

PODROBNÝ GEOTECHNICKÝ PRŮZKUM PRO RAŽENÝ ŽELEZNIČNÍ TUNEL NA TRATI KRALUPY - VRAŇANY, PROGNOZA A SKUTEČNOST

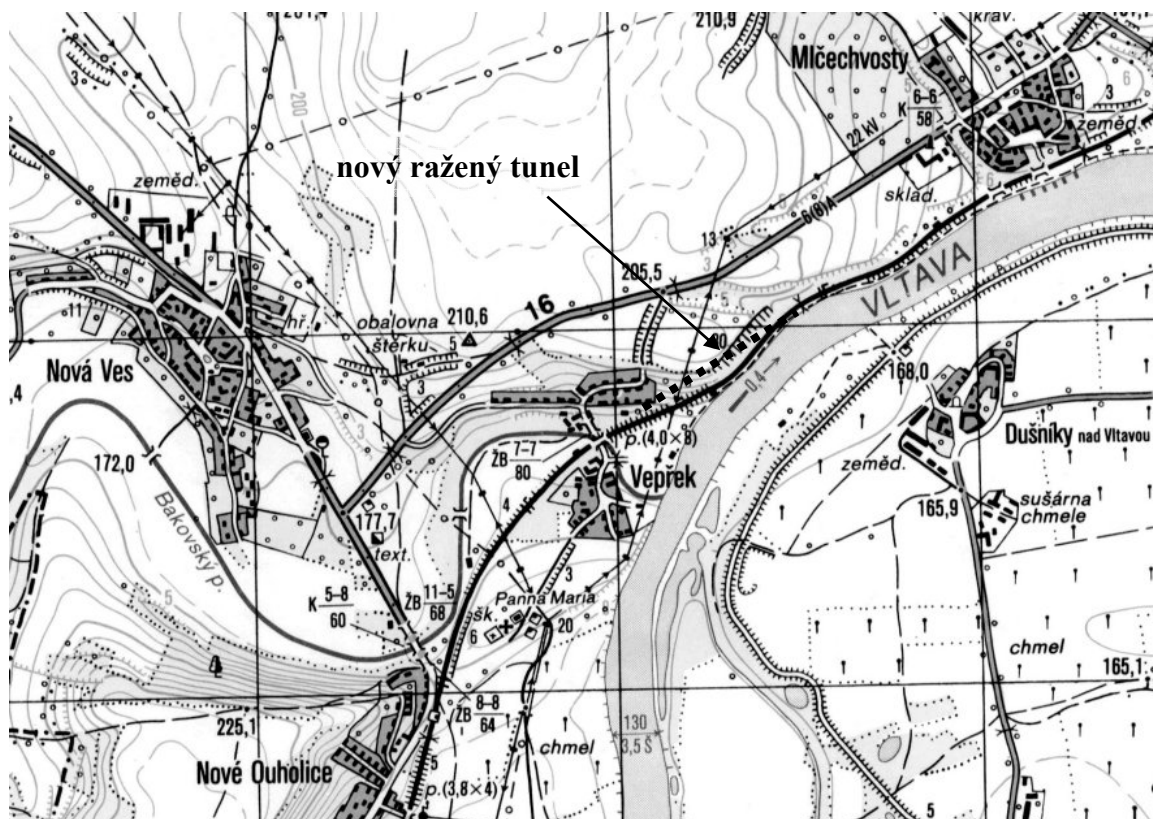
Ing. Jiří Činka, ILF Consulting Engineers s.r.o., Praha

ABSTRAKT: Způsob provádění a výsledky podrobného průzkumu pro projekt železničního tunelu metodou NRTM v prostředí sedimentárních hornin české křídové pánve. Problematika vlivu strukturní stavby na stabilitu otevřeného výlomu. Porovnání prognózy z průzkumu se skutečností (tunel je již ve výstavbě).

1. Úvod

Součástí modernizace železniční trati Kralupy nad Vltavou - Vraňany je vybudování nového dvoukolejného tunelu v km 446,030–446,420, čímž dojde v daném místě k směrovému napřímení trati. Projekt stavby tunelu o délce 390 m včetně podrobného geotechnického průzkumu zpracovala fa. ILF CE. S ohledem na dobrou základní geologickou znalost lokality se tento stupeň průzkumu zaměřil na detailní geotechnický výzkum prostředí budoucí stavby. Už během realizace průzkumných prací bylo na základě předběžných geologických znalostí a ekonomického porovnání variant upuštěno od původně navrhované hloubené varianty (předchozí stupeň projektové dokumentace) a jednoznačně upřednostněna varianta ražená.

Tunelový úsek trati se nachází poblíž zmíněné trati mezi obcemi Vepřek a Mlčechvosty nad levým břehem Vltavy - viz. následující obr. 1 - „Situace širšího okolí 1 : 25 000“.



2. Geologické poměry

Celkový reliéf lokality je hodnocen jako plochá pahorkatina středních vodních toků České vysočiny. Zájmový úsek je veden prakticky JV okrajem plošiny, která je omezena svahem, původně nárazovým břehem řeky Vltavy. Tento bývalý břeh, dnes odřez stávající železniční tratě, v němž je vyrovnání trati řešeno tunelem je na severu omezen výraznou příčné terénní (tektonické) deprese probíhající ve směru SZ-JV. Nadmořská výška terénu v prostoru plošiny činí cca 200-204 m.n.m. Skalní podloží je v zájmové oblasti budováno sedimentárními horninami svrchně křídového stáří. Jedná se zde výhradně o **slínovce** s proměnlivým obsahem vápnité a jílovité složky. V nezvětralém stavu se jedná o horniny s deskovitou odlučností, subhorizontálně uložené, místy tektonicky porušené, příp. podrcené. Skalní podklad je v přípovrchových částech postižen intenzivním zvětráním, takže jeho svrchní partie mají charakter hlinitého elúvia (pevné zeminy). Mocnost zcela rozložené či zcela zvětralé zóny kolísá v rozmezí cca 4 - 13 m. Povrch terénu je v prostoru plošiny překryt souvislou vrstvou sprašových hlín wümského stáří. Na některých místech pod nimi zůstaly zachovány reliktů vltavské šterkové terasy.

Hydrogeologická situace je na lokalitě příznivá. Mělké zvodnění kvartérních sedimentů, tj. terasových šterků nebylo prokázáno. Infiltrace srážkových vod do horninového prostředí je značně omezena nadložním hlinitým pokryvem a elúviem slínovců. Dílo bude raženo pouze v křídových slínovcích. Podzemní vody v tomto špatně propustném až relativně nepropustném horninovém komplexu vytvářejí lokální obzor, vázaný na systém puklin a diskontinuit. Z hydrogeologických měření realizovaných v obou etapách průzkumu vyplynulo, že hladina tohoto puklinového obzoru je pod niveletou počvy.

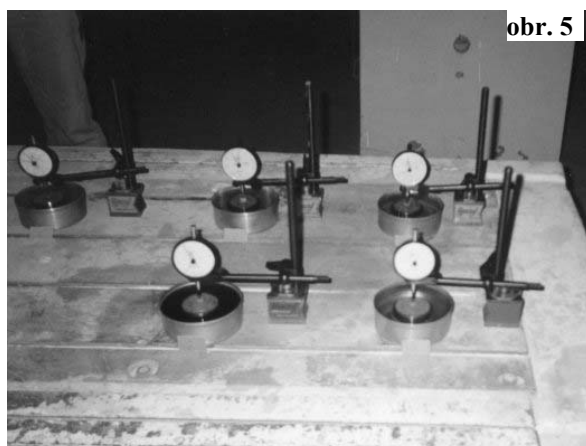
2. Metodika a rozsah prací

Sondovací práce: V ose budoucího tunelu, nebo v její těsné blízkosti byly nově realizovány celkem 3 vrty do hloubky 32,0–35,5 m - vždy 5 m pod úroveň projektovaného díla.

Měření ve vrtech: Vrty byly prohlédnuty televizní sondou s osazeným kompasem - **obr. 2** pro vytipování vhodných míst na presiometrická měření a především pro účely strukturních měření ve stěnách vrtu. Pro zjištění přetvárných charakteristik masivu, které v sobě zahrnují i jeho strukturní porušení byla ve dvou vrtech realizována měření presiometrem - **obr. 3** s cílem zachytit kvalitativně odlišné horizonty.



Laboratorní zkoušky: Z provedených vrtů bylo odebráno přes 100 souborů vzorků pro komplexní program laboratorních zkoušek mechaniky hornin s cílem stanovit z dostatečného množství hodnot konečné charakteristiky. V rámci základních popisných (indexových) vlastností bylo zkoumáno i vzájemné působení pevné a kapalné fáze - nasákavost, propustnost, bobtnavost (**obr. 5**), rozpadavost ve vodě, rozbředavost. Pevnostní zkoušky se zaměřili na σ_c - pevnost v prostém tlaku (MPa), σ_t - pevnost v prostém tahu, deformační zkoušky (**obr. 6**) na zjištění E_{def} - modulu přetvárnosti (MPa), E - modulu pružnosti (MPa), ν - Poissonova čísla. Vzorky byly rovněž podrobeny zkouškám ve víceosém zatěžovacím systému - **obr. 4** (tzv. triaxiální pevnosti) pro zjištění ϕ - úhlu vnitřního tření ($^\circ$) a τ_0 - počáteční pevnosti (MPa).

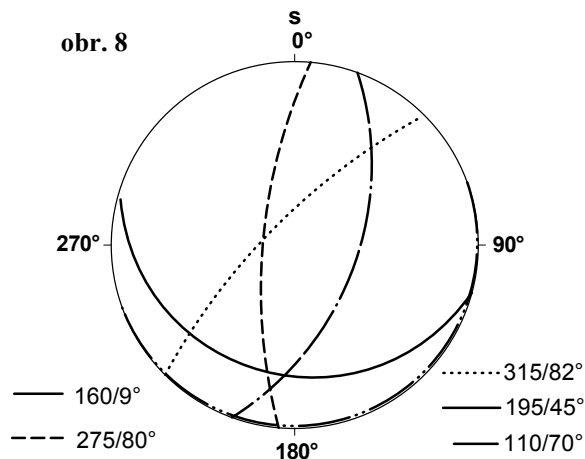
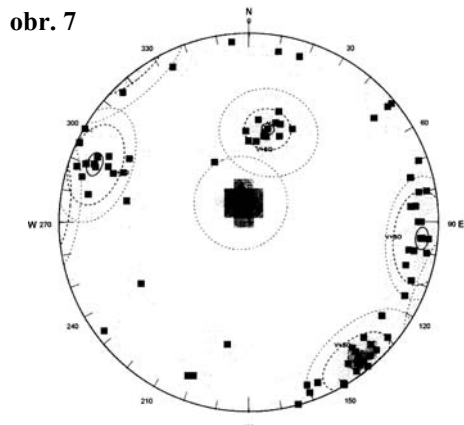


Geofyzikální měření: Pro kvalitativní hloubkové rozlišení horninového masivu a vymezení případných nehomogenit bylo na lokalitě realizováno několik geofyzikálních metod. Použita byla metoda mělké refrakční seismiky (MRS), která byla zaměřena na hloubkové omezení rychlostně odlišných zón horninového masivu a na určení mocnosti pokryvných útvarů. Z izolinií rychlostí podélných vln v_p ($m \cdot s^{-1}$) bylo interpretováno především porušení masivu vlivem jeho rozpukání. Jako velmi účelné a vypovídající se ukázalo použití tzv. seismického prozařování (seismická tomografie ST). Za tímto účelem byl jeden z nových vrtů umístěn poblíž funkčního vrtu z předcházející etapy průzkumu. Ve starším vrtu bylo provedeno celkem 11 výbuchů, které byly přijímány 11 body příjmu v novém vrtu a na povrchu. Vzhledem k detailní znalosti prozařovaného místa (podrobné popisy vrtů, výsledky presiometrických zkoušek, výsledky laboratorních zkoušek z vrtného jádra) bylo možné stanovit rozsahy rychlostí v_p ($m \cdot s^{-1}$) pro jednotlivé kvalitativní typy a to pak uplatnit při interpretaci výsledků seismických měření z jiných míst (MRS). Seismické metody byly doplněny geoelektrickým měřením (VES).

3. Strukturně tektonická analýza masivu

Kromě fyzikálně mechanických vlastností ovlivňuje významně návrh zajištění výrubu (třídy vystrojení) a technologii ražby orientace a četnost ploch odlučnosti (diskontinuit), kterými je horninový masiv prostoupen. Proto byly na lokalitě provedeny veškeré dostupné způsoby strukturních měření a to jak na odkrytých výchozech, tak ve vrtech za použití televizní sondy vybavené kompasem. Získané hodnoty byly zpracovány a interpretovány v několika krocích pomocí početně grafického programového souboru Geo-system (SRN) - programy Wingeovek, Wingsap:

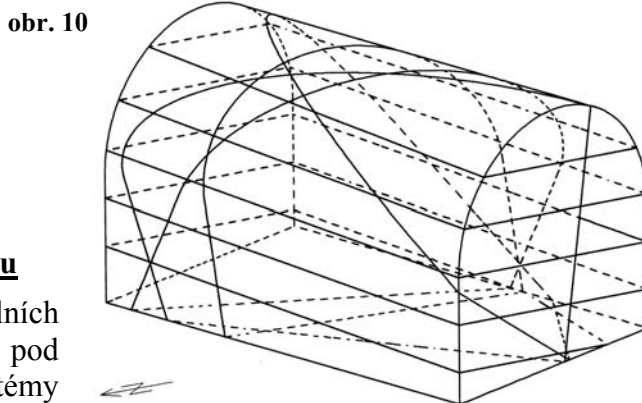
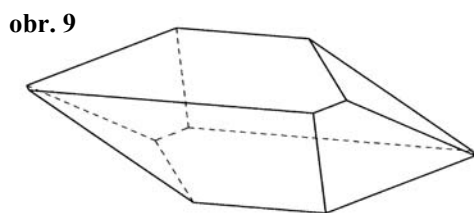
Obr. 7. První krok - pólový diagram zpracovaný metodou stereografické plochojevné projekce na diagram plošných četností



Obr. 8. - zjištěné hlavní směry ploch odlučnosti byly ve stereografické projekci zobrazeny v podobě tzv. „velkých oblouků“.

Obr. 9. - na základě zjištění orientace hlavních systémů ploch nespojitosti a jejich intervalu opakování program sestrojil nejčastější tvar fragmentu (bloku) horniny. Jedná se o protáhlý deskovitý (lavicovitý) útvar omezený vrstevními plochami a strmými puklinami.

Obr. 10. - pro představu, jak se tyto hlavní směry budou promítat do prostoru budoucího výlomu, bylo v programu provedeno orientované prostorové zobrazení jejich průsečnic s pláštěm budoucího důlního díla.



Goodmanova metoda kritického bloku

Protože je stabilita výlomu ve skalních horninách v menších hloubkách pod povrchem podmíněna výhradně systémy těchto přirozených odlučných ploch, které jsou místy výrazného oslabení pevnosti skalního masivu, pokusili jsme se analyzovat modelově prostředí v okolí otevřeného výlomu s cílem vytipovat kritická místa. Použili jsme blokovou metodu prof. Goodmana. Metoda vychází z faktu, že již zmíněné odlučné plochy vymezují ve skalním masivu pevné bloky, které se mohou po odkrytí výrubem dostat do pohybu do volného prostoru účinkem vlastní tíhy, případně dalších sil.

O stabilitě těchto skalních bloků rozhodují v podstatě 2 hlavní faktory:

- orientace ploch odlučnosti vůči orientaci otevřeného výlomu
- smyková pevnost podél diskontinuit.

Metodika analýzy

S využitím principů zmíněné metody byly stanoveny rozměry kritického bloku. Početní analýza vychází z faktu, že geometrie těles v prostoru je určena vzdáleností oddělujících ploch a orientací takto vzniklého tělesa k těmto mezním plochám. Interval opakování (vzdálenost) ploch nespojitosti je v metodě početně převeden na vzdálenost normal těchto

mezních ploch od počátku kartézského souřadného systému. Základem výpočtu tělesa jsou následující parametry:

- ▶ orientace ploch v prostoru
- ▶ poloha tělesa vzhledem k těmto plochám
- ▶ vzdálenost ploch od počátku zvoleného souřadného systému

Součástí geometrie a orientace tělesa je jeho poloha k hraničním plochám, tím se myslí, zda těleso leží nad plochou, jež těleso ohraničuje, nebo pod touto plochou (horní a spodní poloprostor). Tato orientace je přesně definována pomocí kódů v poloprostoru (Goodman, 1985).

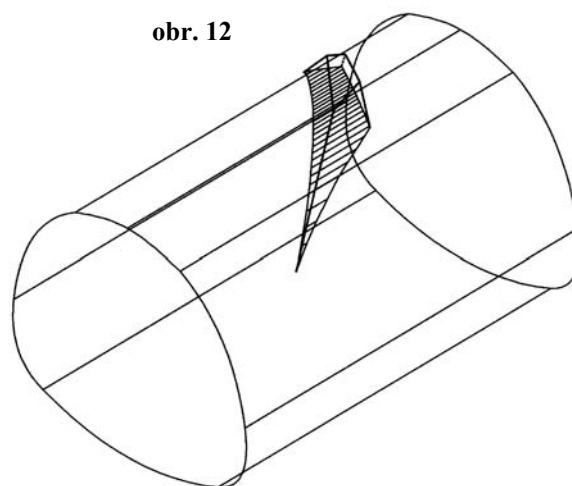
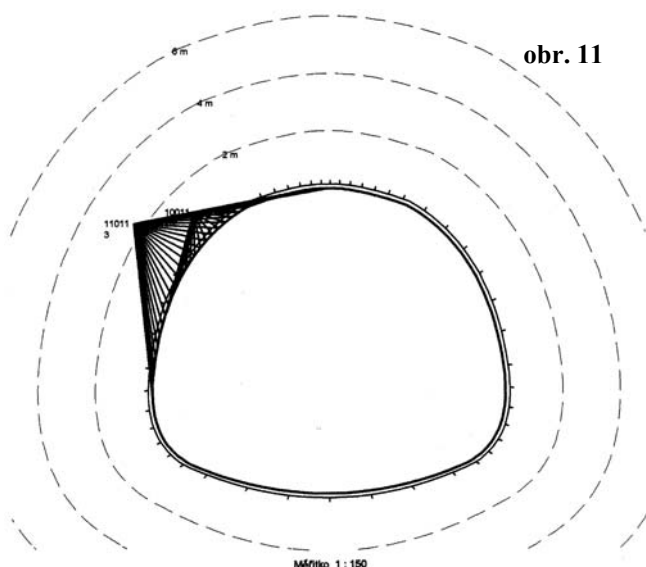
Aby bylo možné vzniklé bloky definovat staticky, je normálám ploch podle jejich polohy v souř. systému přisouzena velikost směrového vektoru. Díky orientaci ploch, vzdálenosti jejich normál a velikosti směrových vektorů je přesně stanoveno každé těleso a je možné ho tím pádem spočítat.

Po zadání fyzikálních parametrů (hmotnostní a smykové parametry) vybral početní program z kombinací průsečíků ploch odlučnosti ty, které vymezují ve skalním masivu takové **kritické bloky**, které se mohou po odkrytí výlomem dostat do pohybu účinkem vlastní tíhy.

Jak je z grafického zobrazení analýzy vidět - **obr.11**, hlavní odlučnou plochou jsou v masivu vrstevní plochy skloněné cca 9° k JV, z kterých budou systémy (275/80°) a (110/70°) oddělovat největší kritické bloky v rozích klenby budoucího výrubu. Zarovnání bude vždy k následující vrstevní ploše.

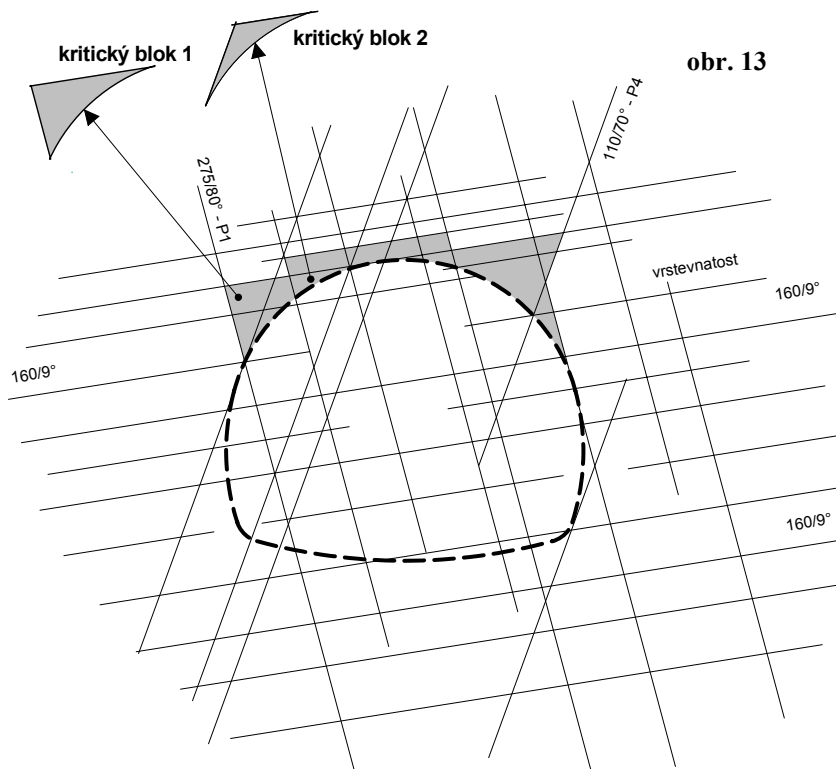
Promítnutím početně zjištěného kritického bloku do navrhovaného tunelu vzniká v jeho plášti plocha, která je pro kombinaci ploch odlučnosti:

(160/9°) a (110/70°)	1,9 m²
(160/9°) a (275/80°)	7,5 m²



Na **obr. 12** je ve 3D zobrazení znázorněn kritický blok v nadstropí budoucího tunelu.

Celkové schematické znázornění předpokládané situace v prostoru budoucího tunelu je na **obr. 13**. Z okolí výlomu jsou vyjmuty a zvýrazněny hlavní dva bloky, které program vybral jako nejkritičtější a dále je sytě vyznačen tvar oblasti dalšího zalamování horniny v pásmu bez napětí pod přirozenou horninovou klenbou.



obr. 13

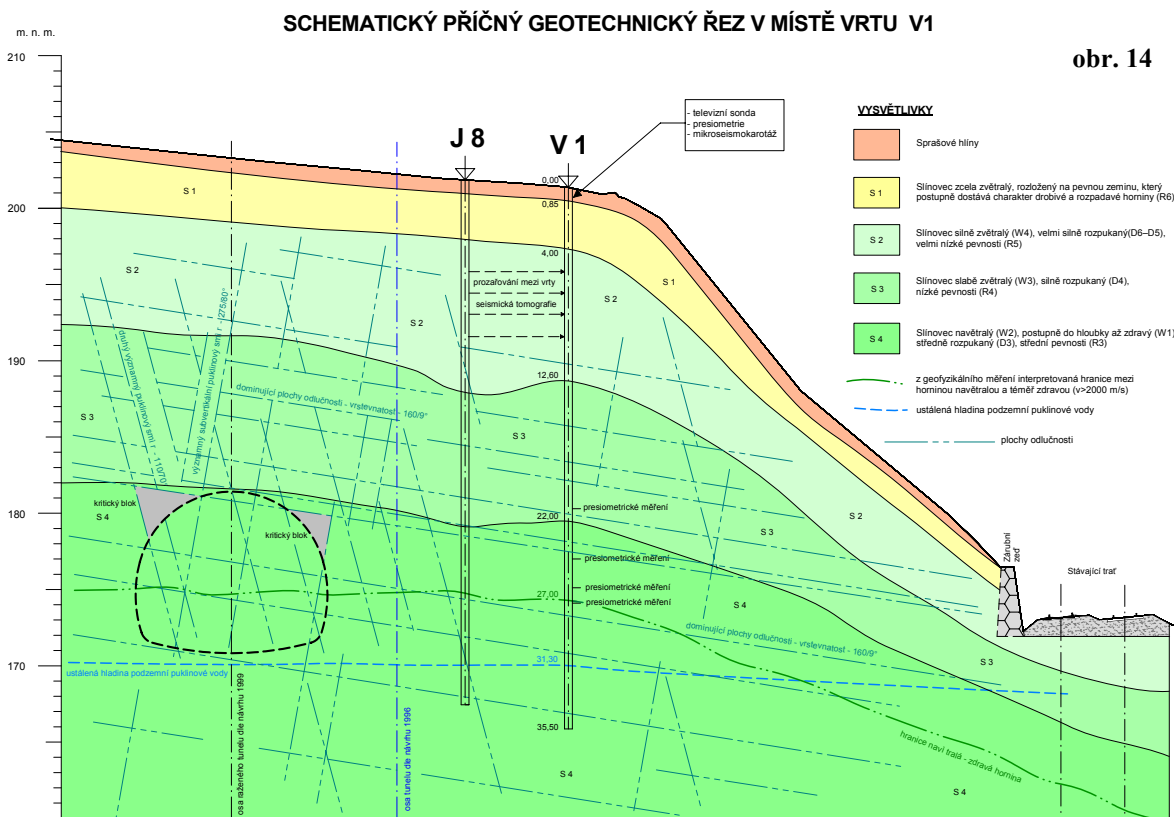
Výsledky této analýzy byly zohledněny statikem ve výpočtu primárního ostění a projeví se v návrhu delších kotev v rozích klenby tunelu.

4. Geotechnické vlastnosti prostředí

Na základě výsledků z průzkumu byl zájmový prostor rozdělen do geotechnických celků, kterým bylo možné stanovit stejné projektové charakteristiky.

Na základě provedené podrobné dokumentace a interpretace realizovaných zkoušek a měření bylo

možné vydělit tyto typy zastižených materiálů, kterým je možné přisoudit stejné charakteristiky:



obr. 14

- Povrchové kvartérní zeminy typu sprašových hlín, které pokrývají v mocnosti 0,5–2,0 m povrch celého zájmového území a šterky a písky (zbytky Vltavské terasy), které se objevují jako výplň mělkých povrchových depresí v povrchových partiích.

- Skalní podklad tvořený výhradně slínovci je vertikálně silně od povrchu postižen zvětrávacími procesy. Slínovec se zde vyskytuje od zcela zvětralého charakteru zeminy až po navětralou příp. zdravou skalní horninu. Vyjma portálových úseků je celá ražba situována do silně či slabě zvětralého slínovce.

Pevnost v prostém tlaku tohoto materiálu je poměrně nízká a nepřesahuje 36 MPa (střední pevnost). Po nasycení klesla pevnost na 50–70% pevnosti při přirozené vlhkosti.

Nasákavost je velmi malá (7–10%), čemuž odpovídá zjištěná propustnost vyjádřená koeficientem filtrace $k=3,0 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Zjištěná bobtnavost – objemová změna 1,2–1,4 % je pro tento typ sedimentů malá a nemá pro dimenzování primárního ostění zásadní význam.

Zjištěná abrazivnost - 0,2–0,6 (mg·m⁻¹) je příznivá pro jakoukoliv technologii rozpojování.

Schematické zastoupení jednotlivých kvalitativních typů ve vertikálním směru je zachyceno v příčném řezu na **obr.14** na předchozí straně.

5. Geotechnické podmínky ražby

Poznatky získané z průzkumu, bylo možné shrnout do těchto stručných faktů:

- Geotechnické poměry v prostoru raženého tunelu nejsou složité. V celém prostoru se vyskytuje v podstatě jeden typ horniny (křídové slínovce), který však nemá v celém prostoru stejné vlastnosti.
- Zjištěný výskyt materiálů charakteru zemin (kvartér, zcela rozložený slínovec) nehraje vyjma krátkých portálových úseků pro návrh technologie ražby významnou roli
- Horninový masiv se kvalitativně mění především ve vertikálním směru – různá intenzita zvětrání a rozpuštění což usnadňuje návrh výpočtového modelu (vrstevnatý).
- Z hlediska vodního režimu je lokalita příznivá, neboť v drtivé většině se předpokládá masiv suchý, neboť zastížená hladina podzemní puklinové vody je ve většině trasy pod niveletou počvy. Lokální zvodnění nebude mít spojitý charakter a bude se omezovat na jednotlivé zvodnělé pukliny.
- Pevnostní charakteristiky horninového materiálu (dle ČSN 721001 maximálně R3) jsou příznivé jak pro ražení mechanizované, tak klasické trhacími pracemi.

6. Realizace tunelu, skutečnost a prognóza

Ve velmi krátkém časovém intervalu po dokončení podrobného průzkumu a projektu stavby (1999), bylo Českými drahami přistoupeno k realizaci této stavby. Stavební práce započali již na podzim roku 2000, ražba na začátku roku 2001. V současnosti se tunel již dokončuje.

Vzhledem k tomu, že se jedná o krátký tunel v poměrně jednoduchých geologických podmínkách mimo obytnou zástavbu, kdy není nutné realizovat průzkumnou štolu, byla v podstatě první etapa tunelování interpretovaná jako velkorozměrový pokus a zkušenosti z něho byly využité nejen pro další ražbu, ale i pro předpověď chování horninového masivu. Během stavebních prací pak bylo možné porovnat geologické prostředí obnažené v ohromné ploše (portálové zemní práce, čelba tunelu) s prognózou z provedeného průzkumu. Základní postřehy lze shrnout do těchto bodů:

- Výkopové práce v oblasti portálů (odhad tříd těžitelnosti) potvrdily nezastupitelnou úlohu geofyzikálních (GF) měření (v tomto případě kombinace VES a MRS). Odkrytá kvalitativně odlišná hloubková rozhraní odpovídala předpovědi z geofyziky s přesností na 1 m.

- Interpretace GF měření vedených z povrchu pro zatřídění masivu v prostoru budoucí ražby však vykázala určité nepřesnosti. Výrazně indikovaný pokles rychlostí podélných seismických vln podpořený poklesem měrného elektrického odporu na jednom místě interpretovaný jako výrazná poruchová zóna, se naštěstí během ražby nepotvrdil. Z toho plyne, že interpretace tektonických poruchových zón z průzkumných metod vedených z povrchu je velmi diskutabilní a mnohdy zavádějící.
- Zvodnění se během ražby objevilo pouze ve formě lokálních přítoků.
- Tektonická měření uskutečněná během ražby v tunelu velmi dobře korespondovala s měřeními uskutečněnými televizní sondou ve vrtech a měřeními z ojedinelých výchozů. Fragmentace lavicovité sedimentární horniny během ražby a samovolné uvolňování horniny z obnaženého výrubu v rozích klenby a nadstropí (geologické nadvylomy)

obr. 15



odpovídalo prognóze ze strukturální analýzy. Poměrně snadná obsluha programu Wingeovek a Wingsap a názorné grafické výstupy ukazují, že tento typ geologického softwaru určeného speciálně pro tunelovou geologii bude v budoucnu čím dál více hrát nezastupitelnou úlohu pro správný návrh zajištění výrubu a technologii rozpojování. Na vedlejším obr. 15 je snímek čelby s bíle vyznačenými hlavními tektonickými směry,

což dobře koresponduje s prognózou z průzkumu - obr. 13.

- prognóza kvality horniny v prostoru budoucí ražby se ukázala mírně pesimistická. Ve skutečnosti se po většinu ražby v čelbě vyskytovala hrubě lavicovitá až masivní sedimentární hornina.

Realizovaným průzkumem se podařilo poměrně dobře předpovědět geologické a geotechnické podmínky v prostoru tunelu. Nedošlo tedy k velmi častému výraznému navýšení nákladů na stavbu z důvodu nečekaných geologických podmínek. Přičíst to lze především dvěma faktorům - jednoduchým geologickým podmínkám a relativně dostatečnému finančnímu rozsahu, který byl i tak s ohledem na jednoduché geologické podmínky nízký. Cena za průzkum činila 15% z ceny projektu a 0,27% z ceny stavby.

LITERATURA:

- (1) Kovář L.: Předběžný inženýrskogeologický průzkum v přeložce trati ČD „Nové Ouholice - Mlčechvosty“ (Unigeo a.s., 1995-6)
- (2) Goodman R.E., Gen Hua Shi: Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA (1985)
- (3) Stacey T.R., Page C. H.: Practical Handbook for Underground Rock Mechanics. Trans Tech Publications, Clausthal - Zellerfeld, SRN (1986)