

ZHODNOCENÍ TERÉNNÍCH ZKOUŠEK PRO TUNEL MRÁZOVKA

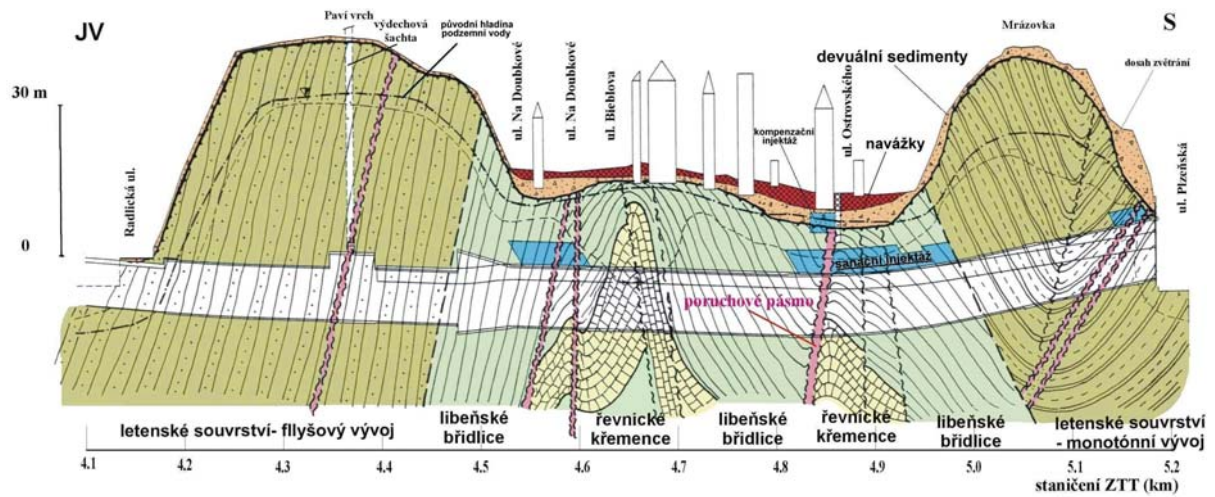
Ing. JIŘÍ HUDEK, CSc, Mgr. RADOVAN CHMELAR, PUDIS a. s., Praha

V současné době u nás probíhá v souvislosti s výstavbou dálnic a městských okruhů průzkumná příprava či geotechnický monitoring řady tunelových staveb. Proto se jeví účelné podat na tomto semináři také stručné zhodnocení těchto prací na nyní dokončeném tunelu Mrázovka v Praze (byl předán do provozu 26. srpna). Jedná se o vysoce náročný městský automobilový tunel (západní trouba délky 1004 m, východní 837 m) s plochou výrubu u třípruhových částí 165 m² a v rozpletu dokonce až 335 m². Trasa měla převážně mělkou hloubku vedení pod starou zástavbou v horninách s nízkou pevností. Například v oblasti ul. Ostrovského byla u východního tunelu (zde šířky výrubu 16,5 m) celková mocnost nadloží k úrovni základů přes 100 let starého pětipodlažního domu pouze cca 10 m, z čehož ještě zeminy pokravných útvarů a rozložené a zvětralé břidlice činily 6 m.

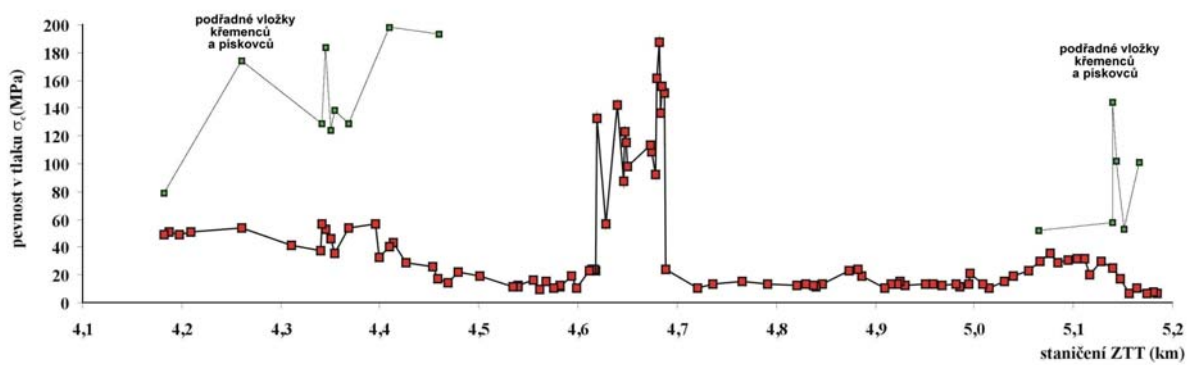
Polní geotechnické metody byly důležitou součástí průzkumných prací. Zahrnovaly jak soubory terénního zjišťování přetvárných a pevnostních charakteristik tak i aplikaci metod monitoringu. Na realizaci se významně podílela naše firma PUDIS (zpracovatel všech etap průzkumu – včetně štoly a části monitorování ražby vlastních tunelů), dále IKE (do r. 1999 speciální monitorovací práce průzkumné štoly) a v průběhu výstavby tunelů zejména SG Geotechnika (především extenzometrie, inklinometrie a vyhodnocování monitoringu) a Angermeier Engineering (konvergence, nivelace).

Pro ilustraci horninového prostředí je na obr. 1 podélný geologický řez západní tunelovou troubou. Skalní masiv je tvořen sedimenty ordovického moře pražské pánve, která je součástí Barrandienu. Ve sledu od severu k jihu je to monotónní vývoj letenského souvrství (prachovitopísčité břidlice, ojediněle s vložkami křemenců a pískovců), dále libeňské jílovitoprachovité břidlice, řevnické křemence (libeňské souvrství) a v jižní části flyšový vývoj letenského souvrství (písčité až drobové břidlice s vložkami jemnozrnných křemenců). Tyto sedimenty byly následně při variském vrásnění nejprve zprohýbány, což se projevilo výraznými synklinálními (vrch Mrázovka) či antiklinálními strukturami. Později byly ještě „rozlámány“ na jednotlivé tektonické kry. V kvartéru pak došlo v místech predisponovaných tektonickými liniemi ke vzniku erozních rýh, vyplněných sedimenty občasných vodotečí. Na svazích a jejich úpatí se zase vyvinuly deluviální (svahové) sedimenty. Nakonec byl v recentu na mnoha místech terén zarovnán navážkami.

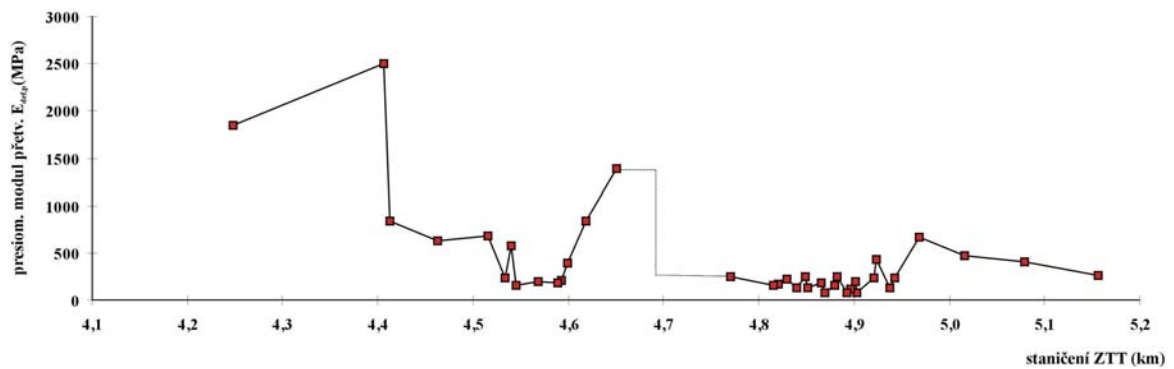
Z klasifikačního hlediska je vhodné upřesnit charakter skalního podloží prostřednictvím pevnosti horniny v jednoosém tlaku σ_c . Její průběh podél trasy západního tunelu je vyznačen na obr. 2. Z grafů jsou patrné velké rozdíly mezi jednotlivými úseky. U monotónního vývoje



Obr. 1 Schématický podélný geologický řez západní tunelovou troubou (5x převýšeno).



Obr. 2 Průběh průměrné pevnosti v tlaku horninového materiálu v západní tunelové troubě.



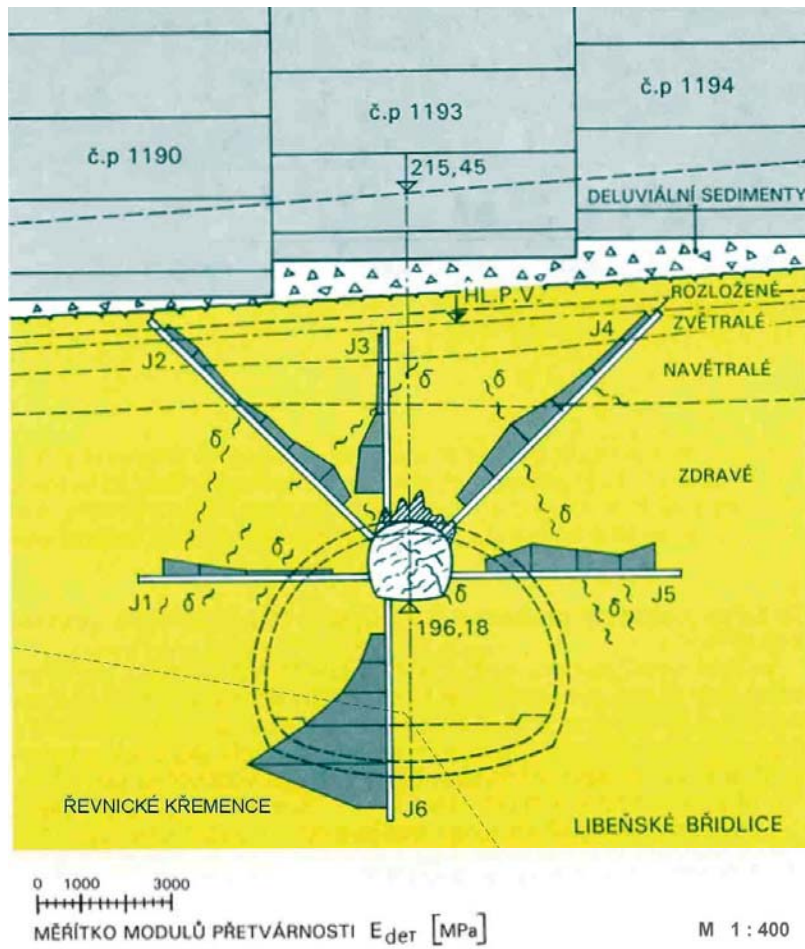
Obr. 3 Průběh průměrných presiometrických modulů přetvárnosti v západní tunelové troubě.

letenského souvrství převládající písčité břidlice vykazují ve zdravém horizontu pevnost od 20 do 35 MPa (hornina třídy R 3). U libeňských jílovitoprachovitých břidlic je to nejčastěji 10 až 15 MPa (R 4) a u řevnických křemenců 100 až 190 MPa (R 2 až R 1). U flyšového vývoje letenského souvrství převládající písčité až drobové břidlice mají pevnost 25 až 55 MPa (převážně R 3) a vložky křemenců a pískovců 80 až 200 MPa (R 2 až R 1).

Podstatná část geotechnických prací byla soustředěna do průzkumné štoly, ražené v západní troubě od severního portálu na délku 790 m, se dvěma odbočkami do východní trouby (v oblasti ul. Ostrovského 193 m a v úseku přilehlém k rozpletu 124 m). Průzkumnou štolu lze v celém komplexu pokládat za velkou polní zkoušku. Její realizace je často diskutovanou otázkou. Někteří odborníci ji zavrhují pro vysoké pořizovací náklady a časovou náročnost, jiní ji zase doporučují pro přesnost a spojitost získaných údajů. Dnes s odstupem času lze konstatovat, že rozhodnutí jejího vybudování zde bylo správné a že klady výrazně převýšily zápory. Ve štole bylo možné zkoumat a zkoušet horninový masiv včetně jeho puklin, vrstevních a jiných ploch nespojitosti. Do jejího boku byly situovány rozrážky pro polní zkoušky na horninových blocích a do jejího okolí (nadloží, boků a podloží) zasahovaly vrtné vějíře pro terénní presiometrická měření. Tak byly získány hodnoty pevnostních a přetvárných parametrů hornin, které byly interpretovány pro vstupy do statických výpočtů formou matematického modelování. Samotná ražba průzkumné štoly byla hmotným modelem budoucího velkoprofilového tunelu. Zvláště cenné byly informace o velikostech deformací při průchodu pod zástavbou. V daných horninách byly odzkoušeny i některé konstrukční prvky, zejména horninové kotvy. Dále zde byly provedeny a vyhodnoceny zkoušky zpeňovacích (sanačních) injektáží horninového prostředí, které byly s úspěchem použity při ražbě tunelu. Praktické zkušenosti získané z průzkumné štoly byly využity při ražbě tunelu. Důležité bylo, že obě tato díla prováděl stejný zhotovitel (METROSTAV – divize 5, zhotovitelem jižní části tunelu byla Subterra). Průzkumná štola měla velký význam i při samotné ražbě tunelu, zejména se z ní prováděly sanační injektáže a presiometrická kontrola jejich úspěšnosti. Dále štola působila jako mohutná kotva do čelby kaloty a pomáhala tak zvýšit její stabilitu. Při bourání ostění štoly byla ve výrubu ponechávána její stropní klenba, která potom tvořila ochranu v ještě nezajištěném výrubu kaloty. Nevýhodou bylo především rozvolnění horninového prostředí nad výrubem budoucího tunelu.

Presiometrické zkoušky byly zpravidla ve vějířích o 6 vrtech – viz příklad na obr. 4. Vertikální a horizontální vrty měly délku 10 m, diagonální 15 m. Jednotlivá měření byla nejčastěji ve vzájemných vzdálenostech 1,0 m. Vějířů tohoto typu bylo celkem 16.

V rozrážkách byly umístěny terénní zkoušky v jednoosém a tříosém tlaku (na blocích výšky 100 cm a průřezu 50 x 50 cm), smykové s předurčenou plochou porušení v plochách oslabení (vrstevnatost, puklinatost, tektonická brekcie) a zatěžovací zkoušky deskou. Pro ilustraci je na obr. 5 fotografie zkoušky v tříosém tlaku. Zkušebních rozrážek bylo celkem 6.



Obr. 4 Průběh presiometrických modulů přetvárnosti ve vrtném vějíři pod ulicí Ostrovského.



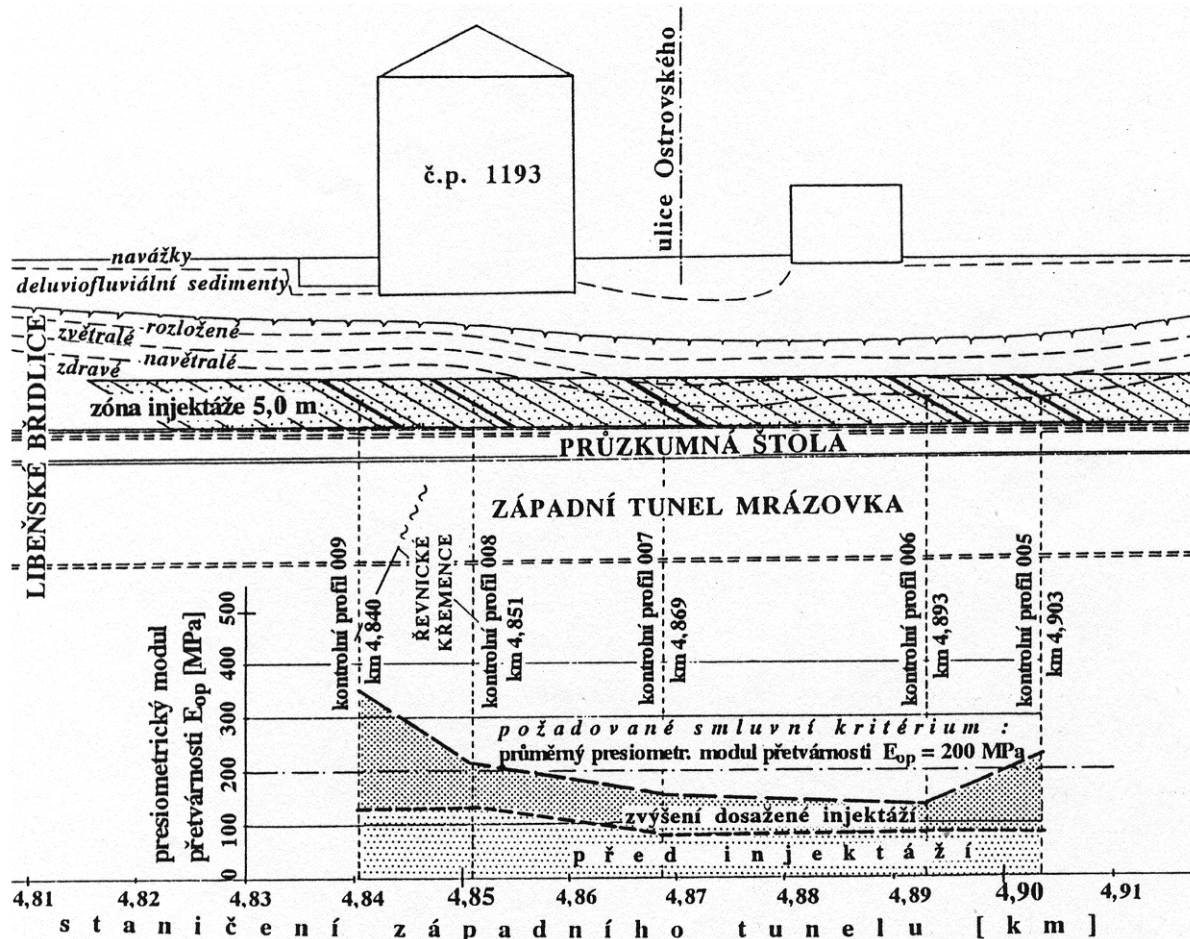
Obr. 5 Zkušební rozrážka s terénní zkouškou v třísém tlaku (na horninovém bloku výšky 100 cm a průřezu 50 x 50 cm).

Pro ověření možností injekčního zpevnění horninového masivu v nadloží průzkumné štoly (resp. tunelu) byly dále provedeny v oblasti ul. Ostrovského dva injekční pokusy a jejich zhodnocení opět s aplikací terénních presiometrických zkoušek. Tímto způsobem byly získány podklady pro upravení technologie sanačních injektáží, kvantifikování možnosti jejich zpevňovacího efektu a stanovení kontrolních kritérií.

Z realizovaného počtu (několik set) presiometrických zkoušek na trase tunelu Mrázovka je nejdůležitějším výsledkem presiometrický modul přetvárnosti $E_{def,p}$. Příklad jeho průběhu v příčném řezu ve vrtném vejří v oblasti ul. Ostrovského je zachycen na obr. 4. Pro porovnání deformovatelnosti (resp. tuhosti) horninových bloků v aktivní zóně nadloží (resp. výšky cca 5 m nad vrcholem tunelu) je do obr. 3 vynesena průběh jeho hodnot podél celé trasy západní trouby. Jsou zde vyznačeny průměry ze série 5 až 15 paralelních zkoušek situovaných do vrtných vějířů z průzkumné štoly či vrtů z povrchu terénu. Z grafu jsou patrné velké rozdíly mezi jednotlivými úseky. U monotónního vývoje letenského souvrství se vzrůstající výškou nadloží pod vrchem Mrázovka roste $E_{def,p}$ od 260 na 470 MPa. U libeňských břidlic jsou nejnižší moduly přetvárnosti samozřejmě v oblastech, kde do aktivní zóny nadloží ještě výrazně zasahuje vliv zvětrání (zejména pod erozní rýhou přilehlou k ulici Ostrovského). Zde jejich průměry klesají až na 80 MPa a v oblasti celé terénní kotliny mezi Pavím vrchem a Mrázovkou nepřevyšují hodnotu 250 MPa. Podstatně příznivější poměry jsou na úpatí obou těchto vrchů, kde zdravé nadloží vykazuje průměry $E_{def,p}$ v intervalu 250 až 670 MPa. Nízká deformabilita je rovněž u břidlic v atypickém pyritizovaném vývoji – především v sousedství řevnických křemenců, kde jsou zvýšené moduly až na 250 – 400 MPa (vyjímečně až 800 MPa). Obdobné vyšší tuhostní parametry má na jihu rovněž úsek přilehlý k následujícímu flyšovému vývoji letenského souvrství (v oblasti tunelových rozpletů) s presiometrickými moduly přetvárnosti až 700 MPa. Řevnické křemence mají podstatně vyšší tuhost s průměrným presiometrickým modulem přetvárnosti cca 1400 MPa. Flyšový vývoj letenského souvrství se nachází v části trasy pod Pavím vrchem a nadloží tunelu zde dosahuje mocnosti až přes 45 m (viz obr. 1). Průměrné presiometrické moduly přetvárnosti jsou zde značně vysoké, 800 až 2500 MPa.

V průběhu monitoringu výstavby tunelu byly presiometrické zkoušky použity ke kontrole úspěšnosti zpevňovacích (sanačních) injektáží, jejichž zhotovitelem byla firma Zakládání staveb a.s. Příklad výsledků pro úsek přilehlý k ul. Ostrovského je zachycen na obr. 6. Zde došlo po injektáži k výraznému zlepšení mechanických charakteristik horninového masivu. Především se zvýšila průměrná hodnota (z 5 vějířů) presiometrického modulu přetvárnosti ze 101 MPa před injektáží na 216 MPa po ní. Také se snížily relativní charakteristiky rozptýlu, t.j. zvýšila se homogenita horninového masivu. Důležité dále je, že po injektáži se podstatně zmenšil výskyt nejnižších změřených hodnot, například průměrná četnost modulů přetvárnosti nižších než 100 MPa klesla z 65 na 27 % a zastoupení modulů menších než 50

MPa se snížilo z 11 na 3 %. Zpevňující injektáží se tedy podařilo výrazně zmešit rozsah hornin s nejvyšší stlačitelností. Obdobně průměrná mez tečení p_f byla před injektáží 2,02 MPa a po ní 2,74 MPa, t.j. smyková pevnost přibližně vzrostla o 39 %.



Obr. 6 Průběh průměrných presiometrických modulů přetvárnosti před a po injektáží v úseku západního tunelu přilehlém k ul. Ostrovského.

Realizace tunelu Mrázovka jako nejnáročnější a nejkomplikovanější současné stavby tohoto typu v České republice proběhla bez havárií. Toto je úspěchem zodpovědného přístupu zainteresovaných odborníků od etapy průzkumu a projektu až ke zhotovení velkého tunelového díla. Získané informace o vlastnostech horninového prostředí mají význam pro interpretaci pro další náročné stavby v obdobném typu ordovických břidlic (zejména přímo ve střední části Prahy) a to i s přihlédnutím k okolnosti, že v obdobném rozsahu a komplexnosti již pravděpodobně zde nebudou nikdy realizovány.