

TUNEL HOLSTEIN NA DÁLNICI A44 – RAŽBA V KOMPLIKOVANÉM GEOLOGICKÉM PROSTŘEDÍ

P. Farský & Z. Chaloupka

Subterra a.s., Praha, Česká republika

J. Mathis & B. Schmitz

BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck, Rakousko

ABSTRAKT: Tunel Holstein, tvořící obchvat města Sontra v Hesensku, je součástí výstavby dálnice A44 mezi německými městy Kassel a Eisenach. Stavba je součástí projektu „Verkehrsprojekt Deutsche Einheit“, jehož cílem je propojení starých a nových spolkových zemí.

Tunel Holstein je dvoutubusový konvenčně ražený tunel o délce 1 664 metrů. Stavbu realizuje sdružení ARGE Tunnel Holstein, tvořené společnostmi Bemo Tunneling GmbH a Subterra a.s.. Dalšími členy sdružení jsou společnosti Josef Rädlinger Bauunternehmen GmbH a Stutz GmbH, které realizují zemní práce a vozovky. Investorem je DEGES GmbH, projektově jej připravila společnost BUNG Gruppe s využitím metodiky BIM v úrovni LOD 300/400, včetně 4D a 5D modelování pro řízení času a nákladů.

Ražba tunelu byla zahájena v březnu 2025. Použitá technologie odpovídá zásadám NRTM s využitím zajišťování výrubu pomocí příhradových rámců a stříkaného betonu. Dokončení ražeb se předpokládá v polovině roku 2026. Již v průběhu ražeb byla zahájena betonáž definitivního ostění v obou tunelových troubách.

Hydrogeologické podmínky v trase tunelu jsou mimořádně náročné. Tunel prochází regionálně významným Sonterským příkopem, kde se vyskytují četné poruchové zóny, krasové jevy, propady, vývěry vody, projevy erozní činnosti. Horninové prostředí je klasifikováno jako velmi proměnlivé, s výskytem pískovců uložených v šikmých vrstvách při portálech, kompaktního dolomitu a vápence uprostřed tunelu a sedimentů zechsteinského souvrství na rozhraní těchto dvou zón. Z hlediska geomechaniky je prostředí zechsteinu velmi nestabilní a jeho vlastnosti se rychle mění a jsou těžko předvídatelné. Roli hraje vysoká míra nasycení vodou a silné lokální vývěry.

Ražby východní i západní tunelové trouby jsou realizovány úpadně z jižního portálu. Severní portál nedisponuje prostorem pro zařízení staveniště a příjezdová komunikace neumožňuje dopravu materiálu. Významnou roli hraje i využití výlomu, kdy materiál z ražby je přímo zpracováván pro násypy a parkovací plochy navazující na jižní portál tunelu. Projekt je příkladem moderního přístupu k výstavbě konvenčně ražených tunelů v Německu, a to jak z hlediska technického řešení, tak i projektového řízení.

1. ZÁKLADNÍ INFORMACE A KONTEXT PROJEKTU

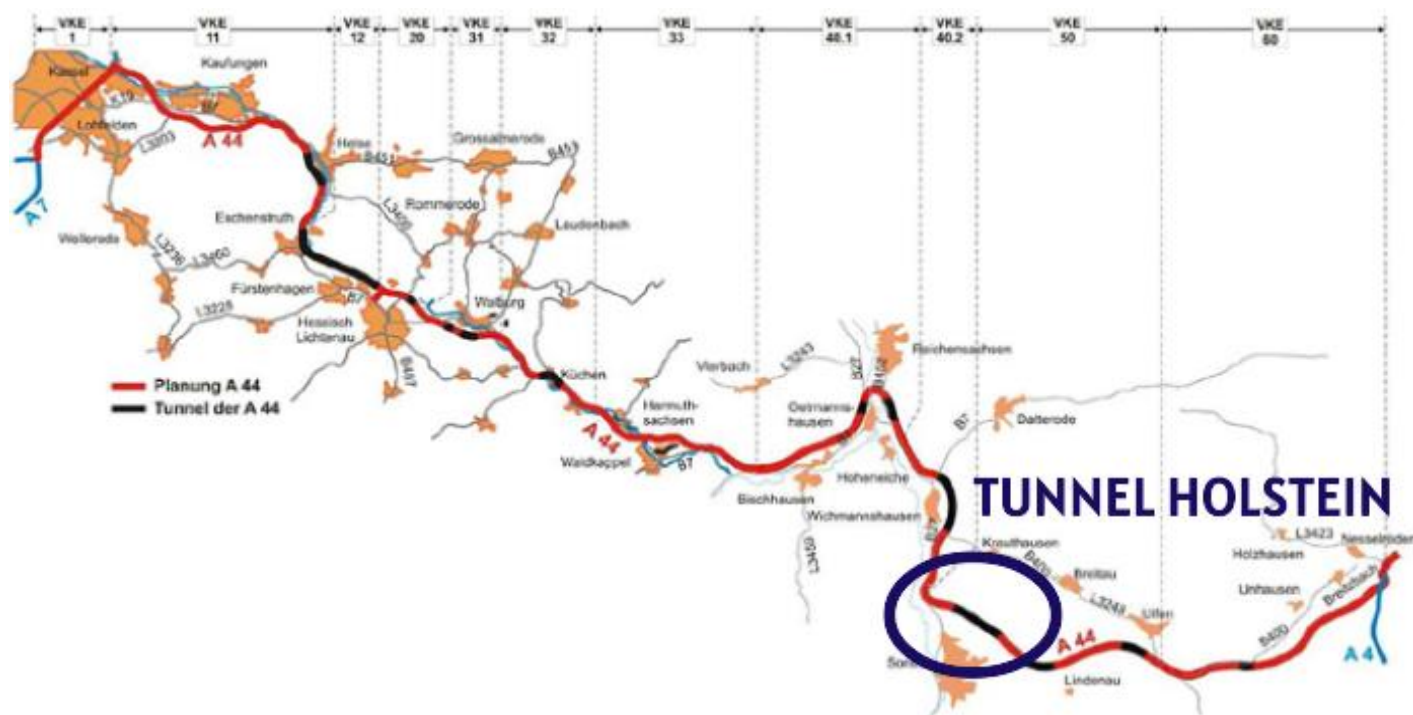
Tunel Holstein je součástí novostavby dálnice A44, tvořící propojení mezi dálnicemi A7 a A4, konkrétně mezi městy Kassel a Eisenach. Tato stavba je významným spojením mezi starými a novými spolkovými zeměmi Německa. Jejím cílem je odlehčení silniční sítě od tranzitní dopravy.

Tunel Holstein je jedním z klíčových objektů stavebního úseku BA 4.1, jenž s ostatními objekty propojuje již dokončený úsek mezi mimoúrovňovými křižovatkami AS Sontra-West a AS Sontra-Mitte směrem k navazujícímu úseku BA 4.2. Tunel je veden ve dvou jednosměrných troubách (východní a západní), každá v délce přibližně 1,65 km. Je ražen konvenční metodou NRTM.

Investorem projektu je společnost DEGES – Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs und bau GmbH, která je odpovědná za velká infrastrukturní stavby po celém Německu. Realizaci provádí sdružení ARGE A 44 Tunnel Holstein. Toto sdružení se skládá ze dvou částí. ARGE Tunnel Holstein, zahrnující naši sesterskou společnost BEMO Tunnelling GmbH, NLW a Subterra a.s., zajišťuje realizaci samotného tunelu. Druhou částí je ARGE A 44 Streckenbau Holstein, kde firmy JR Bauunternehmen GmbH a Stutz GmbH zodpovídají za výstavbu zbývajících částí trasy. Projektově stavbu připravila společnost BUNG Gruppe s využitím

metodiky BIM v úrovni LOD 300/400, včetně 4D a 5D modelování pro řízení času a nákladů. Realizační dokumentaci zpracovalo technické oddělení BeMo Tunnelling GmbH v Innsbrucku.

V rámci výstavby dálnice A44 realizovala Subterra a.s. již mezi lety 2017 a 2022 výstavbu 10 km vzdáleného tunelu Spitzenberg a přilehlých dálničních úseků spolu se sesterskou společností BeMo Tunnelling GmbH a společností Stutz GmbH.



Obrázek 1: Schématický přehled celé trasy A44.

1.1 HISTORIE PROJEKTU

Projekt propojení měst Kassel a Eisenach dálniční stavbou vznikl již ve 20. letech minulého století. Některé objekty se začaly realizovat v roce 1940, avšak vlivem nedostatku financí byla výstavba zastavena. Protože tato komunikace měla spojit dvě spolkové země na opačné hranici východního a západního Německa, ztratila stavba po 2. světové válce význam a v její realizaci již nebylo pokračováno. Až po znovusjednocení Německa v roce 1990 vzrostl zásadním způsobem provoz na silnicích a tím i dopravní zatížení obcí v této oblasti. Z toho důvodu byla novostavba dálnice A44 Kassel (A7) – Herleshausen (A4) zahrnuta do prioritních staveb jako projekt VDE číslo 15. VDE (Verkehrsprojekt Deutsche Einheit) tvoří 17 velkých infrastrukturních projektů, jejichž cílem je modernizovat a dlouhodobě posílit spojení mezi bývalým východním a západním Německem. Tato stavba je také součástí transevropské dopravní sítě TEN.

V 90. letech bylo ukotveno trasování dálnice a začaly projekční práce. Od roku 2000 je postupně realizován celý úsek směrem od města Kassel k dálnici A4. V současné době je již uvedena do provozu většina úseků této dálnice, zbývající úseky jsou v realizaci. Na poslední několikakilometrový úsek trasy A44 s tunely Bubenrad a Dachsloch, navazující na naši stavbu, bude vypsána veřejná soutěž v roce 2026.

1.2 VÝSTAVBA DÁLNIČNÍ A44

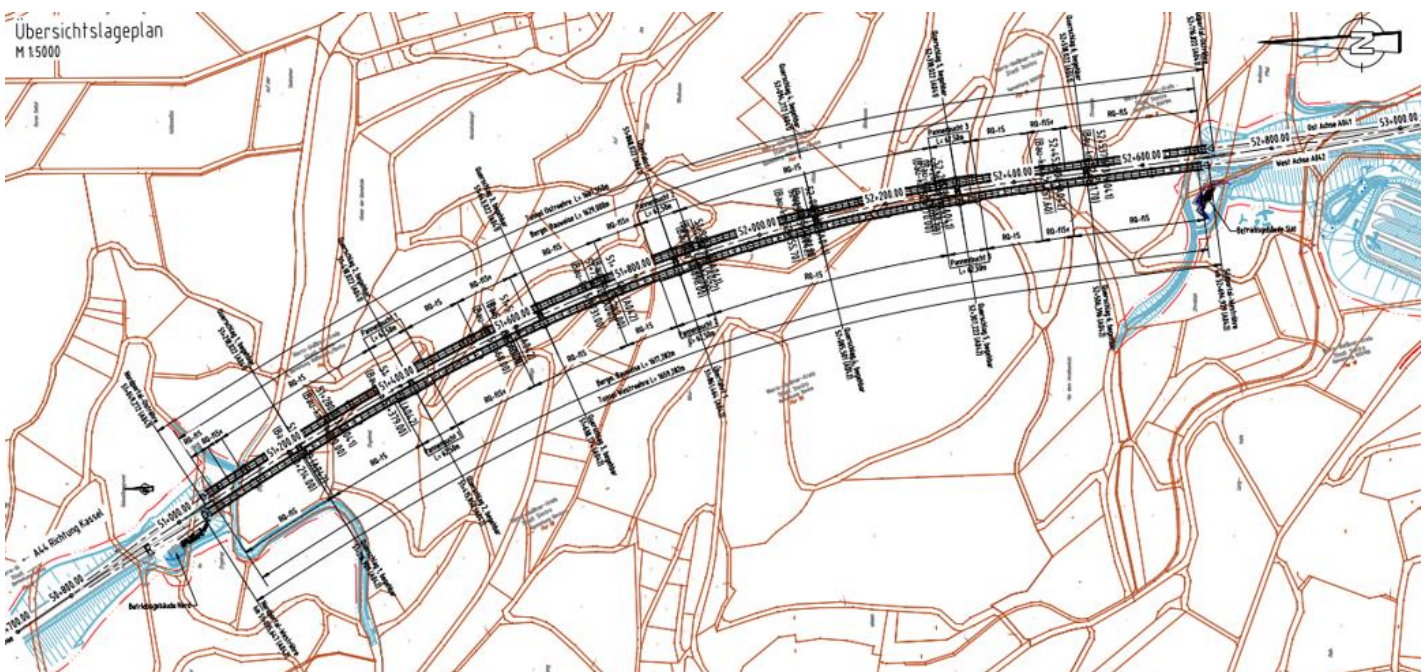
Trasa dálnice prochází pahorkatinným územím přírodního parku Meißner-Kaufunger Wald v podhůří pohoří Harz. Nejbližší okolí tunelu Holstein je součástí geoparku s názvem Frau-Holle-Land. Trasování dálnice údolím nepřicházelo v úvahu, neboť se zde nacházejí rozsáhlé obydlené oblasti. Výhledová dopravní zátěž, nároky na bezpečnost a environmentální limity chráněného území vedly k řešení trasy dálnice s vysokým počtem tunelů a mostních objektů protínajících úbočí místních kopců.

Na 64,3 km dlouhé dálnici A44 bude vybudováno celkem 15 velkých mostních objektů s celkovou délkou cca 4 km a 13 tunelových staveb s celkovou délkou přesahující 14 km. Dále zde vznikne množství dalších přemostění, propustků, opěrných a zárubních zdí, mnoho rozsáhlých zajištění svahů a četné ochranné

stěny. V kombinaci s geologickou složitostí území je tento úsek jedním z technicky nejnáročnějších dálničních projektů v Německu.

2. ZÁKLADNÍ ÚDAJE O STAVBĚ

Název:	Tunnel Holstein, AS Sontra West bis TB Riedmühle VKE C231
Investor stavby:	DEGES GmbH
Zhotovitel stavby:	ARGE A 44 Tunnel Holstein
Zhotovitel tunelové části:	ARGE Tunel Holstein – BEMO Tunnelling GmbH, NLW a Subterra a.s
Umístění stavby:	A44 Kassel – Herleshausen, Sontra, severní Hesensko, Německo
Plánovaný termín výstavby:	11/2024 – 05/2027
Délka tunelu:	VTT 1667 m, ZTT 1659 m
Předpokládané náklady stavby:	219.252.043,75 EUR, tunelová část: 114.934.842,55 EUR



Obrázek 2: Situační schéma tunelu.

Stavební úsek BA 4.1 začíná stávající mimoúrovňovou křižovatkou Sonta – West severně od historického hornického města Sontra v severním Hesensku u hranic s Durynskem a Dolním Saskem. Odtud vede trasa jihovýchodním směrem k úpatí vrcholu Holstein (462 m n. m.) a pokračuje v pravotočivém oblouku 1659/1667 m dlouhým tunelem. Následně trasa míří východně k mimoúrovňové křižovatce Sontra – Mitte. Zde je dálnice A44 napojena na dopravní síť pomocí cca 1 km dlouhého dálničního přivaděče.

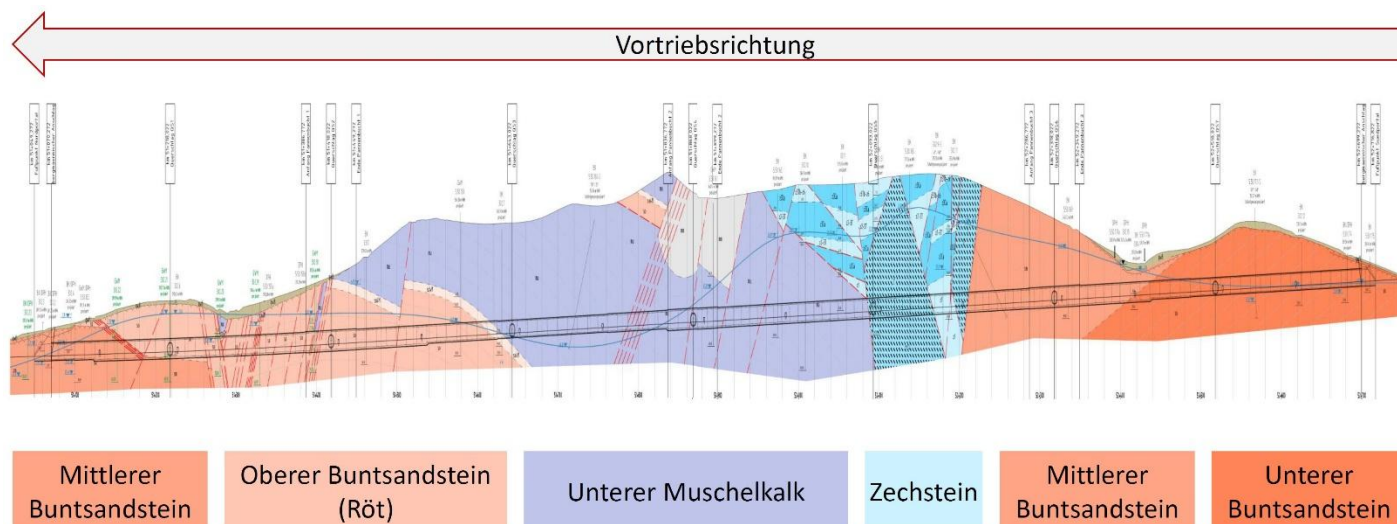
V této oblasti navíc vznikne velká jednostranná dálniční odpočívka (PWC) spolu s provozní budovou a přemostěním. Nezbytné bude taktéž provedení rozsáhlých zajištění svahů.

Konstrukční řešení tunelů tvoří dvě dvoupruhové jednosměrné tunelové trouby propojené sedmi tunelovými propojkami. Prostřední propojka je průjezdná. Ostatní propojky jsou průchozí a každá druhá je doplněna nouzovými zálivy v obou tunelových troubach.

Tunel je budován v souladu s pravidly ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten) – Dodatečné technické smluvní podmínky a směrnice pro inženýrské stavby. Jedná se o v Německu obecně platné a závazné technické a kvalitativní podmínky pro výstavbu, v našem případě se uplatňuje zejména oddíl 5 – Výstavba tunelů. Realizace tunelových staveb v Německu probíhá prakticky bezvýhradně podle těchto standardů platných pro všechny investory, kteří proto dále neaplikují vlastní nebo doplňující technické a kvalitativní podmínky.

3. GEOLOGICKÉ PROSTŘEDÍ

Tunel Holstein prochází z geologického hlediska velmi pestrým a složitým územím. Jedná se o regionálně významný geomorfologický celek, tzv. Sonterský příkop, kde je sled hornin narušen v důsledku intenzivního tektonického přetvoření a porušení. Vyskytují se zde četné poruchové zóny, krasové jevy, propady, vývěry vody a silné projevy erozní činnosti. Jelikož má tunel Holstein ze všech tunelů na trase dálnice A44 ty nejnáročnější geologické podmínky, bylo od začátku zřejmé, že přinesou projektovému týmu zvláštní výzvy.



Obrázek 3: Geologický řez tunelem.

Horninové prostředí tunelu je klasifikováno jako velmi proměnlivé s výskytem Buntsandsteinových formací při portálech a oblastí kompaktních vápencových ker Muschelkalku uprostřed, na rozhraní těchto dvou zón jsou tektonicky vklíněny sekvence Zechsteinského souvrství.

Buntsandstein (v překladu pestrý nebo barevný pískovec) je sediment spodního triasu vyskytující se v oblasti Germánské pánve. V této lokalitě má výrazně červenou barvu a je uložen v relativně tenkých vrstvách. Je tvořen primárně pískovci, jílovcem a prachovci. Vyskytují se v nich lokálně i tenké vrstvy vápence, anhydritu a sádrovce. V oblasti tunelu Holstein mají vrstvy mocnost od několika mm až do nižších desítek cm, a jsou často na svém styku proloženy zbytky jílu, díky kterým relativně snadno degradují. Vrstvy jsou uloženy šikmo střídavě na východ nebo na západ, ale vždy s mírným sklonem na sever. Vlastnosti této horniny extrémně kolísají, zastíženy byly velice kompaktní formace, kdy bylo nutné používat trhací práce, formace narušené, lamelovitého charakteru s velmi rozvinutým puklinovým systémem, náchylné k dalšímu rozpadu, i formace velmi zvětralé, drobivé, se soudržností odpovídající spíše charakteristice zemin. Hydrologická situace je v oblasti pevnějších pískovců poměrně příznivá, neboť puklinový systém dobře odvádí podzemní vodu. Na styku Buntsandsteinu a Zechsteinu se v této lokalitě hojně vyskytuje vrstva měděné břidlice (Kupferschiefer). V Sontře a okolí byly tyto měděné rudy intenzivně těženy od 15. století do 70. let 20. století.

Muschelkalk je karbonátový a sulfátový sediment středního triasu vyskytující se severně od Alp. Tato hornina je tvořena zejména vápencem, dolomitem, v menší míře je zde přítomen i anhydrit a sádrovec. Z hlediska ražeb se jednalo o poměrně příznivou kompaktní horninu často narušenou menšími poruchami. Pro její rozpojování bylo vždy nutné používat trhací práce. V oblasti byly rovněž vyšší přítoky vody a předpokládalo se výskyt krasových jevů, proto musely být pravidelně prováděny průzkumné vrty. Na rozhraní této geologické oblasti byly do vápence vklíněny vrstvy zechsteinu na jihu a pískovcové formace na severu.

Zechstein je nehomogenní sediment permského stáří. Tvoří jej zejména hořčnaté a draselné soli v kombinaci s anhydritem, sádrovcem, vápencem, dolomitem a reziduálními jíly a jílovcem. Z hlediska geomechaniky se jedná o velmi nestabilní horninové prostředí, jeho vlastnosti se rychle mění a jsou těžko předvídatelné. Hraje zde značnou roli míra nasycení vodou. V některých úsecích působil zechstein

poměrně stabilně, většinou se ale jeho vlastnosti velmi rychle měnily, a to i v rámci jedné čelby. V některých vrstvách silně nasycených vodou se jeho konzistence dala přirovnat k rozsolenému sněhu na zimní sinici. Místy se zde vyskytly i masivní lokální vývěry vody. Toto horninové prostředí je pro konvenční ražbu značně nepříznivé, rizikové s nevyzpytatelnými vlastnostmi. Klade tak vysoké nároky na technický tým i na ražbové osádky.

Ani z geomorfologického hlediska se nejedná o jednoduchou lokalitu. V celé délce tunelu se vyskytují četné tektonické poruchy. Nejvyšší mocnost nadloží je zhruba 75 m. Přibližně 250 m od jižního portálu prochází tunel kritickou oblastí prohlubně, kde výška nadloží klesá na pouhé 3-4 m. V úseku 280 - 150 m před dosažením západního portálu se rovněž vyskytuje významná poruchová zóna s další oblastí nízkého nadloží, v nejnižším místě jen 5 m.



Obrázek 4: Čelba kaloty VTT v TM 1051 TM, Obrázek 5: Čelba kaloty VTT v TM 455.

4. ZAŘÍZENÍ STAVENIŠTĚ, TUNELOVÉ PORTÁLY

Zařízení staveniště bylo investorem předáno zhotovitelům v listopadu 2024. Okamžitě byly zahájeny práce na přípravě jižního portálu a úpravách plochy zařízení staveniště. Prioritou bylo zahájení ražeb v co nejbližším termínu s kompletním potřebným zázemím pro realizaci.



Obrázek 6: Jižní portál včetně zařízení staveniště.

Výstavba jižního portálu, ze kterého se realizují ražby, probíhala souběžně s přípravou ploch pro budoucí dálniční těleso a dálniční odpočívku. Zemní práce na portálech byly v souladu s projektem prováděny po

etážích s průběžným zajišťováním svahů. Vytěžený materiál byl přímo zpracováván do násypů dálnice a do ploch potřebných pro zařízení staveniště. V okolí portálu byla provedena opatření pro odvedení srážkových vod.

Příprava severního portálu probíhala od listopadu do prosince 2024 současně s dalšími zemními pracemi pro těleso dálnice v této lokalitě. Zářez je v současnosti realizován po první kotevní úrovni, dokončení je naplánováno těsně před prorážkou. Práce v oblasti severního portálu limituje přístup po úzké místní komunikaci s velkým podélným sklonem, která prochází rozptýlenou zástavbou na okraji města Sontra. Návozy materiálu, strojů, a hlavně odvoz rubaniny je velmi omezen, zejména s ohledem na limity dopravního zatížení okolí. Z těchto důvodů není severní portál vodný pro realizaci ražeb, obě tunelové trouby se budou na tomto portále pouze prorážet.

V prostoru jižního portálu bylo nutné vybudovat objekty zařízení staveniště, které jsou umístěny částečně v dalších zářezech ve svahu, částečně na nových náspech. V bezprostřední blízkosti portálu byl zřízen sklad materiálu. Na druhé straně plochy je umístěno malé buňkoviště pro provozní směnové techniky, sociální zařízení, dílna pro opravy strojů, sklad PHM, sklad čerpaných trhavin, sklad urychlovače, heliport a v nejjednodušším v místě také sklad trhavin.

Přímé zpracovávání materiálu výrubu do nově budovaných násypů umožňuje průběžně rozšiřovat prostor zařízení staveniště před portálem, který je potřebný zejména pro montáž betonážních sestav a skladování výztuže pro definitivní obezdívku.

Zařízení pro vodní hospodářství stavby je umístěno v údolí pod portálem v blízkosti místní vodoteče, do které jsou vypouštěny přečištěné vody. Jedná se o sestavu sedimentačních nádrží a kapacitní neutralizační stanici. Přestože se stavba nenachází v oblasti se zvýšenou ochranou vod, je v Německu tradičně nutné dodržovat velmi přísné limity pro znečištění vypouštěné vody.

Rozsáhlé buňkoviště pro vedení projektu, parkoviště a šatny byly zřízeny na opačné straně údolí v blízkosti přístupové komunikace (budoucího dálničního přivaděče). V tomto prostoru byly také postaveny dvě mobilní betonárny s plochou pro skladování kameniva a písku. Protože je toto území mimo oblast budoucí trasy dálnice a je nezávisle přístupné, je možné instalované zařízení ponechat v provozu až do dokončení celé stavby.

Aby bylo možné zajistit plnou dopravní obslužnost tunelu v souběhu s prováděním zemních prací v členitém terénu bez ohledu na klimatické podmínky, byly v prostoru celého zařízení staveniště zřízeny obslužné komunikace s asfaltovým povrchem, vyasfaltovány byly taktéž nezbytné parkovací plochy.

5. RAŽBY

Ražby byly zahájeny v polovině března 2025 ve východní tunelové troubě (VTT) kalotou. V západní tunelové troubě (ZTT) byly započaty zhruba o měsíc později po dosažení předstihu ve východní troubě v délce 208 m. Od tohoto okamžiku běžely ražby obou kalot paralelně. Od července byly zahájeny ražby opěří a následně i dna. Nejprve byly prováděny střídavě ve východní a západní tunelové troubě, od ledna 2026 byly zahájeny ražby i na druhém pracovišti opěří a dna. Od ledna 2026 probíhají práce na čtyřech dílčích čelbách zároveň.

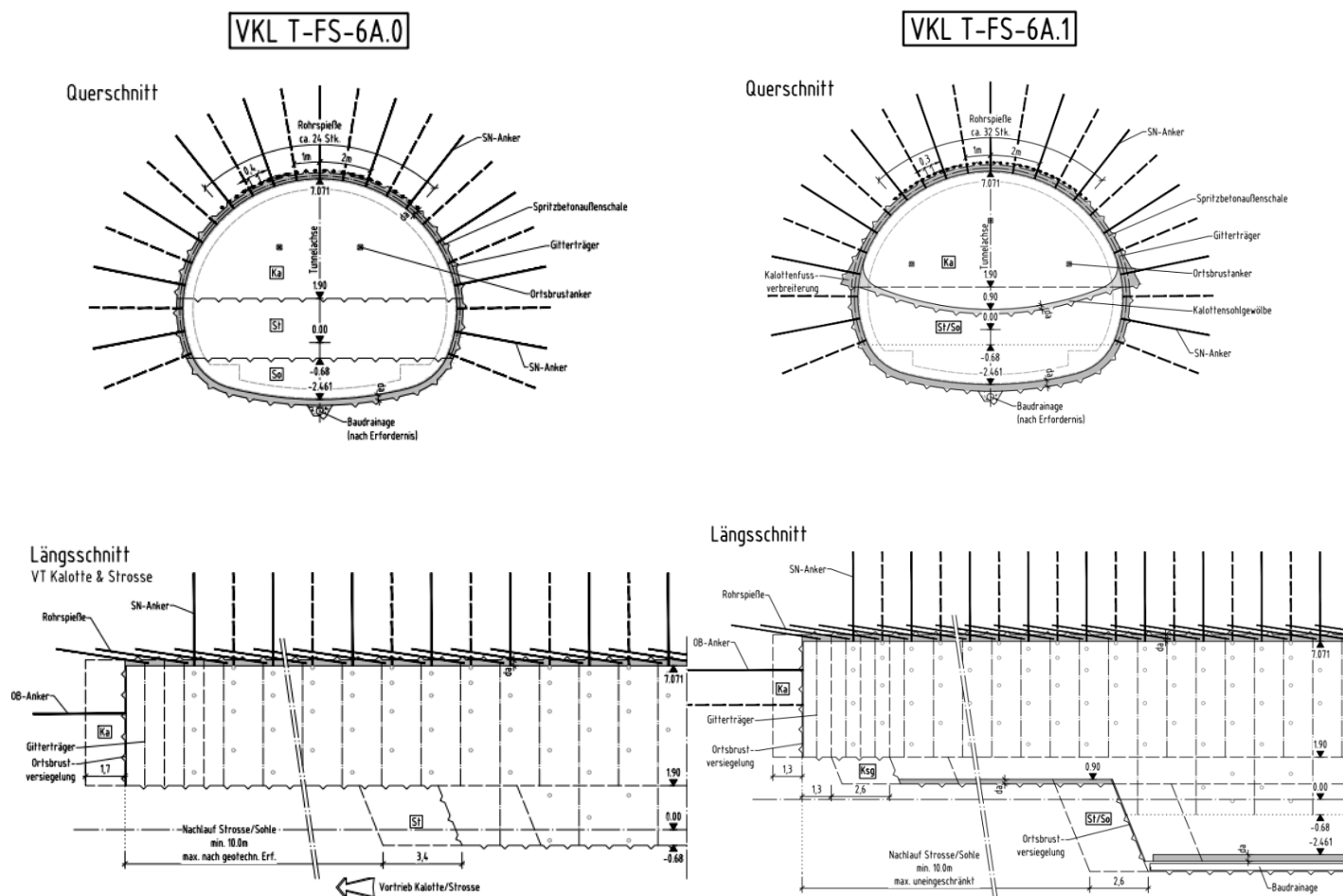
Celkové projektované délky tunelových trub jsou 1 667 m (VTT) a 1 659 m (ZTT), přičemž ražené části dosahují délek 1 629 m (VTT) a 1 617 m (ZTT); v obou troubách je navržena spodní klenba v celé délce.

Ražby probíhají dle zásad Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) úpadně od jižního portálu ve sklonu 2,74 %. Technologie rozpojování je cca 50 % mechanické rozpojování a 50 % trhací práce. Čelba je dělena horizontálně na kalotu, opěří a dna. Plocha výrubu v typickém profilu je přibližně 95 m², v profilu nouzového zálivu je přibližně 120 m².

Prvních přibližně 450 m bylo raženo ve formacích Buntsandsteinu s velmi rozmanitou pevností a soudržností, poté následovalo asi 150 m prostředí Zechsteinu, který postupně vystřídala vápencová oblast. Po dalších 500 m vápence opět nahradily horniny Buntsandsteinu lokálně s ještě horšími geomechanickými vlastnostmi než v prvním portálovém úseku.

Pro ražby byly využity zejména třídy 6A.0 s tloušťkou ostění 25 cm a délkami záběru 1 m, 1,3 m nebo 1,5 m a třída 6A.1 s tloušťkou ostění 30 cm a délkami záběru 1,3 m, v horších geologických podmínkách 1 m. Ve třídě 6A.1 se rovněž uzavírá dno kaloty s odstupem dvou záběrů na délku vždy dva záběry najednou. Zajištění výrubu je standardní, mění se dle definice dané třídy: zastříkání čelby a výrubu, příhradový rám, dvě vrstvy svařovaných sítí, radiální kotvení a jehlování. Čelbové kotvy a větší počet jehel se realizuje na základě posouzení aktuální situace geologem. Pro jehlování jsou využívány ocelové neinjektované trubky průměru 51 mm, tloušťka stěny min. 3 mm. Trubky díky svému většímu průřezu poskytují lepší statickou podporu a jejich nižší hmotnost usnadňuje manipulaci.

Třídy s mikropilotovými dešťníky nebo vertikálním členění kaloty nebyly zatím využity.



Obrázek 7: Schéma zajištění pro třídy ražeb 6A.0 a 6A.1.

V oblastech s předpokladem výskytu krasových jevů byl projektovou dokumentací předepsán jejich průzkum (Karsterkundung). Cílem je minimalizace rizik vyplývajících z dutin (otevřených nebo vyplněných vodou/bahnem) pro ražbu i budoucí provoz tunelu. Opatření prováděná v karbonátových horninách náchylných ke krasování (Muschelkalk a částečně Zechstein) se dělí do dvou stupňů:

- 1. stupeň: Předstihové průzkumné vrty z čelby, které vějířovitě zkoumají prostor výrubu a okolního horninového masivu s dostatečným předstihem a přesahem. Typ a rozsah vrtů závisí na třídě výrubu a použitých prvcích předstihového zajištění, např. vrty pro jehlový dešťník nebo mikropilotový dešťník mohou částečně nahradit vrty pro průzkum krasu.
- 2. stupeň: Geofyzikální průzkum po dokončení ražeb. Zde se používá kombinace mikrogravimetrie a seismiky.

Celkově byl průzkum krasu prováděn v pěti úsecích v délce celkem 1400 m v obou troubách. Předstihové vrty 1. stupně se provádějí jako plnoprofilové bez jádrování o délce 12 m a s vnějším průměru 55–70 mm pomocí tunelové vrtací soupravy.

Standardní schéma vrtů (ražba s jehlováním, bez mikropilot, bez čelbových kotev):

- Z kaloty: celkem 11 průzkumných vrtů v různých pozicích v čelbě. 8 vrtů v čelbě je vrtáno se stoupáním cca 10–13°; 3 vrty u počvy kaloty jsou vrtány s úpadem cca 10, resp. 20°; vrty v bocích, v patách klenby a ve vrcholu se střídavě vyklánějí pro lepší pokrytí masivu.
- Z opěří (pro průzkum dna): vrtají se 3 vrty s úpadem 20°, resp. 30°.

5.1 KALOTA

Ražby kaloty probíhají se zhruba 200 m předstihem ve východní tunelové troubě, jejíž prorážka se předpokládá v dubnu 2026. Doposud nedošlo k žádnému závažnému přerušení ražeb s výjimkou dvou míst v TM 512 a 583 v oblasti Zechsteinu, kde si dočasné přítoky vody s vydatností až 50 l/s vynutily přerušení razicích prací na několik dní. Ve východním ostění kaloty bylo nutné vyvrtat odvodňovací vrty a provést další nezbytná opatření – vybudování dalšího odvodňovacího potrubí a instalace čerpacích stanic. Partnerem ve sdružení byly rovněž nasazeny vakuové cisterny pro likvidaci zachycených vod. Při dalším postupu ražeb se velmi dobře osvědčilo vrtání odlehčovacích vrtů.

V nepříznivých geologických podmínkách, zejména v oblasti Zechsteinu, byla aplikována opatření pro zajištění lepší stability: zkrácení záběru na 1 m, zvětšení tloušťky stříkaného betonu až na 40 cm a v obzvláště náročných úsecích byla kalota uzavírána protiklenbou. Lokálně na krátkých úsecích s nestabilní čelbou byla kalota otevírána na 8 dílčích ploch, v každé byla provedena čelbová kotva délky 12 m s převázkou, uprostřed byla čelba přitížena čelbovým klínem. O tomto opatření se rozhodovalo operativně dle aktuální situace na čelbě kaloty.

Ražba kaloty v západní tunelové troubě probíhá za nepatrně lepších podmínek. Prostor je již částečně odvodněn východní TT, dle geologického průzkumu navíc leží z části za hranicí tektonického zlomu a má tedy v některých úsecích příznivější horninové prostředí.



Obrázek 8 a 9: Průval vody na kalotě v oblasti Zechsteinu.

5.2 OPĚŘÍ A DNO

Ražba opěří a dna probíhá s odstupem několika set metrů od kaloty. Projektovou dokumentací je předepsán min. odstup 10 m, ten má sloužit ke stabilizaci hornového prostředí po vyražení kaloty. Opěří i dno je raženo v celém profilu vždy v úseku mezi dvěma sousedními propojkami. Standardně se razí opěří ve směru ražby kaloty a dno v protisměru, střídavě ve východní a západní TT. Od ledna 2026 bylo zřízeno druhé pracoviště pro ražbu opěří a dna, což umožňuje razit paralelně v obou TT ob jednu propojku v souběhu s ražbou obou kalot.

V oblastech s nepříznivou geologickou situací je prováděna ražba opěří a dna zároveň. Dno je za opěřím uzavíráno vždy po vyražení dvou záběrů s odstupem dvou záběrů od čelby opěří.

Délka záběru opěří je oproti kalotě dvojnásobná. Délka záběru dna se řídí geologickými podmínkami, technologií provádění, obvykle je shodná s délkou záběru opěří, maximálně však 3,4 m.



Obrázek 10: Ražba opěří, Obrázek 11: Ražba dna.

Způsob zajištění je obdobný jako v kalotě, jen pro každý záběr je použit pouze 1 příhradový rám, tedy je zde podepřen každý druhý rám kaloty, radiální kotvy jsou zachovány. Ve dně jsou instalovány pouze sítě bez rámců. Čelbové kotvy nejsou při ražbě opěří a dna aplikovány vůbec. Do dna je v pravidelném rozestupu pokládána stavební drenáž se šachtami.

V projektové dokumentaci jsou vydefinovány úseky s nestabilním geologickým prostředím, ve kterých se provádí ražba hlubokého dna. Ve východní TT je to v TM 250 - TM 862 a TM 1162 - TM 1575. V západní TT je to v TM 250 - TM 932 a TM 1231 - TM 1467. Toto opatření se odráží i v konstrukci definitivního ostění.

Nezbytnou podmínkou pro ražbu opěří a dna v celém profilu je převedení dopravy do druhé tunelové trouby přes propojku a případně přes další zase zpět – při obsazení dvou pracovišť.



Obrázek 12: Ražba výklenku na rozhraní oblasti Zechstienu, Obrázek 13: Ražba opěří v oblasti propojky.

5.3 TUNELOVÉ PROPOJKY

Obě tunelové trouby jsou propojeny celkem 7 bezpečnostními propojkami. Prostřední propojka UF1 je průjezdná. Ostatní QR1 – QR6 jsou průchozí a budou částečně vybaveny technologiemi. Proti propojkám QR2, UF1, a QR5 je profil obou tunelových trub jednostranně rozšířen o nouzové zálivy.

Ražba propojek probíhá v souběhu s ražbou kalot, aby přes ně mohla být převáděna doprava materiálu a rubaniny z kaloty při paralelní ražbě opěří a dna.

Před zahájením ražby propojky musí být vyraženo opěří a uzavřeno dno v jejím bezprostředním okolí. Z kaloty jsou zbudovány sjízdné rampy. Ve východní tunelové troubě je vždy zaražen zárodek propojky, ze západní, s časovým odstupem, je propojka doražena. Také propojky jsou raženy s protilenbou.

6. DEFINITIVNÍ OSTĚNÍ

Koncepce definitivního ostění vychází z komplikovaného geologického prostředí. Navrženy jsou 2 hlavní typy konstrukcí. Kromě standardního ostění je pro úseky s vyššími předpokládanými přítoky podzemní vody navržen typ WUBKO = WasserUndurchlässige BetonKonstruktion. Jedná se o konstrukční řešení s vyšší odolností proti pronikání vody, a to i tlakové až do tlaku 5 bar. WUBKO je navrženo pro 500 m dlouhý úsek v oblasti zechsteinu a přilehlých úsecích. Krom toho jsou nezávisle na WUBKO navrženy různé konstrukční varianty dna pro jednotlivé třídy ražeb. Ploché dno v dobrém geologickém prostředí a v hloubených úsecích, hluboké dno ve nepříznivých geologických úsecích, v propojkových blocích a v nouzových zálivech a vyztužené ploché dno na přechodech.

V celé délce tunelu včetně hloubených úseců je ve dně i v klenbě navrženo ostění z vodonepropustného vyztuženého betonu třídy C30/37, XC3, XF2, XD2, WA, GK16 ve dně a v klenbě C30/37, XC3, XF2, XD2, WA, GK16, SB2 s polypropylenovými vlákny pro zlepšení požární odolnosti. Minimální požadované krytí výztuže je 70 mm. Ze standardu ZTV-ING vychází minimální požadovaná pevnost pro odbednění 2 MPa.

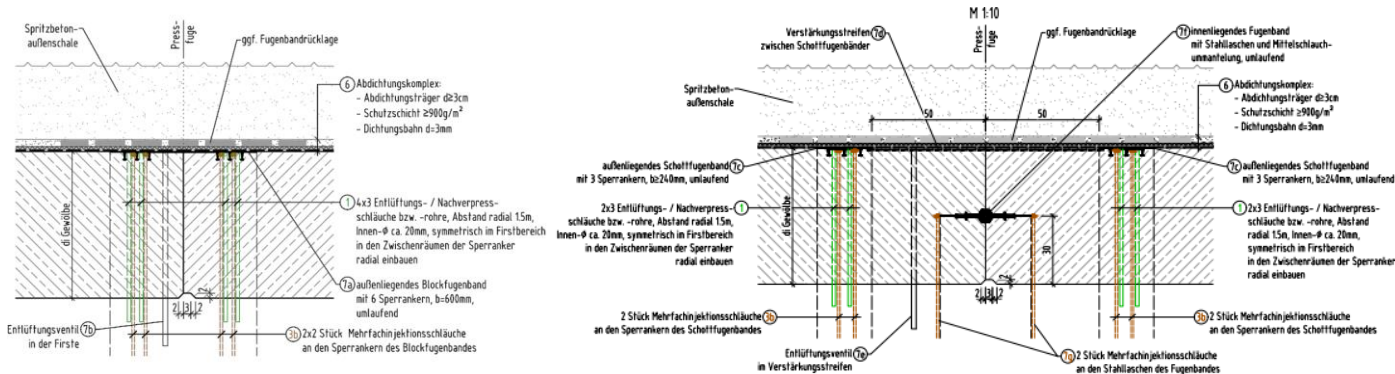
Délka standardních bloků je 12,5 m, v úseku WUBKO 10 m. Tloušťka definitivního ostění je velmi variabilní v závislosti na konstrukčním typu a razící třídě. V klenbě je to 40 cm ve standardních blocích, 60 cm v blocích s vyztuženým plochým dnem a hlubokým dnem, 80 cm v propojkových blocích a 60 cm v hloubených úsecích. Tloušťka dna je 40 cm ve standardních blocích, 60 cm v blocích s vyztuženým plochým dnem, 80 cm v blocích s hlubokým dnem, 100 cm v propojkových blocích a 60 cm v hloubených úsecích.

Pro betonáž klenby i dna se použijí betonážní sestavy dodané společností Östu Stettin. Pro spodní klenby a boční bankety byl použit bednicí vůz s tzv. kráčejícím posunem. Horní klenby budou betonovány pomocí masivního ocelového pojízdného bednění s možností rozšíření na profil nouzového zálivu. Aby, dle standardů ZTV-ING, mohlo po tři první dny probíhat ošetřování betonu každého bloku, jsou součástí každé betonážní sestavy tři klimavozy, které upravují teplotu a vlhkost vybetonovaného bloku. Tím umožňují kontrolované zrání betonu v rané fázi a omezují jeho smršťování a vznik trhlin.

Pro betonáž je použita vždy jedna sestava pro každý tunel. Počítá se s paralelní betonáží dna a klenby v obou tunelech současně v jednodenním taktu v souběhu s probíhajícími ražbami.

6.1 HYDROIZOLACE A ODVODNĚNÍ

Tunel je navržen jako vodonepropustná konstrukce s tlakovým hydroizolačním systémem. Základním hydroizolačním prvkem je KDB folie z flexibilního polyolefinu tloušťky 3 mm podložená geotextilií gramáže min. 900/1000 g/m². Tato celoplošná izolace je doplněna systémovými těsnícími pásy, tzv. fugenbandy.



Obrázek 14: Definitivní ostění – detail – systémové prvky hydroizolace, standardní blok a WUBKO.

Ve standardních blocích je na izolační fólii na každou stranu spáry navařen jeden pás šířky 240 mm. V úseku WUBKO je prostor spáry vyztužen dalším pásem KDB folie šíře 1 m. Na každou stranu od něj je na izolační fólii navařen jeden těsnící pás šířky 600 mm. Uprostřed tloušťky ostění je doplněn třetím mezilehlým pásem šířky 350 mm. Přechod mezi raženým a hloubeným úsekem je řešen obdobně jako WUBKO. Všechny navařené fugenbandy jsou opatřeny systémem perforovaných injektážních hadiček. Pro zajištění správné funkce těsnících pásů bude do každého osazeno několik odvzdušňovacích a injektážních hadiček, které budou ihned po betonáži zainjektovány cementovou směsí podle principu „mokrě do mokrého“. Ty budou ještě doplněny hadičkami pojistného systému pro následnou injektáž v případě průsaků v průběhu provozu. Mezilehlé fugenbandy mají pouze hadičky pro následnou injektáž. Spára mezi dnem a klenbou je těsněna spárovým plechem, před betonáží bude otryskána do hloubky $\frac{1}{2}$ max. zrnitosti kameniva v betonové směsi.

Protože je tunel tlakově izolován, hlavním prvkem odvodnění tunelu jsou pouze šterbinové žlaby pro odvodnění vozovky. Voda ze šterbinových žlabů bude sváděna do centrálního odvodňovacího potrubí DN 300 a dále gravitačně k níže položenému portálu do jímky znečištěných vod. Pro odvedení vody z horninového prostředí je během výstavby používána pracovní drenáž DN300 umístěná vně primárního ostění pod dnem spodní klenby za hydroizolační fólií, a bude po dokončení betonáží zainjektována.



Obrázek 15: Těsnící pásy na rozhraní ražené a hloubené části, Obrázek 16: Betonáž dna.

7. ZÁVĚR

Stavba tunelu Holstein představuje v mnoha ohledech náročný projekt – je technicky komplexní, realizovaný v obtížné geologii a je časově a organizačně velmi napjatý. Pro dodržení harmonogramu výstavby je nutné minimalizovat čas výstavby za současného dodržení velmi přísných kvalitativních požadavků. Od velmi krátké fáze přípravy staveniště přes paralelní průběh výstavby až po zvládnání změn různých horninových formací, všude se významně projevuje spolupráce všech zúčastněných stran. Pro efektivní zvládnutí těžko predikovatelných změn souvisejících zejména s geologickými podmínkami je podstatná nejen kompetentnost, ale také rychlost rozhodování. Tyto procesy a spolupráci mezi investorem, stavebním dozorem, zhotovitelem a projektantem se podařilo dobře nastavit a projektu to umožňuje postupovat dle stanoveného harmonogramu výstavby. I aktivní spolupráce s partnery ve sdružení pomáhá úspěšně zvládnout průchod ražby nejobtížnějšími úseky.

V geologicky náročném a dynamicky měnícím se prostředí ražeb se velice osvědčila trvalá přítomnost geologů zhotovitele na stavbě. Tito odborníci svým důsledným monitoringem pomáhají predikovat změny horninového prostředí a podílejí se na návrhu technických opatření v průběhu ražeb.

Klíčovým faktorem úspěšné tunelové zakázky je rychlost provedení ražeb a včasné zahájení betonáže definitivního ostění. Limity dané geologickou situací byly značné, o to důležitější je organizace pracovních činností a nastavení ideálně bezkolizního souběhu prací. Postupné provádění ražeb na 4 pracovištích v souběhu betonáží rovněž na 4 pracovištích, klade na realizační tým extrémní nároky. Je třeba nejen efektivně organizovat postup prací, ale také optimalizovat nasazení lidských zdrojů a zvládnout logistické zajištění projektu. I přes náročné geologické podmínky se daří dosahovat dobrých postupů

ražeb, v dobrých podmínkách to je v kalotě až 7 záběrů délky 1,3 m denně, tedy 9,1 m/den a na opěří a dně až 8 záběrů po 3,4 m, což činí 27,2 m/den.

Podstatnou roli pro kvalitní výsledek betonáže hraje bezesporu vytvoření dostatečného časového prostoru pro její přípravu a včasné dokončení stříkaných betonů pod izolační souvrství v požadovaných parametrech a geometrické kvalitě. Zde hraje nejvýznamnější roli opět organizační faktor.

Ukládání rubaniny přímo do budoucích náspů zkrátí časy potřebné pro její dopravu a tím pomohl zefektivnit průběh těžby, zároveň umožnil, díky dobré spolupráci s partnery na zemní práce, rychlé rozšíření zařízení staveniště s dostatkem prostoru pro montáž betonážních sestav a pro skladování materiálu.

Nesporný přínos má i využití mobilních betonáren přímo na stavbě, které minimalizuje prostoje mezi jednotlivými pracovními operacemi. Umožňuje to velkou časovou flexibilitu v průběhu ražeb i optimalizaci betonáže sekundárního ostění. Odstranění čekacích dob na dodávku betonu pozitivně ovlivňuje kvalitu ostění. V neposlední řadě „vlastní“ betonárna umožňuje podstatně lepší řízení kvality dodávané betonové směsi.

I přes napjatý harmonogram se našel prostor pro implementaci inovací. Například ve spolupráci oddělením MTA BeMo (půjčovna mechanizace BeMo) byl do ostrého provozu nasazen automatizovaný systém stříkání betonu pomocí stroje Meyco Logica, který je dále vyvíjen, aby jeho použití bylo v běžném provozu stavby funkční a účelné.

LITERATURA

FRANZ, S., HELMANN, R. *Neubau der A 44 zwischen Eschwege und Eisenach – Tunnelbauwerke*, 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau, 2012

RAUTER, G., GEIER, M., *Tunnel Holstein, AS Sontra West bis TB Riedmühle VKE C231*, Projektová dokumentace – realizační, 2025

Busch, P., Bucher, B., *Jahresbauleitertagung 2025*, Interní prezentace projektu Holstein, 2025

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Pavel Farský

Pracoviště: SUBTERRA, a.s., Divize 1, Praha

E-mail adresa: pfarsky@subterra.cz

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Zdeněk Chaloupka

Pracoviště: SUBTERRA, a.s., Divize 1, Praha

E-mail adresa: zchaloupka@subterra.cz

Titul, jméno, příjmení autora: Dipl.-Ing. Jonas Mathis

Pracoviště: BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck, Rakousko

E-mail adresa: jonas.mathis@bemo.net

Titul, jméno, příjmení autora: Dipl.-Ing. Bastian Schmitz

Pracoviště: BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck, Rakousko

E-mail adresa: bastian.schmitz@bemo.net