

# Tunel Albvorland – ražby NRTM na hranici proveditelnosti a BIM jako výzva pro projektanta

L. Krotil, T. Nevrlý

*Büchting + Streit AG, Mnichov, Spolková republika Německo*

**ABSTRAKT:** Tunel Albvorland je součástí nově vznikajícího vysokorychlostního železničního koridoru na trase Stuttgart – Ulm, který je v současnosti největším projektem v oblasti dopravní infrastruktury na území SRN. Článek v úvodu podává základní informace o projektu a následně se věnuje navrhování komplikovaných úseků stavby s důrazem na nekonvenční ražby pomocí NRTM s využitím nestandardních prvků zajištění výrubu. V závěru příspěvek poskytuje náhled do 3D-plánování pomocí metody BIM.

Komplex tunelů sestává ze dvou samostatných jednokolejných tubusů o délce 8.2 km, šestnácti propojek, přidružených odboček a přípojek na stávající železniční síť v blízkosti portálů jakož i navazujících hloubených portálových úseků, protivztlakových van a opěrných zdí.

Obě trouby jsou téměř v celé své délce raženy zeminovými štíty. V blízkosti západního portálu severní tunelové trouby je umístěna výhybka s odbočující kolejí pro nákladní vlaky. Ražby zde proto probíhají NRTM, neboť se kruhový profil tubusu v tomto úseku novostavby rozšiřuje do elipsy až na profil s plochou výrubu přes 260 m<sup>2</sup> – to vše při nadloží o minimální mocnosti méně než 10 m. Hlavní traťový tunel i odbočka dále pokračují v samostatných tunelových troubach v bezprostřední blízkosti. Při návrhu bylo proto nutné zohlednit vzájemnou interakci obou tubusů.

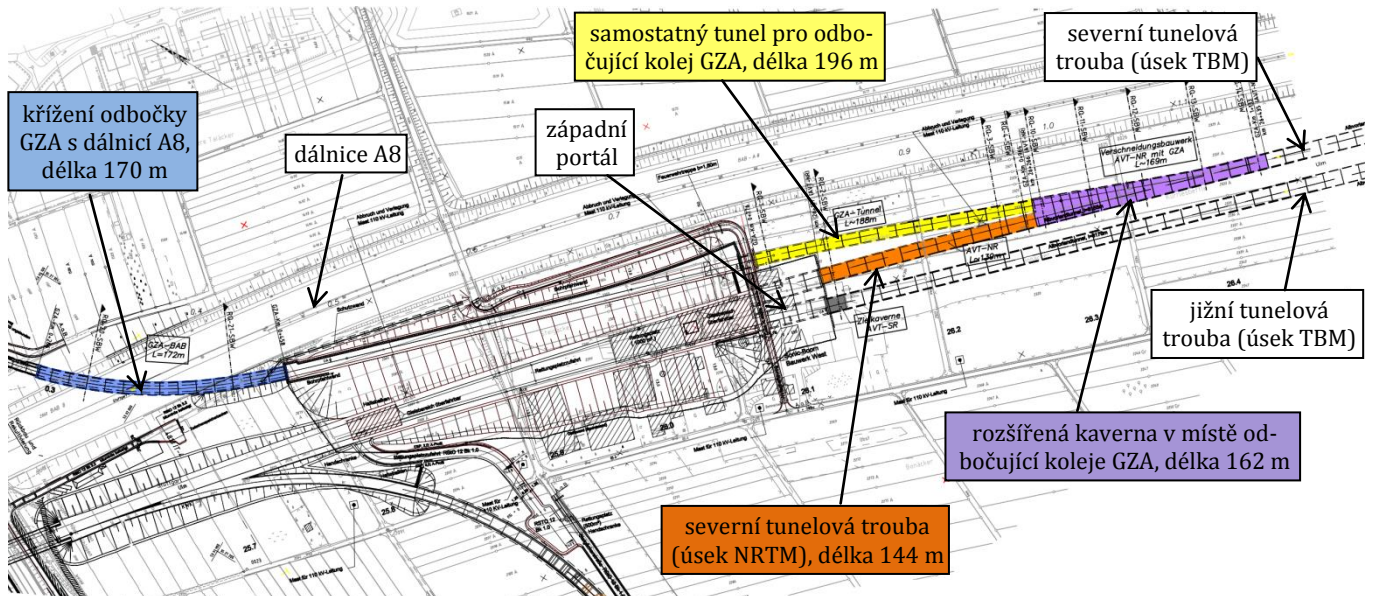
Odbočka pro nákladní vlaky následně v ostrém úhlu kříží jednu z nejvíce vytížených dálnic německé silniční sítě. Podmínkou zadavatele bylo zachování nepřetržitého dálničního provozu. Aktuální projekt proto počítá s ražbou ve hloubce pouhých 3 m pod vozovkou, což extrémně zvyšuje nároky na návrh i realizaci konstrukce.

Na přání investora, společnosti DB PSU (Deutsche Bahn Projekt Stuttgart – Ulm), byly vybrané úseky tunelu Albvorland souběžně s tradičním způsobem projektování plánovány i v prostředí BIM. Tunel Albvorland se tak stal jedním z pilotních projektů v oblasti tunelových konstrukcí, při jehož plánování byla technologie BIM testována a doplňovala tak standardní projektovou dokumentaci. Příspěvek prezentuje možnosti využití technologie BIM na poli liniových staveb a zároveň poukazuje na rezervy softwaru potřebného pro návrh podobných konstrukcí metodou BIM.

## 1. ÚVOD

Komplex tunelů Albvorland je součástí rozsáhlého liniového stavebního projektu nazvaného „Projekt Stuttgart – Ulm“. Bezmála 80 km dlouhý koridor si návrhovou rychlostí 250 km/h vyžádal nové trasování železniční trati, které vedlo k realizaci celé řady nových inženýrských staveb.

Hlavní jednokolejné tubusy tunelu Albvorland jsou takřka v celé své délce ražené pomocí tunelovacích štítů. V oblasti západního portálu navazují úseky ražené NRTM (Obrázek 1). Kolej pro nákladní vlaky odbočující z hlavní trasy (Güterzuganbindung GZA) si vyžádala vyprojektování rozšířené kaverny a v dalším průběhu návrh dvou samostatných tunelů probíhajících v těsném kontaktu. Křížení tunelové odbočky s dálnicí A8 představuje další technicky velmi náročnou konstrukci na poli konvenčních ražeb.

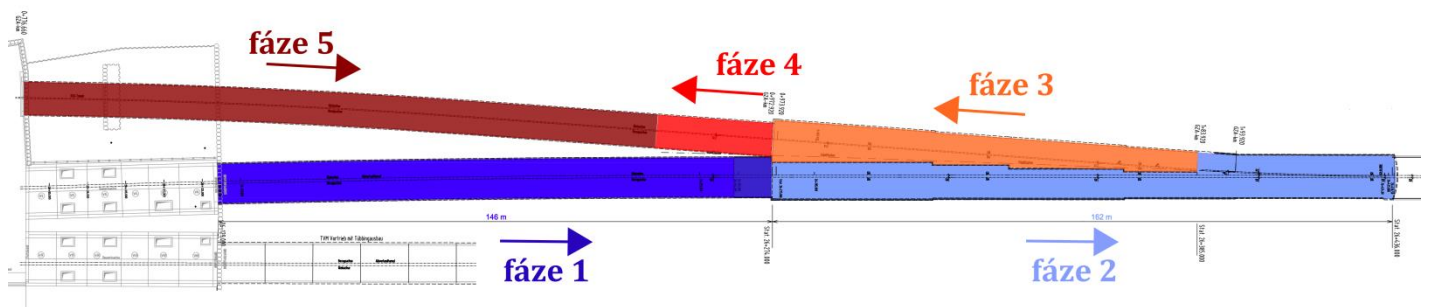


Obrázek 1: Situace v oblasti západního portálu s vyznačením některých úseků ražených NRTM

## 2. RAŽBY NRTM A NÁVRH PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ

### 2.1. FÁZE VÝSTAVBY V OBLASTI ZÁPADNÍHO PORTÁLU

Ražby tunelů NRTM v oblasti západního portálu byly zahájeny pracemi na severní tunelové troubě (Neubaustrecke-Nordröhre NBS-NR). Kruhový profil hlavního tunelu společně s boční štolou v kaverně byly vyraženy ve směru staničení (Obrázek 2: fáze 1 a 2). Rozšíření kaverny o pravý dílčí výrub (fáze 3) stejně jako ražby přípojky v bezprostřední blízkosti již zhotovené roury hlavního tunelu NBS-NR (fáze 4) probíhaly protiražbou proti směru staničení. Závěrečné zhotovení zbývajícího úseku přípojky pro nákladní vlaky je naplánováno opět ražbou ve směru staničení od západního portálu (fáze 5).

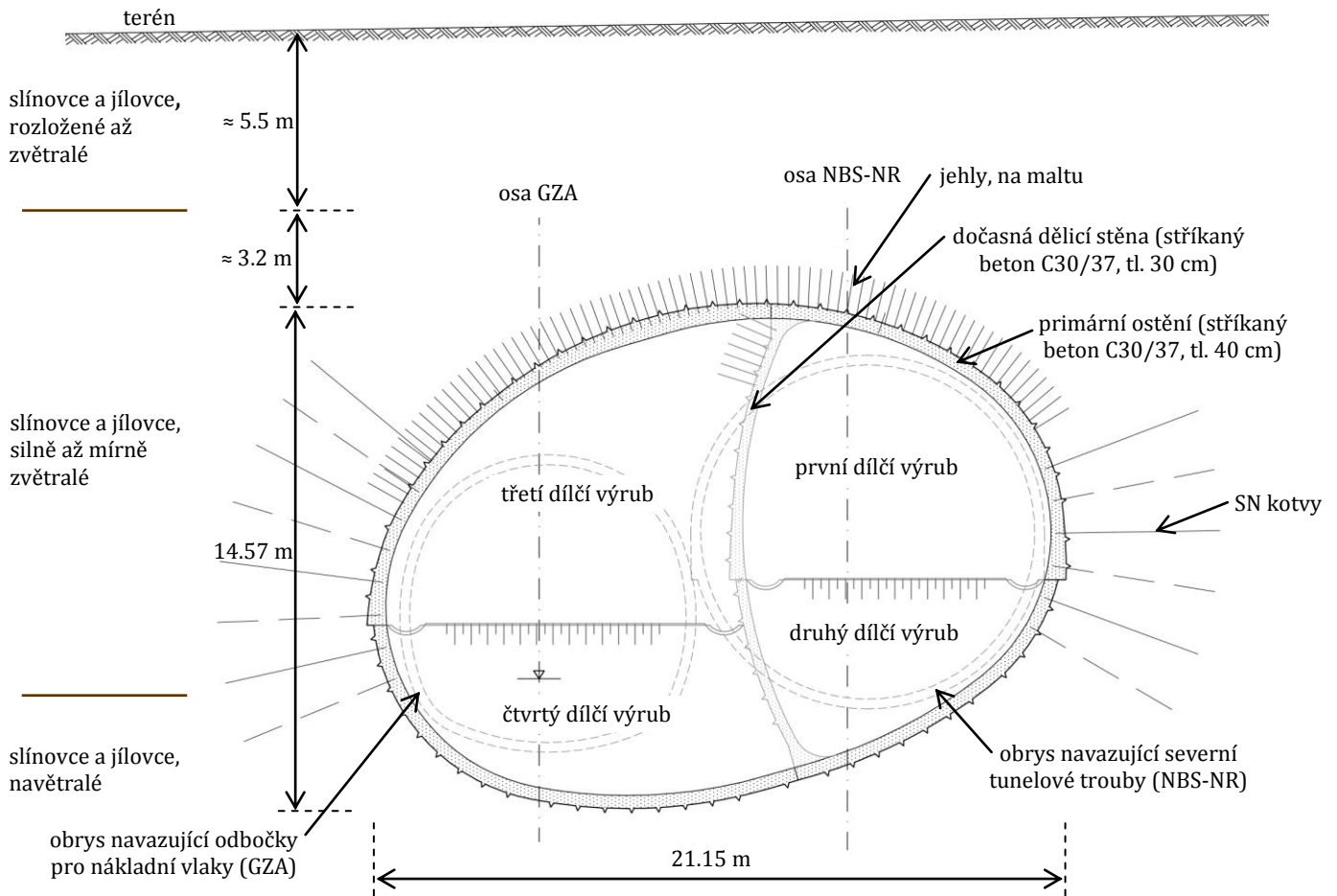


Obrázek 2: Směry ražeb NRTM v oblasti západního portálu

### 2.2. KAVERNA V MÍSTĚ ODBOČKY PRO NÁKLADNÍ VLAKY

#### 2.2.1. Popis úseku

Odbočka pro nákladní vlaky se z hlavní větve (severní tunelové trouby) odpojuje mezi staničením km 26+274 a km 26+436. Obě koleje se přitom vůči sobě rozcházejí jednak v horizontálním směru, z různých podélných sklonů nivelet pak vyplývá i narůstající výškový rozdíl mezi oběma kolejemi po délce rozšířeného úseku. V důsledku toho se původně kruhový tunel zvětšuje do tvaru šikmo ležící elipsy (Obrázek 3). Vzniklá kaverna má v nejširším místě plochu výrubu přes 260 m<sup>2</sup>, její šířka přesahuje 21 m.



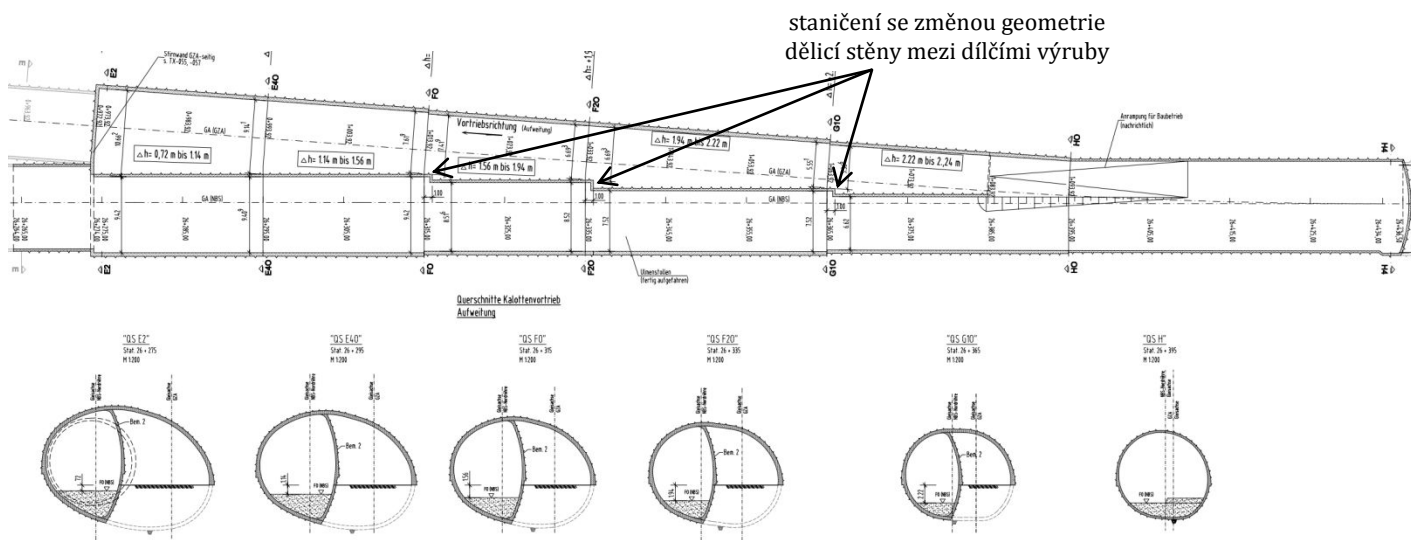
Obrázek 3: Příčný řez a členění výrubu v místě největšího profilu kaverny (pohled ve směru staničení)

### 2.2.2. Geologické poměry

Výška nadloží po délce popisovaného úseku klesá z 18 m na východním konci kaverny na pouhých cca 9 m nad vrchlíkem tunelu v místě největšího profilu. Geologie v západní příportálové oblasti tunelu Albvorland je tvořena převážně mírně zvětralými až silně zvětralými jílovci a slánovci s deskovitou až lavicovitou odlučností. Ty překrývají zcela zvětralé jílovce a slánovce. Tento geologický profil pokračuje i v kaverně s odbočující kolejí. Hranice mezi mírně zvětralými a zcela zvětralými horninami, kde již nelze počítat s vytvořením horninové klenby, se nachází přibližně 3 m nad přístropím (Obrázek 3).

### 2.2.3. Geometrie profilu

Geometrie vnějšího profilu kaverny je dána osami obou kolejí, jak bylo výše popsáno, a příslušných průřezných profilů při zohlednění prostoru pro výstavbu definitivního ostění. U všech ražeb NRTM v projektu Albvorland bylo standardně použito horizontální členění výrubu (nejprve probíhá ražba kaloty, poté je dobíráno jádro se dnem). U velkých profilů kaverny však bylo nutné ze statických důvodů navrhnout i členění vertikální. Geometrie dílčích výrubů respektive geometrie dočasné dělicí stěny přitom zohledňuje aspekty technologické i statické: Návrh geometrie provizorní stěny vycházel mimo jiné z požadavků na prostor pro pohyb stavebních strojů během ražeb (minimální šířka dílčích výrubů byla stanovena zhotovitelem na 5 m). Zohlednění statických požadavků spočívá v omezení šířky prvního dílčího výrubu a napojení provizorní dělicí stěny na vnější ostění tak, aby dílčí profil přenášel vnější zatížení ve velké míře normálovými silami (klenbové působení) a ohybové namáhání ostění bylo redukováno. Výsledkem je přiměřené množství prutové výztuže i v nejvíce namáhaných částech profilu. Takovým návrhem lze minimalizovat riziko vzniku stínů ve stříkaném betonu při zhotovování. Vezmeme-li v úvahu obě kritéria, vyplyne z nich, že geometrie dočasné dělicí stěny je konstantní pouze v úsecích dlouhých cca 20 až 40 metrů. V každém dalším navazujícím úseku dochází k posunutí dočasné opěry tak, aby bylo vyhověno oběma okrajovým podmínkám (Obrázek 4).



Obrázek 4: Půdorys a příčné řezy kavernou s vyznačením polohy dočasné stěny vertikálního členění výrubu

#### 2.2.4. Zajištění výrubu

Výrub v kaverně byl zajišťován stříkaným betonem C30/37 vyztuženým příhradovými rámy, KARI-sítěmi a lokálně příložkami z prutové výztuže. Tloušťka vnějšího ostění se pohybuje mezi 25 cm a 40 cm v místě největších profilů. Pro dočasnou stěnu vertikálního členění výrubu byla zvolena mocnost 30 cm. Pro ražby byly navrženy tři různé technologické třídy vystrojení výrubu lišící se v množství radiálních kotev a v zajištění přístropí pomocí jehel. Délka záběru činila ve všech třídách 1.0 m.

#### 2.2.5. Postup výstavby

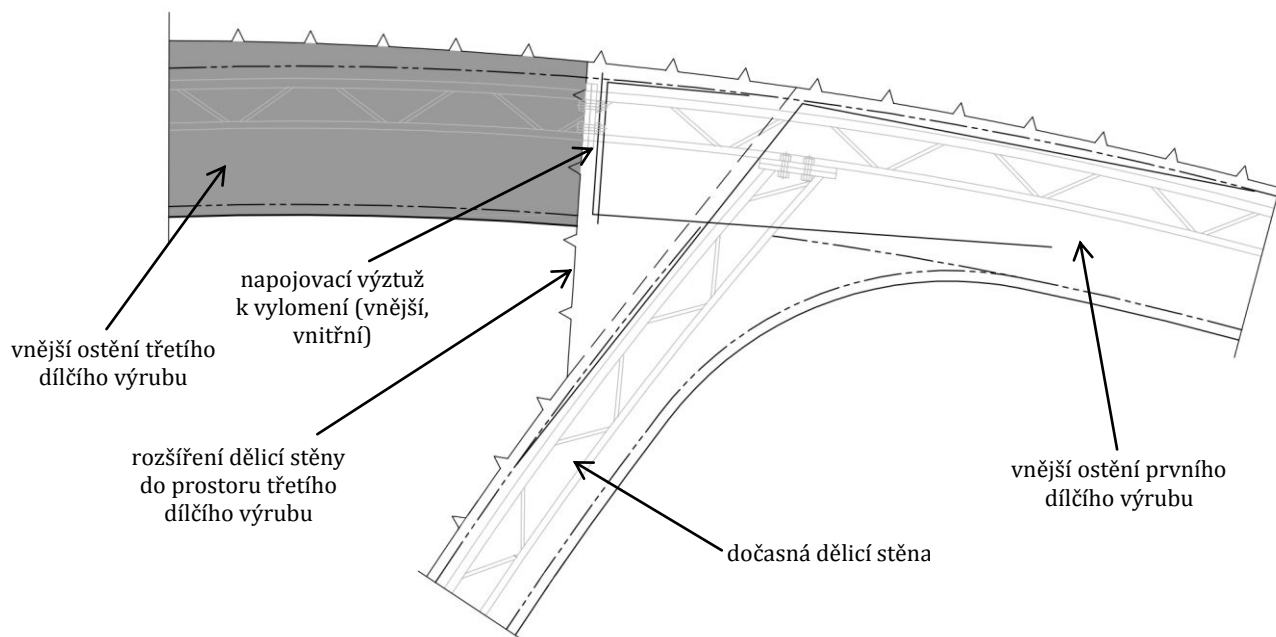
Na přání zhotovitele bylo rozšíření profilu naplánováno protiražbou proti směru staničení (viz výše). Vzhledem k takto zvolenému postupu probíhaly práce na ražbě kaloty (rozšíření) a následná dobírka dna ve čtvrtém dílčím výrubu v době, kdy již zhotovená boční štola sloužila pro veškerou dopravu stavebních strojů spojenou s odvozem rubaniny a zásobováním čelby materiálem pro vystrojení výrubu. Ze statických důvodů bylo tudíž nutné střední dělicí stěnu zachovat až do uzavření celého profilu (Obrázek 5), neboť do tohoto okamžiku přebírala zatížení od provozu v boční štole. Zeminový tlak byl však již od fáze ražeb kaloty ve třetím dílčím výrubu přenášen z velké míry klenbovým působením vnější opěry. Dělicí stěna byla s odstupem několika desítek metrů od čelby postupně vybourávána.



Obrázek 5: Pohled do kaverny během ražeb třetího dílčího výrubu se zachováním dělicí stěny

### 2.2.6. Návrh detailu napojení dočasné dělicí stěny

Napojení ostění bočního dílčího výrubu v místě střední dělicí stěny představuje pro raziče vzhledem ke stísněným podmínkám často komplikovaný a zdlouhavý pracovní krok. V místě styku obou dílčích výrubů musí být obnažena a vyhnuta napojovací výztuž pro přesah s navazujícími KARI-sítěmi v navazujícím dílčím výrubu. V kaverně pro odbočující kolej bylo navrženo geometrické zjednodušení tohoto problému, kdy došlo k rozšíření dělicí stěny směrem do třetího resp. čtvrtého dílčího výrubu (Obrázek 6). Kontaktní plocha se spojovací výztuží je tak vyvedena dále od rohu s ostrým úhlem, což usnadňuje práci při vylomení prutů výztuže a umožňuje tudíž rychlejší postup prací. Návrh přináší výhody i ze statického hlediska: Zvětšením ložné plochy na kontaktu primárního ostění boční štoly s horninovým masivem je docíleno pevnějšího uložení stříkaného ostění pro jistější roznášení normálových sil a aktivaci klenbového působení.



Obrázek 6: Detail rozšíření dělicí stěny v místě napojení ostění třetího dílčího výrubu

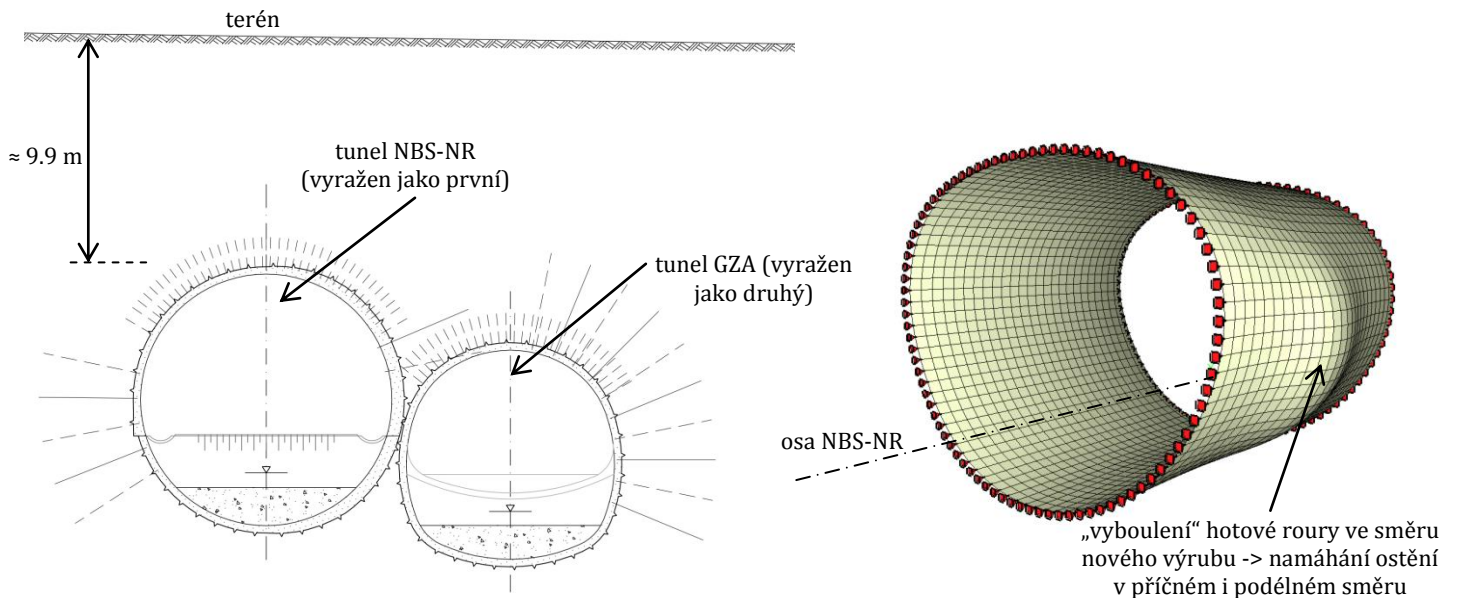
### 2.3. POKRAČOVÁNÍ KOLEJÍ V SAMOSTATNÝCH TUNELECH

Volba umístění přechodu ze společného velkého profilu kaverny na dva jednokolejné tubusy vycházela z cíle minimalizace celkové plochy výrubu. Zároveň měla být omezena nutnost podpůrných či zesilovacích opatření (např. výstavba betonového středového pilíře). Výsledkem je taková vzájemná poloha obou tunelů, že se jejich primární ostění v nejužším místě dotýkají (Obrázek 7, vlevo). Geologie a výška nadloží přibližně odpovídá poměrům na západním konci kaverny (viz Obrázek 3).

Blízkost obou tubusů má za následek jejich vzájemnou interakci, která musela být zohledněna ve statických výpočtech. Ražbou v bezprostřední blízkosti ztrácí existující tunelová konstrukce boční oporu horninovým masivem. Oproti standardním postupům bylo proto v tomto případě pro primární ostění dříve zhotovené severní tunelové trouby NBS-NR uvažováno i její působení v podélném směru (Obrázek 7, vpravo). V místech absence středového horninového pilíře se v omezené míře počítá s vytvořením klenby překlenující oba tunely.

Primární ostění dříve zhotoveného tunelu NBS-NR bylo vyztuženo uzavřenými příhradovými rámy v celém profilu, jež ostění poskytuje dodatečnou tuhost. K omezení deformací primárních ostění byla v později ražené odbočce GZA dále navržena některá konstruktivní opatření:

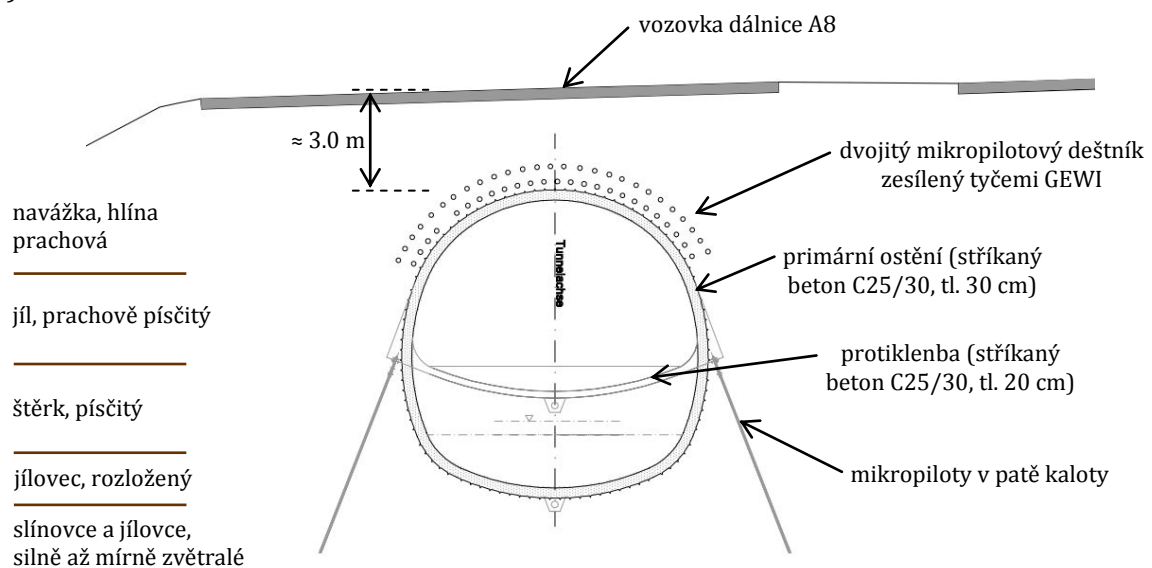
- zkrácení délky záběru na 80 cm;
- ražba kaloty s okamžitým uzavíráním spodní klenby;
- omezení vzdálenosti mezi rozbitím protiklenby kaloty a protiklenbou plného profilu na 2.50 m (opětovné vytvoření uzavřeného prstence ve velmi malém odstupu);
- vyšší třída stříkaného betonu C30/37 oproti ostatním (standardním) úsekům tunelu GZA.



Obrázek 7: Vlevo: Příčný řez samostatnými tunely v nejužším místě, vpravo: 3D model hlavní tunelové trouby NBS-NR

## 2.4. KŘÍŽENÍ ODBOČUJÍCÍ KOLEJE POD DÁLNICÍ A8

Odbočující kolej pro nákladní vlaky v dalším průběhu kříží velmi vytíženou dálnici A8 na trase Stuttgart – Ulm. Trasa probíhá ve 170 m dlouhém tunelu raženém NRTM za plného silničního provozu na povrchu. Tunel má takřka kruhový profil, teoretická plocha výrubu činí cca 68 m<sup>2</sup>. Výška nadloží, tvořeného prakticky výhradně navázkou, se pohybuje mezi 3 m a 5 m. Horninové prostředí (silně až mírně zvětralé jílovce a slínovce) je bezmála v celé délce tunelu předpokládáno až pod počvou profilu (Obrázek 8).



Obrázek 8: Příčný řez tunelem v místě křížení s dálnicí A8 (Güterzuganbindung-Bundesautobahn GZA-BAB A8)

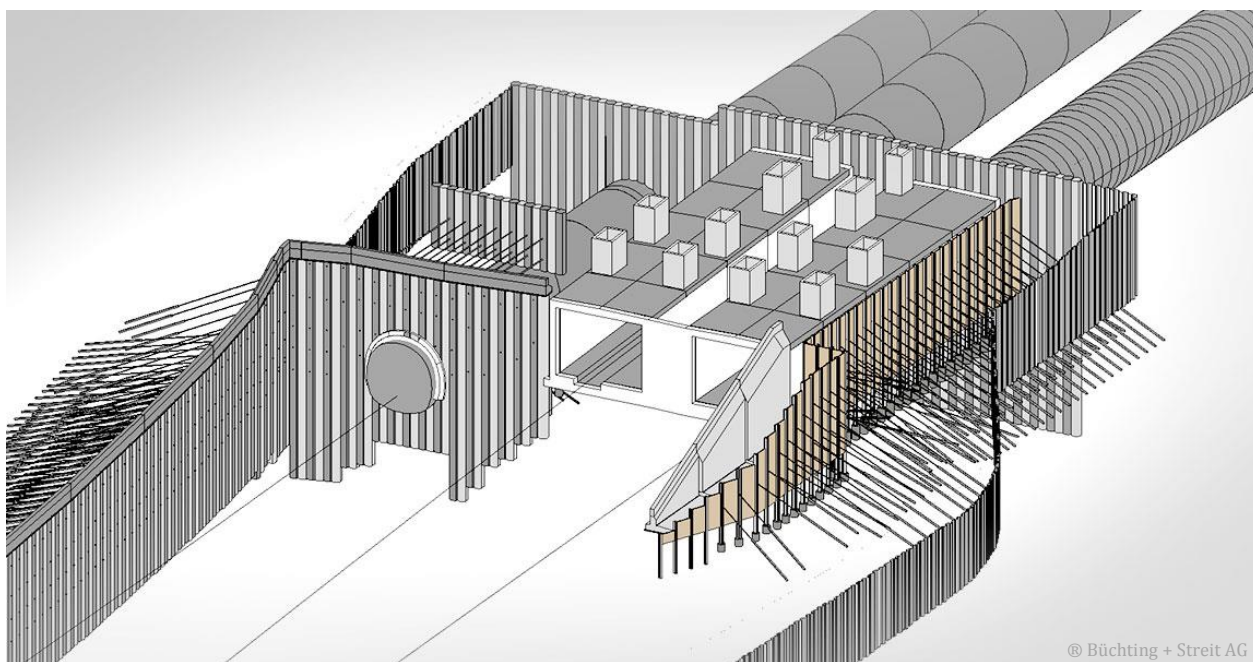
Aktuální projekt počítá s realizací tunelu ražbou kaloty s protiklenbou. Následně proběhne dobírka opěří a dna. Tloušťka primárního ostění činí 30 cm. Výrub bude dále zajišťován TH-rámy a svařovanými KARI-sítěmi. Délka záběru byla zvolena na 1.0 m. Za účelem minimalizace sedání vozovky je ražba NRTM prováděna pod ochranou dvojitého mikropilotového deštníku vyztuženého tyčemi GEWI Ø63.5 mm. Paty kaloty jsou ve stísněných podmínkách zesilovány mikropilotami (pod levou a pravou patou kaloty jedna mikropilota v každém záběru).

S ohledem na rizika spojená s ražbou pod dálnicí v provozu je během stavebních prací plánován podrobný a nákladný geotechnický monitoring, zejména kontinuální snímání sedání vozovky s okamžitým nahlášením dosažení či překročení mezních hodnot stanovených prognózou.

### 3. ÚSEKY STAVBY PROJEKTOVANÉ V PROSTŘEDÍ BIM

#### 3.1. ZÁPADNÍ PORTÁL A PŘILEHLÉ TUNELY

Na přání zadavatele byla oblast západního tunelového portálu společně s přilehlými odbočujícími tratěmi projektována v prostředí BIM. Výřez ze 3D modelu ukazuje Obrázek 9.



Obrázek 9: Výřez z 3D modelu oblasti západního portálu

Investor DB PSU stanovil pro použití technologie BIM v projektu Albvorland následující cíle [1]:

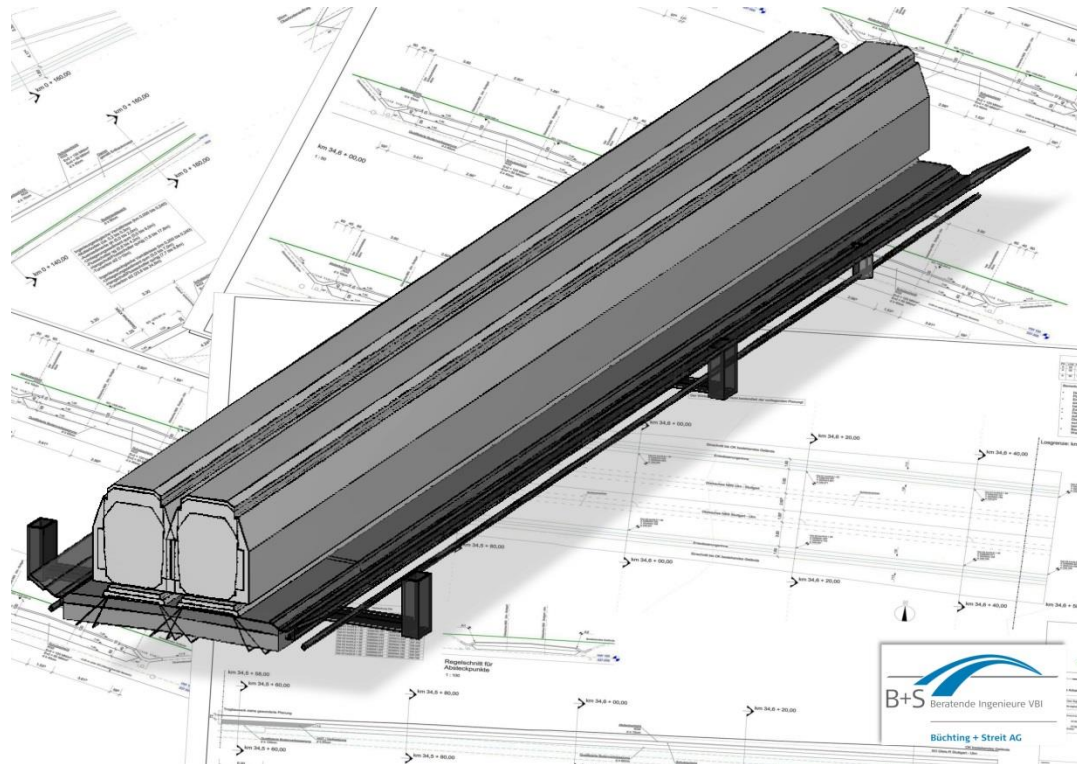
- 3D: doplnění standardní dokumentace pro zhotovení stavby a koordinace procesu projektování, kontrola kolizí;
- 4D: propojení trojrozměrného modelu s harmonogramem za účelem časové simulace procesu výstavby;
- 5D: propojení modelu s položkovým rozpočtem za účelem lepšího řízení nákladů a kontroly postupu výstavby;
- reporting: vyhodnocování pokroku stavebních prací, zhotovování průběžných zpráv.

V rámci služeb generálního projektanta naše společnost dodala investorovi respektive zhotoviteli stavby 3D model, jenž sloužil pro další použití dle výše uvedeného výčtu. Pro tyto účely obsahovaly jednotlivé stavební prvky a dílčí konstrukce potřebné atributy a byly přiřazeny jednotlivým parametrickým rodinám („families“). Nutno podotknout, že cíl podpory zhotovení realizační dokumentace mohl být naplněn jen v omezené míře, neboť detailnost modelu oblasti západního portálu dosahovala úrovně zadávací dokumentace (Level of Detail LOD 300).

Ke zhotovení trojrozměrného modelu byl na přání zhotovitele nasazen (hojně používaný) program Autodesk REVIT. Jelikož však byl tento softwarový balíček vyvinut pro potřeby pozemního stavitelství, obsahuje jeho knihovna zejména objekty pozemních staveb (např. stěny, stropy, dveře atp.). Pro projektování liniových staveb typu tunelu je dále nutné stavební objekty umisťovat do modelu definováním polohy na ose koleje příslušným staničením. Osa koleje je přitom ve většině případů prostorová křivka, jejíž definování program Autodesk REVIT neumožňuje. Zhotovení 3D modelu tunelových rour tunelu Albvorland si proto vyžádalo použití doplňkového softwaru (zde Dynamo), jež vizuálním programováním umožňuje modelování libovolných a komplexních geometrií i objektů.

### 3.2. ŽELEZNIČNÍ SPODEK NA ŠIRÉ TRATI

Plného využití 3D-plánování bylo dosaženo při projektování železničního spodku na širé trati před východním i západním portálem. Nad rámec potřeb investora byl za účelem zjednodušení a zautomatizování tvorby výkresů pomocí programu Dynamo vytvořen trojrozměrný model železničního spodku včetně všech detailů ve stupni realizační dokumentace. Pomocí vstupního 3D modelu následně proběhlo automatické generování 2D plánů pro realizaci (půdorys, podélný řez, příčné řezy) s pružnou definicí řezů a bez nutnosti významných úprav vzniklých výkresů. Vyhotovený trojrozměrný model je přitom konformní se standardy BIM (seskupení objektů do rodin, přiřazení parametrů) pro případné další použití ve fázi výstavby (4D / 5D) a provozu.



Obrázek 10: 3D model širé trati před východním portálem na pozadí vygenerovaných 2D výkresů železničního spodku

Elementárním předpokladem pro brzké dosažení cílů v oblasti plánování dopravní infrastruktury, jež účastníkům výstavby společnost klade (nasazení BIM), je otevřenost vůči novým postupům a metodám. Uvedený příklad aplikace technologie BIM na poli liniových staveb představuje inovativní přístup k úlohám projektování a tudíž krok správným směrem.

## 4. ZÁVĚR

Součástí 8.2 km dlouhého dvoutubusového tunelu Albvorland na nově vznikajícím železničním koridoru Stuttgart – Ulm je několik náročných úseků ražených NRTM. Optimalizací návrhu některých prvků primárního ostění mohly být uspokojeny požadavky technologické i statické. Tunelová odbočka pro nákladní vlaky byla navržena v extrémní blízkosti severní tunelové trouby s cílem minimalizovat celkovou plochu výrubu.

Nasazení 3D-projektování umožnilo mimo jiné automatizované generování 2D plánů železničního spodku na širé trati v předportálové oblasti a usnadnilo tak vyhotovování realizační dokumentace pro tento úsek stavby. Na cestě k rozsáhlejšímu a jednoduššímu použití principů BIM ve fázi projektování tunelových konstrukcí je však ještě nutné překonat řadu překážek, mimo jiné rozšířit možnosti používaného softwaru.



## LITERATURA

[1] HALLFELDT, J.; BEAMENT, M. *BIM-Anwendungsfälle und ihre Umsetzung beim Albvorlandtunnel*. Tunnel 5/2018, 72–84.

***Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Lukáš Krotil, M.Sc.***

***Pracoviště: Büchting + Streit AG, Mníchov, Spolková republika Německo***

***E-mail adresa: lukas.krotil@buechting-streit.de***

***Titul, jméno, příjmení autora: Dipl.-Ing. Tobias Nevrlý***

***Pracoviště: Büchting + Streit AG, Mníchov, Spolková republika Německo***

***E-mail adresa: tobias.nevrly@buechting-streit.de***