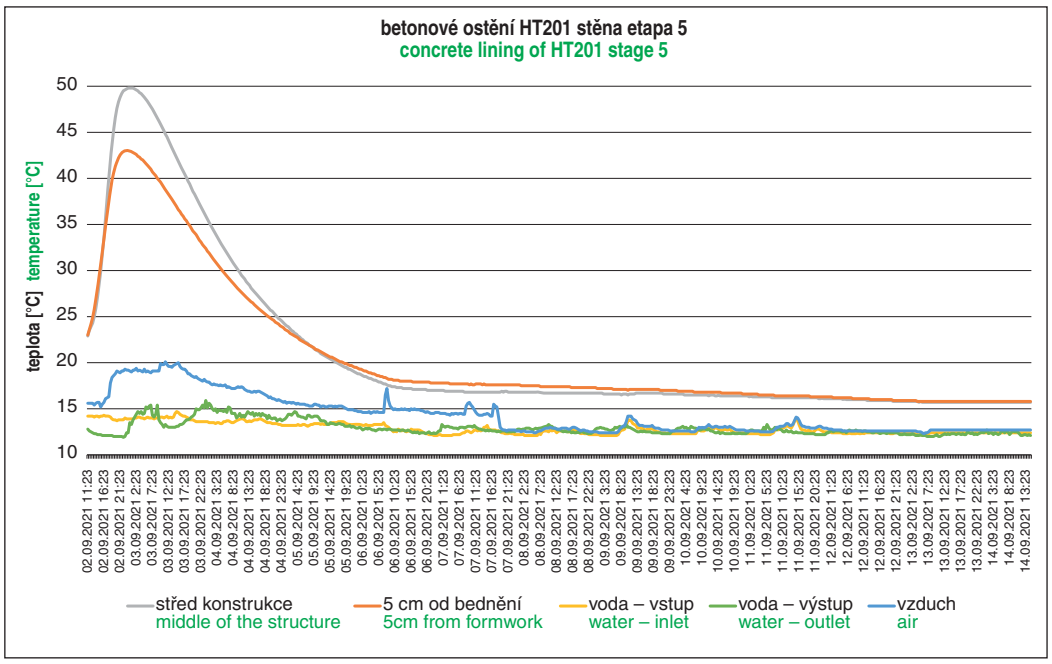


Obr. 6 Armokoš výztuže před posunem formy bednění
Fig. 6 Reinforcement cage before shifting of formwork

monitored on each block of concreting in several measuring profiles by vibrating wire strain gauges. Due to the irregular shape of the lining and its dimensions, the contractor asked the client whether he insisted on placing the strain gauges in the theoretical position, with the answer that the original design should be followed without changes.

COOLING OF CONCRETE LINING

As already mentioned in the previous part of the paper, the thickness of the tunnel lining exceeded the designed thickness of the secondary lining in some places. From the point of view of technical standards and regulations, this is a massive monolithic structure even if all the theoretical dimensions of the lining are observed. Several approaches can be chosen to ensure proper hydration of the concrete, not to exceed the limit values of temperature in the core of the cross-section, and to maintain the temperature gradient between the core of the cross-section and the surface within safe limits. In Scandinavia, they most frequently approach this issue by cooling the concrete structure itself during concrete hydration. Two basic systems are used in practice. The first one, more sophisticated, uses a closed cooling medium circulation system, and the other one, is used when the cooling of the structure is provided by ordinary utility water, which is distributed along the length of the tunnel. In the case of a closed system, when utility water cannot be used for cooling, an expensive heat exchanger and technology for self-control of the cooling process must be provided. In the case of the tunnel lining under Lake Mälaren, a utility water cooling system was used. Based on the chosen recipe of the fresh concrete mixture (primarily the content and type of cement), the average daily temperatures in the given month, the temperature of the fresh concrete and the temperature of the cooling



Obr. 7 Příklad výstupu z teplotního měření východní stěny 5. sekce tunelu HT201
Fig. 7 Example of temperature measurement of eastern wall of section No. 5 of HT201 tunnel

Důkladným chlazením realizované masivní betonové konstrukce, regulací přítoku a tlaku v chladicím potrubí a sledováním všech zaznamenávaných teplot bylo dosaženo bezchybného výsledku a v obou tunelových troubách nebyly při inspekcích zaznamenány žádné teplotní trhliny.

BETONÁŽ, ODBEDŇOVÁNÍ A OŠETŘOVÁNÍ SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ

Testování čerstvého betonu probíhá podle švédských technických předpisů pouze u betonu z prvních tří domíchávačů, při změně betonárny nebo jednou za 8 hodin při výměně obsluhy betonárny, pokud trvá betonáž déle. Více zkoušek čerstvého betonu zadavatel nevyžaduje. Pro vlastní potřebu a pro kontrolu betonárny bylo zakoupeno základní vybavení a každá dodávka betonu na stavbu byla testována. Několikrát se stalo, že byl vrácen domíchávač uprostřed betonáže z důvodu nevyhovujícího provzdušnění betonu nebo špatné konzistence. Za předepsaných podmínek testování by tyto negativní odchylky nebyly odhaleny. V případě kontroly ztvrdlého betonu platí ve Švédsku obdobná pravidla jako v Česku a Slovensku.

Betonáž základových pásů probíhala klasickým způsobem zhutněného betonu. Na betonáž první dvojice stěn byl použit nejprve samozhutnitelný beton stejné receptury jako pro klenbu ostění. Důvodem byl požadavek co nejpřívětivějšího pracovního prostředí v tunelu a omezení negativního vlivu vibrací nutných ke zhutnění klasického betonu na lidský organismus. Ukázalo se ale, že je v takovém případě velice obtížné dosáhnout požadované kvality pohledové strany stěny po odbednění. Příčinou byla nemožnost zajistit souvislou betonáž stěn bez jakéhokoli přerušení především kvůli problémům s transportem čerstvého betonu přes centrum města v ranních a odpoledních hodinách. Pokud se betonáž zastavila pouze na několik minut, vznikl na povrchu viditelný znak přerušení, který nelze v případě samozhutnitelného betonu efektivně ovlivnit, na rozdíl od hutněného betonu, kdy je možné patřičné napojení čerstvého betonu zajistit důkladným provibrováním jednotlivých vrstev. Vyzkoušeno bylo více opatření, zvýšení konzistence čerstvého betonu na SF2, úprava receptury, výtlačná betonáž přes plnicí otvory pomocí gilotin. Žádné z těchto opatření ale nevedlo k uspokojivým výsledkům, proto došlo po domluvě se zadavatelem pro betonáž stěn tunelového

medium, the designer designed a cooling pipeline system. The condition for regulating the flow and pressure in the pipeline was a difference between the temperature of the coolant at the inlet and outlet. The designer also prescribed a minimum time for which the lining must be cooled. Simultaneously with the monitoring of all relevant data on the cooling pipe, the air temperature was also measured and the temperature profile was recorded throughout the wall thickness in several profiles. According to the design, a total of 28 measuring points were installed on each vault (Fig. 7). The individual cooling circuits, the length of which for practical reasons should not exceed 100m, were led outside the formwork through a timber stop end, carefully marked and connected to a manufactured distributor of the cooling medium, which made it possible to turn each circuit on and off separately and also to regulate the pressure and inflow rate (Fig. 8). It was recommended to carry out a thorough pressure test of the entire cooling system before closing the formwork and concreting. The water heated during the setting and hardening of the concrete was collected in a tub, from where it was subsequently pumped into the tunnel drainage. The cooling pipeline itself is most frequently made of thin-walled steel pipes attached at prescribed intervals through a rubber separation to the reinforcement. The entire cooling

Obr. 8 Systém chlazení stěny tunelového ostění
Fig. 8 Tunnel lining wall cooling system

ostění k použití klasického hutněného betonu konzistence S4. Po této změně již k žádným podstatným problémům s povrchem betonu nedocházelo.

V případě betonáže klenby ostění nebylo možné použít klasický beton, protože ho nelze bez možnosti přístupu do formy bednění patřičně zhutnit a vyplnit prostor všech nadvýlomů. Nezbývalo než se pokusit sladit betonáž klenby ostění s dodávkami čerstvé betonové směsi tak, aby bylo zajištěno co možná nejplynulejší plnění formy. Zhotovitel navrhl dodavateli betonu betonáž přes noc, která by měla několik benefitů, z nichž nejpodstatnější bylo snížení teploty čerstvého betonu, možnost využití plné kapacity betonárny jen pro danou betonáž a především plynulejší dodávky čerstvého betonu díky snížení rizika plynoucího z transportu betonu přes hlavní město. Noční betonáž se však nepodařilo s dodavatelem betonu dohodnout. Příčinou byla nevůle zaměstnanců betonárny a dopravce betonu pracovat v noci ani za předpokladu úhrady všech patřičných příplatků zhotovitelem.

Největší kubatura betonáže klenby ostění o objemu cca 480 m^3 byla zahájena v půl šesté ráno a trvala nepřetržitě bezmála 18 hodin. K přepravě betonu byly využity v co nejvyšší míře velkokapacitní domíchávače o objemu 10 m^3. Pro dopravu čerstvého betonu a zabezpečení rovnoměrného plnění formy bednění byly použity současně dvě betonové pumpy (obr. 9). Aby bylo zajištěno také rovnoměrné plnění v podélném směru bloku betonáže, byly vytvořeny z betonářských hadic větve, které spojovaly plnicí otvory vždy v jedné výškové úrovni. Každá pumpa tak v jeden okamžik plnila alespoň dva plnicí otvory. Před zahájením vlastní betonáže došlo k tzv. promazání jednotlivých větví pomocí cementové suspenze, aby nedošlo k ucpání potrubí při zahájení. Po napojení hadic na jednotlivé gilotiny pokračovala betonáž vždy do výšky cca jeden metr nad úroveň daného plnicího místa. Následně došlo k přepojení větve na vyšší úroveň s pokračováním až k vrcholu bednění klenby ostění. Posléze byla jedna pumpa přepojena ke spodní gilotině v čílku a druhá pumpa ke gilotině, která plnila zadní část formy bednění. V průběhu betonáže byla otvory skrz čílko vizuálně kontrolována úroveň čerstvého betonu ve formě. S postupem betonáže byly rovněž zapínány jednotlivé chladicí okruhy, sledovány teploty na příslušných snímačích, tlak a průtok chladicího média. Po uzavření horního sledovacího okna došlo ke zpomalení betonáže až do chvíle, než začal vytékat beton ze špionážních hadic. Poté byla přerušena betonáž na několik minut,

Obr. 9 Betonáž klenby ostění dvěma betonovými pumpami
Fig. 9 Concreting the lining vault by two concrete pumps

system is filled with grout after striking the formwork. Together with the cooling of the lining, it was necessary to cool the space of all overbreaks with additional cooling circuits. Thorough cooling of the completed massive concrete structure, regulation of flow and pressure in the cooling pipeline and monitoring of all recorded temperatures resulted in a flawless result and no thermal cracks were recorded in both tunnel tubes during inspections.

CONCRETE CASTING, FORM STRIKING AND CURING OF THE SECONDARY LINING

Testing of fresh concrete takes place according to Swedish technical regulations only for concrete from the first three mixer trucks, when the concrete batching plant is changed or once every 8 hours when the batching plant operator is changed, if concreting takes longer. The contracting authority does not require more tests of fresh concrete. Basic equipment was purchased for our own use and for inspection of the concrete batching plant, and each delivery of concrete to the construction site was tested. Several times it happened that the mixer truck was returned in the middle of concreting due to inadequate aeration of the concrete or poor consistency. Under the prescribed testing conditions, these negative deviations would not be detected. In the case of checking on hardened concrete, similar rules apply in Sweden as in the Czech Republic and Slovakia. The concreting of the strip footings was carried out using the classic method of compacted concrete. For concreting the first pair of walls, self-compacting concrete of the same formula as for the lining vault was used. The reason was the requirement for the most friendly working environment in the tunnel and the limitation of the negative influence of the vibrations necessary for the compaction of conventional concrete on the human organism. However, it turned out that in such a case it is very difficult to achieve the desired quality of the visible side of the wall after striking the formwork. The reason was the impossibility of ensuring continuous concreting of the walls without any interruption, mainly due to problems with the transport of fresh concrete through the city centre in the morning and afternoon hours. If concreting stopped for only a few minutes, a visible sign of discontinuity appeared on the surface, which fact cannot be effectively influenced in the case of self-compacting concrete, in contrast to manually compacted concrete, where it is possible to ensure proper connection of fresh concrete by thorough vibrating the individual layers. Several measures were tried: increasing the consistency of fresh concrete to SF2, adjusting the concrete recipe, forcing concrete through the filling holes using the guillotines. However, none of these measures led to satisfactory results, so after an agreement with the contractor for concreting the walls of the tunnel lining, classic compacted concrete with consistency S4 was used. After this change, there were no more significant problems with the concrete surface. In the case of concreting the lining vault, it was not possible to use conventional concrete, because without the possibility of access to the formwork, it cannot be properly compacted and fill the space of all overbreaks. All that was left was to try to coordinate the concreting of the lining vault with the delivery of fresh concrete mixture in order to ensure the smoothest possible filling of the

Obr. 10 Měření zralosti betonu pro stanovení času odbednění konstrukce
Fig. 10 Measurement of concrete curing state for determination of formwork striking time

došlo k usazení čerstvého betonu a následnému opatrnému dotlačení betonu do vrchlíku klenby ostění. Tím byla betonáž klenby úspěšně ukončena. Po dokončení betonáže byla ve dne i v noci v několikahodinových intervalech kontrolována funkčnost chladicího systému a regulován průtok a tlak chladicí vody.

V závislosti na lhůtách stanovených projektovou dokumentací a teplotním výpočtem mohly být jednotlivé konstrukční části odbedněny. Pro klenbu ostění bylo vyžadováno, aby byla konstrukce teplotně izolována minimálně 9–14 dní v závislosti na aktuálním ročním období a teplotě vzduchu. Ta se pohybovala v rozmezí 8,5 °C v zimním období, až 18 °C v letním období. Z pohledu nosné funkce bylo vyžadováno dosažení pevnosti v tlaku minimálně 32 MPa. Ve Švédsku je zvykem stanovit konkrétní dobu odbednění na základě přepočtu z teplot měřených v průběhu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Tento přepočet lze sestavit manuálně na základě grafů a tabulek nebo automaticky, kdy je tento proces implementován přímo do datových center, které zaznamenávají jednotlivé teploty (obr. 10). Klasický středoevropský přístup založený na zkoušení několikadenní pevnosti betonových vzorků v laboratoři, kdy je na základě takto změřené pevnosti stanovena reálná doba odbednění, není ve Švédsku obvyklý. V případě betonáže první klenby ostění zhotovitel koreloval oba postupy společně s využitím dalších nedestruktivních metod, jako je např. Schmidtovo kladívko. Bylo dosaženo poměrně dobré shody, proto byl v případě dalších kleneb využíván již jen tradiční skandinávský přístup. Nutno podotknout, že z hlediska izolační funkce ostění a omezení rizika vzniku trhlin byla doba 9 až14 dní dostatečná i k dosažení potřebné pevnosti betonu nutné k odbednění konstrukce. Díky tomu, že bylo ostění uchováno v bednění po takto dlouhou dobu, nebylo třeba provádět žádné ošetřování povrchové vrstvy betonu. Odbedňování základových pásů a stěn se řídilo podobnými kritérii jako odbednění klenby ostění, jež je popsané v předchozí části textu. Pracovní spára mezi základovými pásy, stěnami a klenbou byla vždy patřičně ošetřována.

Po odbednění každého bloku betonáže klenby došlo vždy k vyplnění vrchlíku ostění, provedení vizuální kontroly, broušení pracovních spár a opravám všech povrchových vad. Zadavatel kladl na základě švédských technických standardů velmi vysoké nároky na povrchové vlastnosti ostění a někdy bývá dokonce stanoveno, jaký odstín má betonový povrch mít. Proto bylo třeba některé bloky betonáže dodatečně vybrousit, i třeba jen kvůli několika skvrnám od odbedňovacího oleje. Dalo by se říct, že výsledný produkt tak připomínal pohledový beton, i když tak primárně specifikován nebyl.

form. The contractor proposed overnight concreting to the concrete supplier, which would have several benefits, the most important of which was a reduction in the temperature of the fresh concrete, the possibility of using the full capacity of the concrete plant only for the given concreting case and, above all, smoother supply of fresh concrete due to the reduction of the risk arising from the transport of concrete through the capital. However, overnight concreting could not be agreed with the concrete supplier. The reason was the reluctance of the employees of the concrete batching plant and the concrete carrier to work at night, even if all the appropriate surcharges were paid by the contractor.

The largest volume of concreting of the lining vault, with a volume of approx. 480m^3, was started at half past five in the morning and lasted almost 18 hours non-stop. Large-capacity readymix trucks with a volume of 10m^3 were used as much as possible for the transport of concrete. Two concrete pumps were used simultaneously to transport fresh concrete and ensure uniform filling of the formwork (Fig. 9). In order to ensure uniform filling also in the longitudinal direction of the concreting block, branches were created from concrete hoses that connected the filling openings at one height level. Each pump thus filled at least two filling openings at one time. Before the actual concreting began, the individual branches were lubricated with a cement suspension to avoid clogging of the pipes at the beginning. After connecting the hoses to the individual guillotines, concreting continued to a height of approx. one metre above the level of the given filling point. Subsequently, the branch was connected to a higher level with a continuation up to the top of the formwork of the lining vault. Later, one pump was connected to the lower guillotine in the stop end and the other pump to the guillotine that filled the rear part of the formwork. During concreting, the level of fresh concrete in the form was visually checked through holes through the stop end. As the concreting progressed, the individual cooling circuits were also switched on; the temperatures on the respective sensors, the pressure and the flow of the cooling medium were monitored. After the upper observation gate was closed, concreting slowed down until concrete began to flow from the spy hoses. After that, concreting was interrupted for a few minutes, fresh concrete settled and then the concrete was carefully pressed into the top of the lining vault. Thus, the concreting of the vault was successfully completed. After concreting was completed, the functionality of the cooling system was checked day and night at intervals of several hours, and the flow and pressure of the cooling water was regulated.

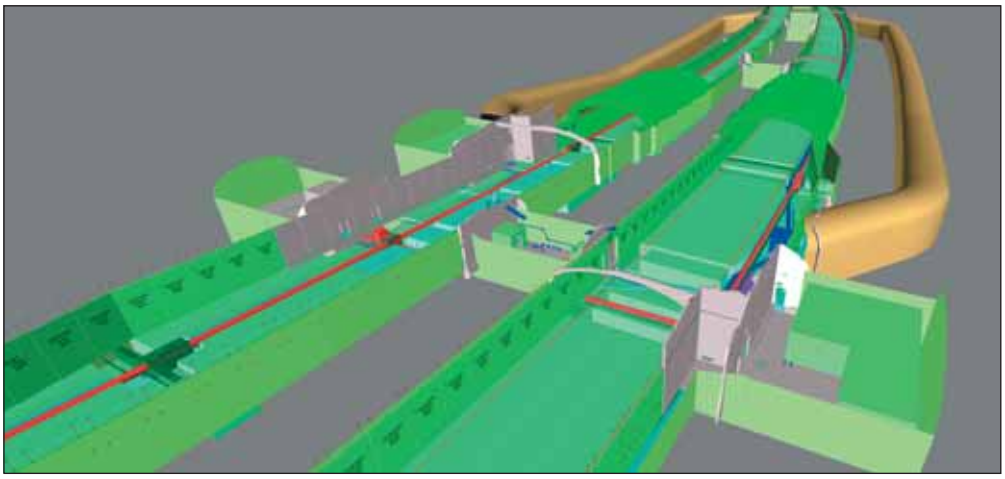
Depending on the deadlines set by the design and the temperature calculation, the formwork of individual structural parts could be stripped. For the lining vault, the structure was required to be thermally insulated for a minimum of 9–14 days depending on the current season and air temperature. It ranged from 8.5°C in the winter to 18 °C in the summer. From the point of view of the load-bearing function, it was required to achieve a compressive strength of at least 32MPa. In Sweden, it is customary to set a specific time for striking the formwork based on a calculation from the temperatures measured during the setting and hardening of the concrete. This conversion can be compiled manually based on graphs and tables or automatically, when this process is implemented directly into data centres that record individual temperatures (Fig. 10). The classic Central European approach based on testing the strength of concrete samples for several days in the laboratory, when the actual striking period is determined based on the strength measured in this way, is not common in Sweden. In the case of concreting the first vault of the lining, the contractor correlated both procedures together with the use of other non-destructive methods, such as

ZÁVĚR

Švédské stavebnictví oproti českému a slovenskému pokročilo v digitalizaci všech stavebních procesů. Oficiální komunikace mezi zhotovitelem a zadavatelem probíhá na denní bázi prostřednictvím databázového chatu. Některá významná témata jsou však stále řešena klasicky formou dopisů. Projektová dokumentace existuje pouze digitálně, je digitálně připomínkována a následně i schvalována a sdílena mezi všemi účastníky výstavby online prostřednictvím cloudového úložiště. Na stejném místě jsou uloženy i všechny technologické postupy, kontrolní a zkušební plány, stavební deníky, závěrečné zprávy a dokumenty, které má provozovatel tunelu kdykoli v průběhu životního cyklu tunelu k dispozici. Všechny konstrukční části jsou modelovány ve 3D a sdružovány do jednoho 3D modelu celého úseku (obr. 11), ve kterém se každý snadno orientuje a který obsahuje odkazy na 2D výkresy a současně i některá základní data a výměry nutné k výstavbě. Zatím nejde o plné BIM řešení, nezbývá ale již mnoho a tento systém bude ve Švédsku standardem.

Švédská kultura je na rozdíl od té středoevropské zaměřena primárně na osoby a jejich pracovní prostředí a komfort a není tolik orientována na cíl a výsledek. V průběhu realizace byla společnost Subterra vyzvána ke spolupráci na výzkumu, který provádí švédský RISE (Research Institutes of Sweden). Výzkum se týkal vlivu pracovního prostředí, hluku a vibrací při hutnění klasického betonu ve srovnání s použitím samozhutnitelného betonu. Zhotovitel tuto nabídku spolupráce přijal a při betonáži stěn osadil své pracovníky čidly měřícími polohu v souřadnicovém systému XYZ a úroveň hluku, gyroskopy, kamerami apod. Měření proběhlo jak při betonáži stěn tunelového ostění samozhutnitelným betonem, tak při betonáži klasickým betonem. Zhotovitel poskytl výzkumníkům kromě naměřených dat i podklady porovnání časové náročnosti a ekonomické stránky. Nyní probíhá celková analýza všech dat.

Švédsko je velice specifická země, Švédové jsou velice osobitý a velmi hrdý národ. Stejně tak je i švédský stavební průmysl v mnoha aspektech z pohledu zhotovitele velmi zvláštní. Zajímavá jsou některá technická řešení. Překvapivé jsou navrhované tloušťky některých železobetonových konstrukcí a stupeň jejich vyztužení. Rozporuplně se může jevit rovněž švédský mimořádný důraz na životní prostředí a elektromobilitu, ve chvíli, kdy jsou navrhovány takto masivní konstrukce, a není dovoleno použití směsných cementů. Mimochodem, těžební limity největšího výrobce cementu ve Švédsku na ostrově Gotland jsou už poněkolikáté dočasně zvyšovány. Při nedostatku cementu probíhá dovoz ze zahraničí, což ekologickou stopu zlepšit nepomůže. Na tomto krátkém úseku délky 40 m v obou tunelových troubách v rámci rozsáhlého projektu



Obr. 11 3D model řešeného úseku
Fig. 11 3D model of the section being solved

Schmidt hammer rebound test. A fairly good agreement was reached, therefore only the traditional Scandinavian approach was used in the case of additional vaults. It should be noted that, from the point of view of the waterproofing function of the lining and the reduction of the risk of cracks, the period of 9 to 14 days was sufficient to achieve the necessary strength of the concrete required for striking the formwork. Due to the fact that the lining was kept in the formwork for such a long time, no treatment of the concrete surface layer was necessary. The striking of strip footings and walls formwork was governed by similar criteria as the stripping of the lining vault, which is described in the previous part of the text. The construction joint between the strip footings, walls and vault was always properly treated. After striking the formwork of each concrete block of the vault, the lining meniscus was always filled, a visual inspection was carried out, the construction joints were grinded and all surface defects were repaired. Based on Swedish technical standards, the client made very high demands on the surface properties of the lining, and sometimes it is even determined what shade the concrete surface colour should have. Therefore, the surface of some concrete blocks had to be additionally ground, even if only because of a few stains from the formwork striking oil. One could say that the resulting product thus resembled architectural finish concrete, even if it was not primarily specified as such.

CONCLUSION

Compared to the Czech and Slovak construction industry, the Swedish construction industry has advanced in the digitisation of all construction processes. Official communication between the contractor and the client takes place on a daily basis via database chat. However, some important topics are still dealt with classically in the form of letters. Design documents exist only digitally, are digitally annotated and subsequently approved and shared among all construction participants online via cloud storage. All technological procedures, inspection and test plans, construction diaries, final reports and documents available to the tunnel operator at any time during the tunnel‘s life cycle are also stored in the same place. All structural parts are modelled in 3D and combined into one 3D model of the entire section (Fig. 11), in which it is easy to navigate for everybody and which contains references to 2D drawings as well as some basic data and dimensions necessary for construction. It is not yet a full BIM solution, but there is not much left and this system will be the standard in Sweden.

Unlike the Central European culture, Swedish culture is primarily focused on people and their working environment and comfort, and is not so much oriented towards goals and results. During the construction, Subterra was invited to cooperate in the research carried out by the Swedish RISE (Research Institutes of Sweden). The research concerned the influence of the working environment, noise and vibration during the compaction of conventional concrete compared to the use of self-compacting concrete. The contractor accepted this offer of cooperation and, during the concreting of the walls, equipped his workers with sensors measuring the position in the XYZ coordinate system and the noise level, gyroscopes, cameras, etc. The measurement took place both during concreting of the tunnel

Obr. 12 Dokončené sekundární ostění tunelové trouby HT202
Fig. 12 Completed secondary lining of tunnel tube HT202

FSE209 bylo použito přibližně 5500 m^3 vysokohodnotného samozhutnitelného, provzdušněného betonu C35/45 s polypropylénovými mikrovlákny, 530 t betonářské výztuže a 8 km chladicího potrubí. Celá výstavba trvala přibližně jeden rok s téměř každodenním nasazením 15 tesařů a betonářů.

Po přečtení tohoto příspěvku čtenáře bezesporu napadne velké množství otázek. Bylo skutečně nutné takto masivní zajištění této poruchové zóny? Pokud ano, nebylo by možné navržené řešení sekundárního ostění optimalizovat, aby nebylo tak komplikované z pohledu realizace a časové náročnosti výstavby? Jedním z návrhů zhotovitele, jak ušetřit čas a následně i náklady, bylo např. dvouplášťové sekundární ostění, kdy by první vrstva sloužila pouze k výplni nepravidelných nadvýlomů. Na ni by následně mohla být osazena klasická hydroizolační membrána, pod kterou by byla zhotovena druhá vrstva ostění konstantní tloušťky. Snížily by se tak nároky na formu bednění i na armování ostění a odstranila by se řada dalších komplikací souvisejících s betonáží a chlazením. Z časových důvodů a návazností dalších prací však k žádným změnám ani optimalizaci nedošlo.

V době tvorby tohoto příspěvku je již v obou tunelových troubách sekundární ostění kompletně zrealizované a úspěšně předané klientovi (obr. 12).

Ing. JAN FALTÝNEK, Ph.D., MBA, EUR ING,
jan.faltynek@sbtsweden.se, Subterra a.s.

Recenzoval Reviewed: Ing. Vladimír Prajzler

lining walls with self-compacting concrete and during concreting with conventional concrete. In addition to the measured data, the contractor also provided the researchers with materials for comparing time requirements and economic aspects. An overall analysis of all data is now underway.

Sweden is a very specific country; the Swedes are a very distinctive and very proud nation. In the same way, the Swedish construction industry is also very special in many aspects from our point of view. Some technical solutions are interesting. The designed thicknesses of some reinforced concrete structures and their reinforcement content are surprising. Sweden‘s extraordinary emphasis on the environment and electromobility can also appear contradictory, when such massive structures are being designed, and the use of blended cements is not allowed. By the way, the mining limits of Sweden‘s largest cement producer on the island of Gotland have already been temporarily increased several times. When there is a shortage of cement, it is imported from abroad, which does not help to improve the ecological footprint. Approximately 5,500m^3 of high-grade self-compacting, aerated concrete C35/45 with polypropylene microfibres, 530t of concrete reinforcement and 8km of cooling pipes were used in this short 40m long section in both tunnels as part of the extensive FSE209 project. The entire construction lasted approximately one year with the almost daily deployment of 15 carpenters and concrete workers.

After reading this paper, the reader will no doubt have a lot of questions. Was it really necessary to secure this fault zone so massively? If so, wouldn‘t it be possible to optimise the designed solution of the secondary cladding so that it is not so complicated from the point of view of construction and time-consuming work? One of the contractor‘s proposals to save time and subsequently costs was, for example, a two-layer secondary lining, where the first layer would only serve to fill irregular overcuts. A classical waterproofing membrane could subsequently be fitted on its surface, under which a second layer of cladding of constant thickness would be made. This would reduce the demands on the formwork and on the reinforcement of the lining, and a number of other complications related to concreting and cooling would be eliminated. However, due to time reasons and the continuity of other work operations, no changes or optimisation took place. At the time of writing this paper, the secondary lining in both tunnels has already been completed and successfully handed over to the client (Fig. 12).

Ing. JAN FALTÝNEK, Ph.D., MBA, EUR ING,
jan.faltynek@sbtsweden.se, Subterra a.s.

LITERATURA / REFERENCES

[1] NĚMEČEK, T., PŘENOSIL, M. Förbifart Stockholm – projekt FSE210. *Tunel* 2017, *1*, 62–73.
[2] NĚMEČEK, T. Förbifart Stockholm – projekt FSE209 ražený tunel Skärholmen. *Tunel* 2017, *4*, 17–29.
[3] NĚMEČEK, T. Ražba pod jezerem Mälaren – Förbifart Stockholm projekt FSE209. *Tunel* 2019, *2*, 30–38.
[4] *E4 The Stockholm bypass.* Project, 2022. Trafikverket. https://bransch.trafikverket.se/en/startpage/projects/Road-construction--projects/the-stockholm-bypass/ (accessed Oct 10, 2022).
[5] *Projektová dokumentace E4 Förbifart Stockholm – FSE209 Mälarpassage Sätra – Kungshat*. Stavební projekt. Zpracoval ÅF Infrastruktur, Stockholm 2021.
[6] *Celostátní sčítání dopravy 2020*. ŘSD ČR. https://scitani.rsd.cz/CSD_2020/pages/map/default.aspx (accessed Oct 10, 2022).