

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Způsob provádění inženýrsko-geologického průzkumu pro velké
tunelové stavby průzkumnou štolou a zkušenosti z provádění tohoto
průzkumu na průzkumné štolě Radlická v lokalitě Prahy 5
Method of Implementation of Engineering-geological Survey for
Large Tunnels Exploration Gallery and Experiences from the
Implementation of this Survey in the Exploration Gallery Radlická in
Prague 5

Student:

Tomáš Pospíšil

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student:	Bc. Tomáš Pospíšil
Studijní program:	N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor:	3607T035 Geotechnika
Téma:	Způsob provádění inženýrsko-geologického průzkumu pro velké tunelové stavby průzkumnou štolou a zkušenosti z provádění tohoto průzkumu na průzkumné štolě Radlická v lokalitě Prahy 5 Method of Implementation of Engineering-geological Survey for Large Tunnels Exploration Gallery and Experiences from the Implementation of this Survey in the Exploration Gallery Radlická in Prague 5
Jazyk vypracování:	čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod, definice řešené problematiky
2. Vývoj inženýrsko-geologického průzkumu pro tunelové stavby, použité metody, účel a přínos průzkumných štol a specifika IGP pro tento typ podzemní stavby, zkušenosti z ČR a zahraničí
3. Situace při provádění IGP pro průzkumnou štolu Radlická, získané výsledky průzkumu
4. Vyhodnocení doposud dosažených výsledků – zhodnocení přínosu jednotlivých metod, jejich oprávněnost, další možnosti provádění IGP průzkumu
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LAHUTA, Hynek. *Doc.Dr.Ing.Hynek Lahuta - Informační stránka* [online]. 2005, poslední revize 25.5.2010. Dostupné z: <www.fast.vsb.cz/lahuta>
- [2] ČSN EN 1997-1 : 2006. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 138 s.
- [3] ČSN EN 1997-2 : 2008. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 152 s.
- [4] Projektová dokumentace: *Stavba č.: 9567 – Radlická radiála JMZ – Smíchov Podrobný inženýrskogeologický průzkum, Díl I. Průzkum pro tunely Radlice realizovaný z průzkumné štoly*. Praha 9/2011
- [5] Stavba č.: 9567: *Radlická radiála JMZ – Smíchov Podrobný inženýrskogeologický průzkum, Čtvrtletní etapové zprávy (Průzkumné práce)*. PUDIS a.s., Praha 2013 - 2014

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

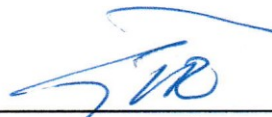
Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Dr. Ing. Hynka Lahuty a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Hynku Lahutovi, Ing. Janu Panuškovi a RNDr. Radovanu Chmelařovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, konzultace a čas, který mi věnovali při tvorbě této práce.

Abstrakt

Inženýrsko-geologický průzkum pomocí průzkumné štoly je nedílnou součástí průzkumu rozsáhlých tunelových staveb. Zejména při složitých geologických poměrech, v zastavěném území, či velkou mocností nadloží. Pomocí průzkumné štoly zjišťujeme informace přímo v zájmovém území budoucí realizace tunelu. Umožňuje nám odebrání vzorků pro laboratorní zkoušky, provádění zkoušek přímo ve štole, mnohá měření a využívání ostatních metod průzkumu. Následné určování mechanických, fyzikálních a technologických vlastností horninového masivu. Tato práce popisuje jednotlivé metody a využívání inženýrsko-geologického průzkumu.

Cílem této práce je na základě prováděného inženýrsko-geologického průzkumu na průzkumné štole Radlické získat výsledky průzkumu. Zhodnotit výsledné parametry, vyhodnotit přínos jednotlivých metod průzkumu a další možnosti provádění průzkumu.

Klíčová slova: inženýrsko-geologický průzkum, průzkumná štola, tunelová stavba

Abstract

Engineering-geological Survey by exploratory gallery is an integral part of a survey of large tunnels. It's especially important in localities with complicate geological conditions, in the built-up areas or in areas with large thickness of overburden. Through exploratory gallery we get information direct at the place of future tunnel's realization. It allows us to carry out many tests and measurements directly in the exploration gallery and take samples for further laboratory analyses and subsequently specify mechanical, physical and technological properties of the rock massif.

This thesis describes individual methods of engineering-geological survey and its practical use. The aim of this work is to carry out this survey in currently excavated gallery Radlická, evaluate the resulting parameters and the advantages of individual methods and possibly consider other options the survey.

Key words: Engineering-geological Survey, Exploration Gallery, tunnels

Obsah diplomové práce:

Seznam použitého značení:	5
1. Úvod	6
2. Vývoj inženýrsko-geologického průzkumu pro tunelové stavby	7
2.1 Používané metody	7
2.1.1 Studium archivních materiálů, odborné literatury a rekognoskace území	8
2.1.2 Inženýrsko-geologické a hydrogeologické mapování	8
2.1.3 Geofyzikální průzkum	10
2.1.4 Vrtný průzkum	15
2.1.5 Průzkumné štoly a šachty	17
2.1.6 Laboratorní zkoušky	17
2.1.7 Terénní zkoušky a měření	18
2.1.8 Geotechnický monitoring	20
2.1.9 Matematické modelování	21
2.2 Účel a přínos průzkumných štol	22
2.2.1 Účel průzkumných štol	22
2.2.2 Přínos průzkumných štol	24
2.3 Specifika inženýrsko-geologického průzkumu pro tunelové stavby	25
2.4 Zkušenosti z ČR	25
2.4.1 Průzkumná štola MO Špejchar – Pelc – Tyrolka (Tunel Blanka)	26
2.4.2 Průzkumné štoly tunelu Dobrovského	28
2.5 Zkušenosti ze zahraničí	29
2.5.1 Průzkumná štola Višňové	29
3. Situace při provádění inženýrsko-geologického průzkumu pro průzkumnou štolu radlická	
31	
3.1 Inženýrsko-geologické a hydrogeologické poměry	31
3.2 Průzkumná štola	33

3.2.1	Průzkumné práce a měření před ražbou průzkumné štoly	35
3.2.2	Průzkumné práce a měření v průběhu ražby průzkumné štoly	35
3.2.3	Průzkumné práce a měření po vyražení průzkumné štoly.....	36
3.2.4	Monitoring.....	36
3.3	Získané výsledky průzkumu	37
3.3.1	Inženýrskogeologické a geotechnické sledování výrubu průzkumné štoly	39
3.3.2	Hydrogeologické sledování	46
3.3.3	Presiometrické vějíře z průzkumné štoly	48
3.3.4	Inženýrskogeologická dokumentace jádrových vrtů presiometrických vějířů... ..	49
3.3.5	Laboratorní zkoušky mechaniky hornin.....	52
3.3.6	Geofyzikální měření ve vrtech pro presiometrické zkoušky	53
3.3.7	Geofyzikální měření z povrchu terénu	54
3.3.8	Geoelektrický korozní průzkum.....	54
3.3.9	Další realizované metody	54
4.	Vyhodnocení	55
4.1	Zhodnocení přínosu jednotlivých metod a jejich oprávněnost	55
4.1.1	Inženýrskogeologické a geotechnické sledování výrubu průzkumné štoly	55
4.1.2	Hydrogeologické sledování	56
4.1.3	Presiometrické vějíře z průzkumné štoly	56
4.1.4	Geofyzikální měření	57
4.2	Další možnosti provádění inženýrsko-geologického průzkumu	58
5.	Závěr.....	60
6.	Seznam obrázků, tabulek a příloh	62
7.	Seznam použité literatury	64

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ:

Písmena latinské abecedy

E_{def}	Modul přetvárnosti	[Mpa]
$E_{\text{def,p}}$	Presiometrický modul přetvárnosti	[Mpa]
FS	Stupeň bezpečnosti	[-]
v_o	Základní objem měřící buňky prázdné presiometrické sondy (nulové čtení)	[m ³]
v_m	Objem vody natlačené do měřící buňky středním tlakem, odpovídajícím středu lineárního stádia přetvárného diagramu	[m ³]
Fv	Abrazivost	[mg. m ⁻¹]

Písmena řecké abecedy

σ_c	Pevnost v tlaku	[Mpa]
γ_n	Součinitel stupně bezpečnosti pro suchou zeminu	[-]
φ	Úhel vnitřního tření	[°]
Δ_p / Δ_v	Směrnice přetvárného diagramu v lineárním pseudoelastickém Stadiu	[-]
ν	Poissonovo číslo	[-]
ρ	Elektrický měrný odpor (rezistivita)	[$\Omega \cdot m$]
η	Poralizovatelnost	[Cm ² . V ⁻¹]

1. ÚVOD

Inženýrsko-geologický průzkum je nedílnou součástí jakýchkoliv objemově rozsáhlých stavebních prací realizovaných v horninovém masivu. Zejména u velkých tunelových staveb se provádí inženýrsko-geologický průzkum z povrchu, tak i za pomoci průzkumné štoly. Průzkumná štola je jednou z nezbytných součástí takových staveb a nese sebou celou škálu negativ, ale především pozitiv.

Inženýrsko-geologický průzkum se skládá z pěti etap a to průzkum orientační, předběžný, podrobný, doplňkový a provozní. V rámci těchto etap by měl být inženýrsko-geologický průzkum komplexní a dostatečně vypovídající o stavu naší zájmové oblasti.

V rámci inženýrsko-geologického průzkumu jsou předmětem zkoumání horniny, horninový masiv, podzemní voda a geodynamické procesy.

Cílem inženýrsko-geologického průzkumu je získat potřebné data a informace, vyhodnotit je a klasifikovat, abychom předešli nesprávným postupům a technologii výstavby realizovaného díla. V zastavěném území a při složitých geologických podmínkách má průzkumná štola své nezaměnitelné postavení v rámci průzkumu. Podává nám možnost získání přesných dat, realizaci různých měření a zkoušek přímo ze štoly, které jinou metodou získat nelze. Dále dokážeme předcházet nepříznivým vlivům a realizovat bezpečnostní opatření ještě před samotnou ražbou tunelového díla.

2. VÝVOJ INŽENÝRSKO-GEOLOGICKÉHO PRŮZKUMU PRO TUNELOVÉ STAVBY

Vývoj inženýrsko-geologického průzkumu se pohybuje na zdokonalování postupů a technologií metod provádějící průzkum. Bez inženýrsko-geologického průzkumu se žádná tunelová stavba neobejde, proto průzkum sahá do prvopočátku vytváření tunelových děl.

2.1 Používané metody

V jednotlivých fázích průzkumu používáme různé metody průzkumných prací. Jejich výběr vyplývá z náročnosti a rozmanitosti dané oblasti, v neposlední řadě také náročnosti tunelového díla. Využití jednotlivých metod závisí také na znalosti území, předpokladech a odbornosti zúčastněných členů v procesu výstavby. Na nich závisí, jakým způsobem se bude průzkum ubírat, případně modifikovat podle daných parametrů v trase ražby. V neposlední řadě záleží na poskytnutých finančních prostředcích, času, zvolené technologii a míře rizika, které jsou ochotni se účastníci výstavby vystavit. [1]

Metody inženýrsko-geologického průzkumu

- Studium archivních materiálů, odborné literatury a rekognoskace území
- Inženýrsko-geologické a hydrogeologické mapování
- Geofyzikální průzkum
- Vrtný průzkum
- Průzkumné štoly a šachty
- Laboratorní zkoušky
- Terénní zkoušky a měření
- Geotechnický monitoring
- Matematické modelování

2.1.1 Studium archivních materiálů, odborné literatury a rekognoskace území

Studium odborné literatury dané oblasti, případně průzkumných prací již realizovaných ve zkoumané lokalitě. Archivované materiály – GEOFOND. Takové materiály nám mohou usnadnit a zmenšit objem potřebných průzkumných prací. Na území naší republiky je poměrně vysoká prozkoumanost geologie, zejména na území Prahy.

Rekognoskace probíhá zkoumáním, pozorováním a prohlídkou terénu, které nám poskytnou základní charakter území. V rámci budoucího využívání oblasti je nutné vysledovat inženýrské sítě a vedení, elektrifikaci, ale i různé kanalizační vpusti, šachtice apod., které nemusí být zmapované a porovnat je ze stávající situací. [1]

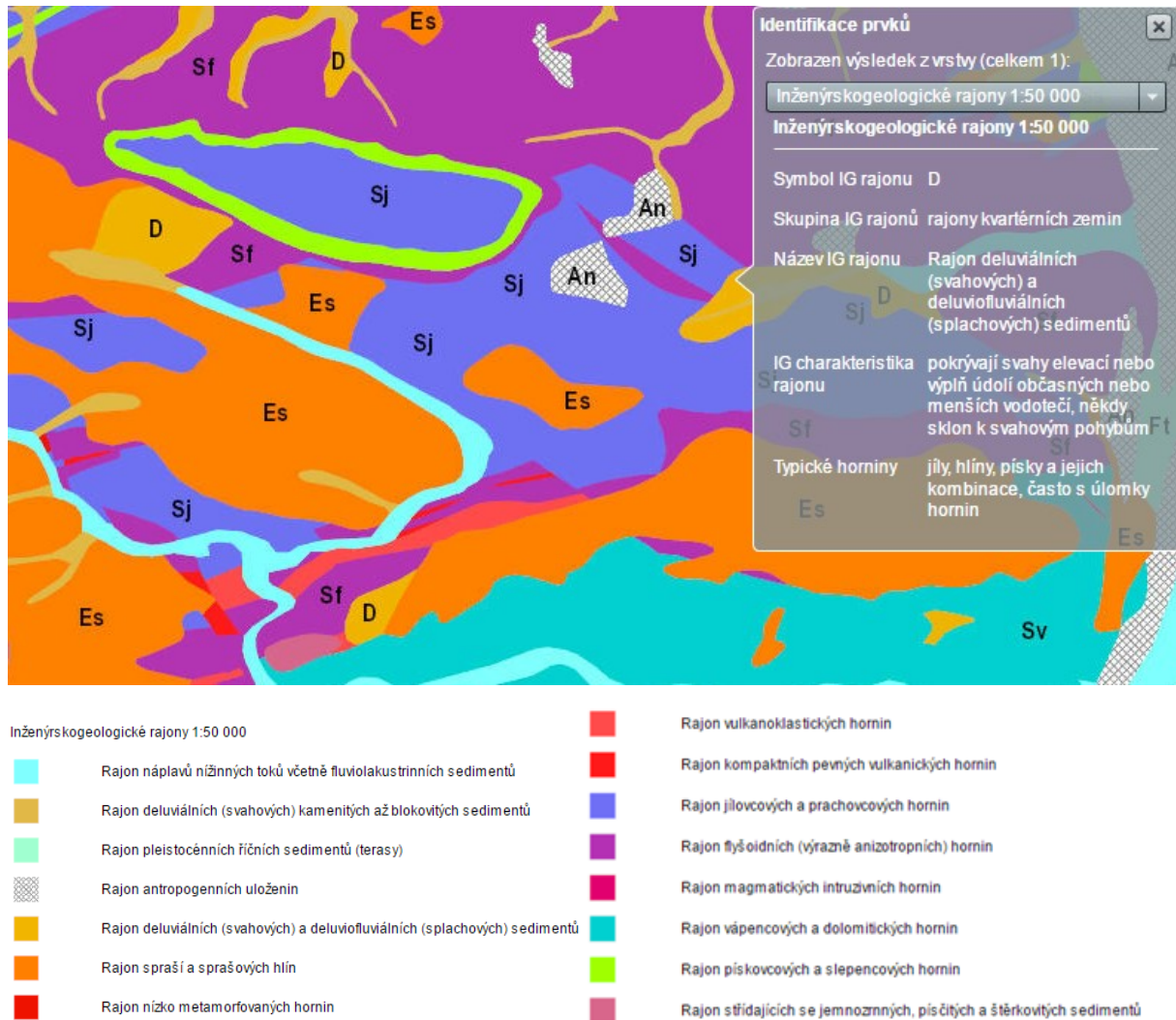
2.1.2 Inženýrsko-geologické a hydrogeologické mapování

Inženýrsko-geologické mapování je typem geologického mapování zobrazující složky geologického prostředí, u kterých se předpokládá interakce se stavebním dílem. Mapy poskytují základní údaje o geologii na základě provedeného mapování terénu, dokumentace a poznatků z průzkumných vrtů, hodnocení geodynamických procesů prováděných v dané oblasti. V inženýrsko-geologickém průzkumu se zejména uplatňují mapy v měřítku 1 : 10000 a větší. [1]

Dle obsahu se rozeznávají tyto typy inženýrsko-geologických map

- Mapy inženýrsko-geologických poměrů jsou mapy znázorňující základní složky geologického prostředí, tříděné na základě podobnosti nebo stejnorodosti takových vlastností, které jsou významné z hlediska inženýrské geologie
- Mapy inženýrsko-geologické rajonizace, na kterých jsou vyčleňovány při určitém zjednodušení jednotlivé regiony, oblasti, rajony, podrajony a okrsky (dle podrobnosti mapy) na základě shodnosti a podobnosti vlastností horninového prostředí
- Mapy inženýrsko-geologické valorizace (zhodnocení) hodnotí jednotky, které byly vyčleněny metodami inženýrsko-geologické rajonizace z hlediska vhodnosti podmínek dalšího využívání území

- Účelové inženýrsko-geologické mapy jsou vypracovávány zpravidla na rozměrově menším území a soustředí se zpravidla na omezený počet sledovaných geofaktorů. [2]



Obr. 1 – Inženýrsko-geologická mapa rajonů části oblasti Prahy 5 [3]

Hydrogeologické mapování všestranně poznává, popisuje a zobrazuje výskyt a režim podzemních a povrchových vod a upřesňuje charakter hydrogeologických struktur. V rámci mapování se zhodnocují podmínky tvorby podzemních vod, infiltračních oblastí a míst akumulace v hodnocené oblasti. Hydrogeologická mapa zahrnuje informace o hydraulických parametrech horninového prostředí a potřebné informace o chemickém složení a kvalitě podzemních vod z hlediska jejich využití pro různé účely, tak z hlediska případné ochrany stavebního díla. [4]

2.1.3 Geofyzikální průzkum

Jedna ze základních metod inženýrsko-geologického průzkumu jsou geofyzikální práce, pomocí nichž získáváme informace o geologické stavbě zkoumané oblasti včetně fyzikálně-mechanickém stavu horninového masivu. Geofyzikální metody se uplatňují od etapy orientačního průzkumu až po etapu podrobného, případně doplňkového průzkumu. Využívá se při průzkumu z povrchu, tak i z průzkumného díla, před ražbou a i během ní. V případě velmi hlubokých tunelů jsou jednou z mála použitelných metod předběžného průzkumu a přispívají k zefektivnění rozmístění budoucích průzkumných vrtů v další fázi. Geofyzikální metody jsou zakládány na principu měření specifických vlastností hornin a horninového masivu, kdy změna vlastností znázorňuje změnu různých druhů horniny, poruchové zóny, přítomnost statické případně proudící vody, změny stavů napjatosti v masivu, zvětrání, výskyt dutin a mnoho dalších.

Výhodou těchto metod je rychlost a poměrně ekonomicky příznivá cena, proto je jejich využití velmi rozsáhlé. Poskytují nám kvalitativní výsledky. Touto metodou získáváme informace o anomáliích v horninovém prostředí, které dále upřesňujeme pomocí průzkumných vrtů. Geofyzikální průzkum napomáhá optimálnímu situování průzkumné štoly a šachtic. [1], [5]

Geofyzikální metody průzkumu

- Geoelektrické metody
- Geomagnetické metody
- Radiometrické metody
- Termické metody
- Gravimetrické metody
- Seizmické metody
- Karotážní metody

Geoelektrické metody

Geoelektrické metody jsou založeny na měření specifického odporu, přirozených potenciálů polarizovatelnosti hornin a dalších měřitelných parametrů hornin a horninového masivu.

Geoelektrické metody mohou sledovat pole stejnosměrné případně střídavé, přirozené nebo umělé. Nejrozšířenější metody jsou: odporové, odporové profilování, vertikální elektrické sondování, multielektrodové uspořádání, dipólové elektromagnetické profilování, metoda velmi dlouhých vln, georadar, spontánní polarizace, vyzvaná polarizace. Pomocí těchto metod zjišťujeme horizontální a vertikální hranice jednotlivých typů prostředí, tektonické poruchy, oslabené zóny horninového masivu, průsakové oblasti, proudění podzemní vody, agresivitu a další specifické vlastnosti.

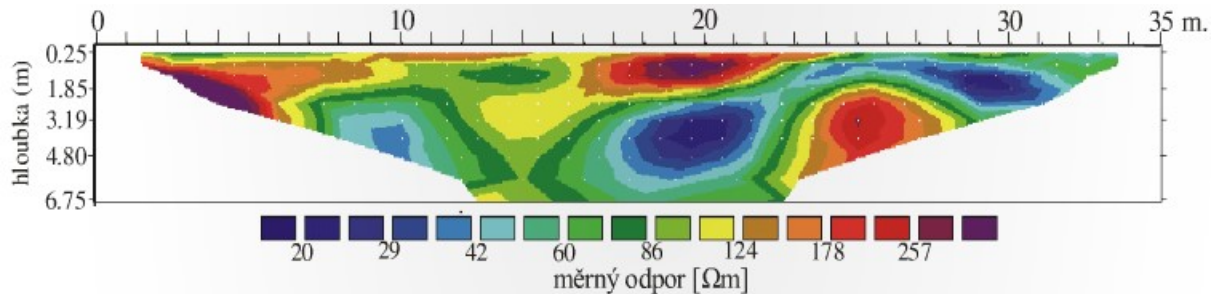
Pro inženýrsko-geologický průzkum jsou tyto metody vhodné a často se používají. [5], [6]

Elektrické vlastnosti hornin se určují těmito základními parametry:

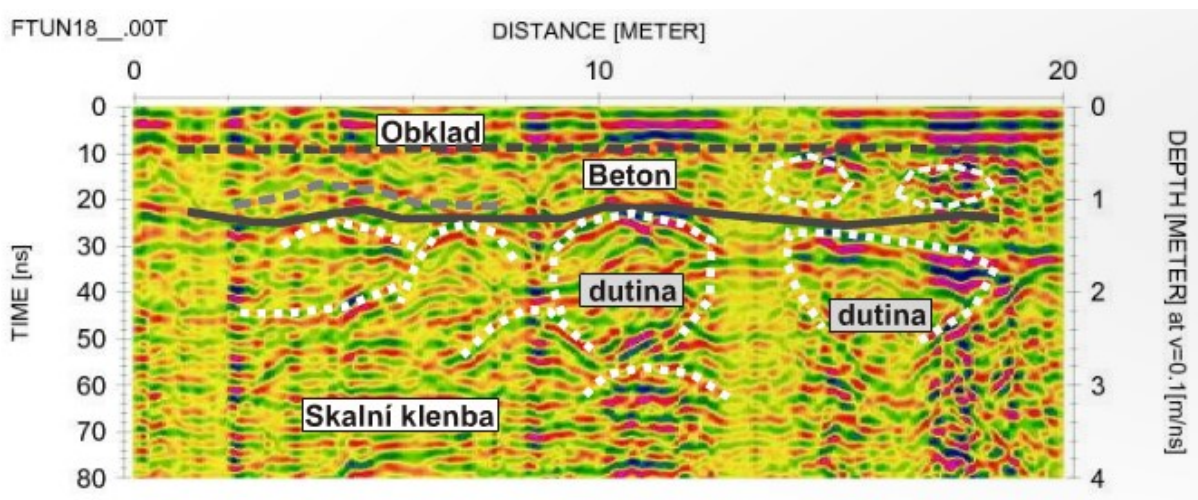
ρ – elektrický měrný odpor (rezistivita)

ϵ – permitivita (dielektrická konstanta)

η – polarizovatelnost (elektrochemická aktivita)



Obr. 2 – Odporový řez [6]

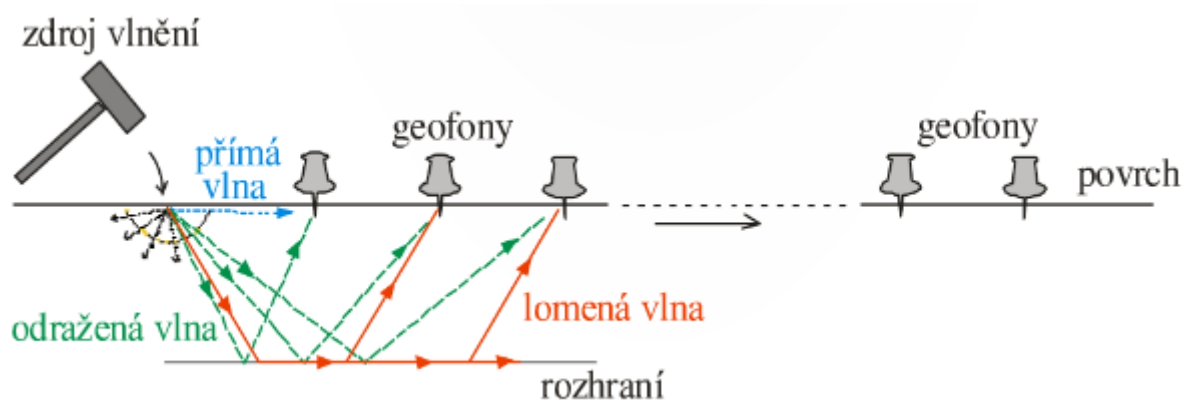


Obr. 3 – Radarový řez, metoda: georadar [6]

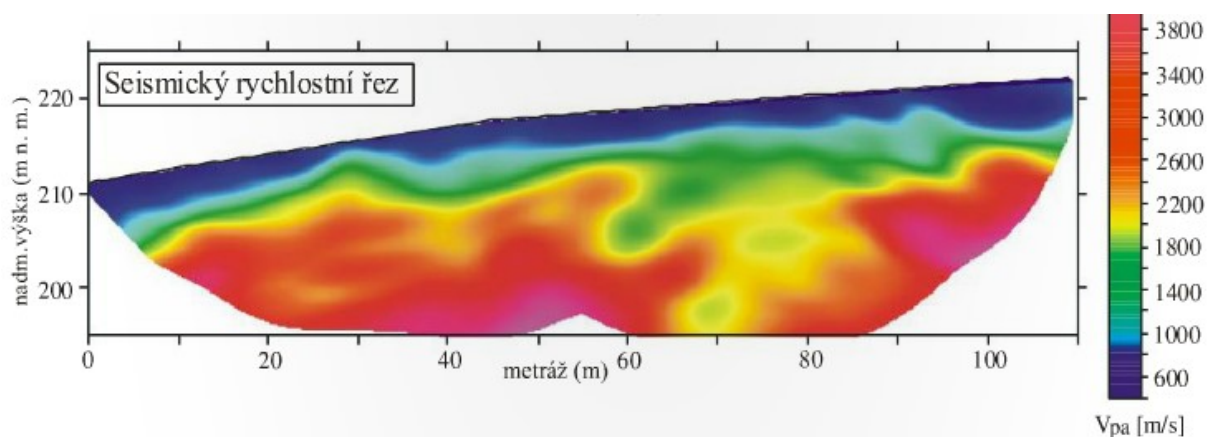
Seismické metody

Seismické metody jsou založeny na zjišťování, vzniku a šíření elastického vlnění zkoumaného prostředí. Měří se časy příchodu elastických vln, seismická a geoakustická aktivita. Typické seismické metody: metoda lomených vln – mělká refrakční seismika, metoda odražených vln – mělká reflexní seismika, metoda přímých vln – seismokarotáž, seismické prozařování mezi vrty.

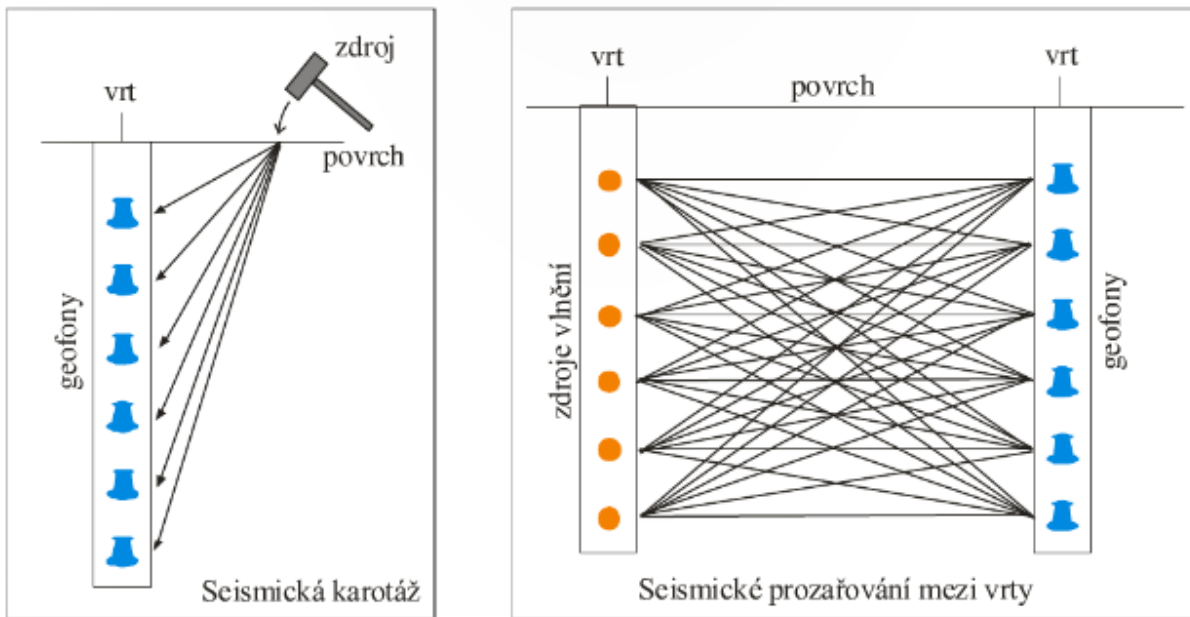
Pomocí těchto metod zjišťujeme horizontální hranice, oslabené části, dynamické parametry, přirozené klenby děl apod. V inženýrsko-geologickém průzkumu jedna z nejrozšířenějších a vhodných metod. [5], [6]



Obr. 4 – Obecný princip seismického měření [6]



Obr. 5 – Hlubkový řez mělké refrakční seismiky [6]



Obr. 6 – Princip měření v metodě přímých vln [6]

Geomagnetické metody

Geomagnetické metody jsou založeny na měření totálního vektoru magnetického pole Země, vertikální a horizontální složky a jejich inklinace, deklinace, gradientů, magnetické susceptibility a remanentní magnetizace.

Pomocí této metody zjišťujeme hranice jednotlivých druhů hornin, oslabené zóny, tektonické poruchy apod. [5]

Radiometrické metody

Radiometrické metody jsou založeny na měření primárního a sekundárního radioaktivního pole. Měření přirozené radioaktivity.

Těmito metodami zjišťujeme hranice jednotlivých typů hornin, tektonické poruchy, průsaky, proudění podzemní vody apod. [5], [6]

Termické metody

Termické metody jsou založeny na zjišťování přirozeného tepelného pole a jeho gradientu, tepelné vodivosti a tepelného toku.

Pomocí této metody zjišťujeme hranice jednotlivých typů hornin, tektonické poruchy, průsakové oblasti apod. [5]

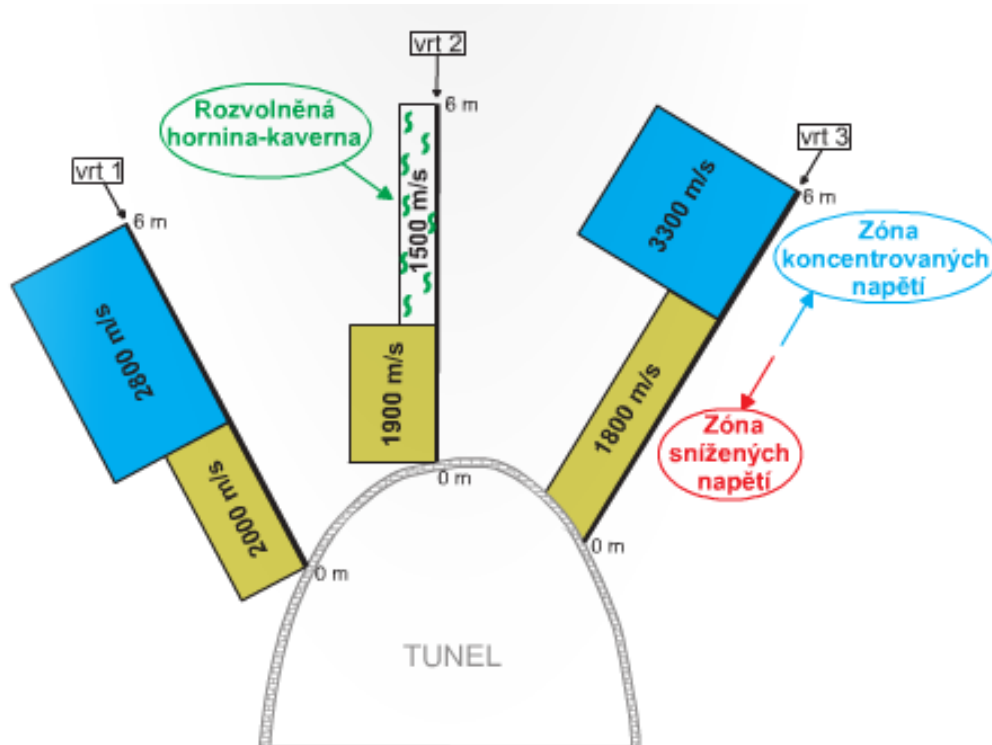
Gravimetrické metody

Gravimetrické metody jsou založeny na měření tíhového pole Země a objemové hmotnosti hornin.

Těmito metodami přispíváme k řešení geologické stavby zkoumaného území. Při inženýrsko-geologickém průzkumu vhodný pro specifické aplikace. [5], [6]

Karotážní metody

Karotážní metody aplikují předchozí uvedené metody na měření ve vrtech. Zpřesňují geologické profily vrtů. Zkoumají fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin, poruchové oblasti, teplotní hodnoty ve vrtech a filtrační vlastnosti hornin. Specifikují místa přítoku a odtoků vody z vrtů. [5]



Obr. 7 – Rychlostní profily podél vrtů, metoda: seismokarotáž ve vějíři vrtů [6]

2.1.4 Vrtný průzkum

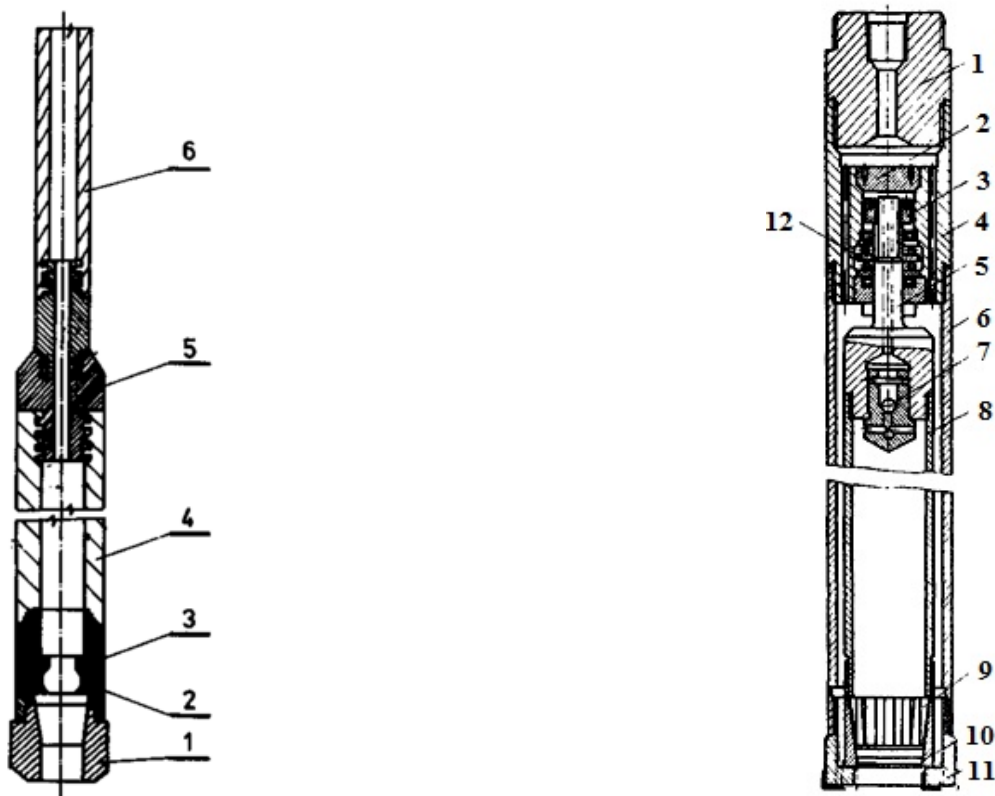
Vrtný průzkum je jednou z hlavních metod předběžného a podrobného průzkumu horninového prostředí pro stavbu tunelových děl. Na základě mocnosti nadloží budoucího díla se volí vrty horizontální, šikmé nebo vertikální. Průzkumné vrty by měly být vedeny pod dno budoucího díla. Počet a rozmístění průzkumných vrtů se volí dle rozmanitosti geologické stavby, do kritických oblastí a charakteristických míst kvazihomogenních celků horninového masivu.

Využívané metody vrtání: rotační jádrové vrtání, hloubení vrtákem, nepřímé oběhové vrtání, nárazové jádrové vrtání, nárazové vrtání, maloprůměrové vrtání beraněním, rotační úderové vrtání, rezonanční vrtání, úderové vrtání, pneumatické spojitě vrtání zarážením, drapákové vrtání

V rámci inženýrsko-geologického průzkumu je potřebné vybírat takové technologie vrtání, které nám jsou schopné umožnit bezpečnou identifikaci horninového materiálu, jeho vlastností, úložných poměrů a odběr všech požadujících typů vzorků. Pro každý typ hornin se volí optimální technika a technologie umožňující odběr jádra. [1], [2], [7]

Používané vrtání (jádrové):

- Jádrové na sucho – jádrování v měkkých, nezpevněných a nesoudržných horninách. Pro takový druh jádrování je základní sestavou jednoduchá jádrovnice opatřená na konci vrtnou korunkou se zuby osazenými tvrdokovovými roubíky. V případě procházení zvodněnými a nestabilními (svírající, zavalující) úseky horninového masivu je potřebné použití manipulačního pažení
- Jádrově s výplachem – jádrování v pevných, celistvých skalních horninách. Pro takový druh jádrování je základní sestavou jednoduchá případně násobná jádrovnice opatřená na konci tvrdokovovou nebo diamantovou vrtnou korunkou a trhačem jádra. Čirý vodní výplach se zjednodušeným oběhem či na ztrátu (ovlivněno délkou vrtu) je nejvíce užívaným.



Obr. 8 – Konstrukce jednoduchého a dvojitého jádrováku [8]

Popis jednoduchého jádrováku: 1 – vrtná korunka, 2 – pouzdro trhače jádra, 3 – trhač jádra, 4 – jádrovnice, 5 – spojník jádrováku, 6 – vrtné trubky

Popis dvojitého jádrováku: 1 – spojník, 2 – uzavírací matice, 3 – pojistná matice, 4 – hlava jádrováku, 5 – závěsný čep, 6 – vnější jádrovnice, 8 – vnitřní jádrovnice, 9 – prstencový trhač, 10 – pouzdro trhače jádra, 11 – vrtná korunka, 12 – axiální kuličkové ložisko

Jádrové průzkumné vrty nám primárně slouží k odebrání vrtného jádra pro laboratorní zkoušky. Zásadním požadavkem během jádrového vrtání je se co nejvíce přiblížit 100% výnosu horninového jádra. Ztrátám vrtného jádra se snažíme zamezit vhodnou technologií a postupem vrtání. V rámci vrtných prací se musí dbát na řádnou manipulaci a ukládání vrtného jádra do vzorkovnic a zabezpečit jeho ochrany před klimatem (degradace vrtného jádra rozmočením, vyschnutím, zmrznutím apod.). Sekundární využití jádrových vrtů spočívá v možnosti zkoušek přímo ve vrtech. Později lze také využít jako hydrogeologické, extenzometrické, inklinometrické apod.

Šnekové a náběrové vrtání používáme pouze tehdy, kdy jádrové vrtání nestačí procházet zastižené horninové prostředí.

K překonávání odolných nebo nezájmových poloh hornin (úseky nevýznamné pro účel průzkumu) používáme bezjádrové (plnoprofilové) vrtání. [1], [2]

2.1.5 Průzkumné štolý a šachty

Průzkumná štola má v inženýrsko-geologickém průzkumu své nezaměnitelné místo. Především v zastavěném území se složitými geologickými podmínkami a u tunelových děl ve velkých hloubkách. Nevýhodou této metody je navýšení ceny a doby realizace díla, částečná změna primární napjatosti. Průzkumná štola by měla mít ekonomický příčný průřez a splňovat bezpečnostní kritéria.

Při výstavbě tunelů v geologickém prostředí je průzkumná štola nejefektivnější průzkumnou metodou. Během realizace štoly i po jejím dokončení má mnohá využití. Štola neslouží pouze pro zmapování úložných prostorů, ale dají se v ní realizovat nejrůznější zkoušky, odběry vzorků a měření. Během ražby průzkumné štoly se ověřují vrtná schémata, spotřeba trhavin, způsob realizace a zajišťování výrubu, zpevňování, utěšňování horninového prostředí, napjatost v masivu a jeho okolí, působící faktory na výztuž a deformace. Pomocí naměřených dat konvergence výrubu, případné poklesové kotliny nad průzkumnou štolou je možné aplikovat data do matematických modelů a vyhodnocovat budoucí deformace.

Průzkumné šachty nemají široké uplatnění. Využívají se k detailnímu určení tloušťky pokryvných útvarů a zóny zvětrání. Hloubka šachty bývá v desítkách metrů. [1]

2.1.6 Laboratorní zkoušky

Laboratorní zkoušky přispívají k rozdělení horninového masivu na kvazihomogenní celky dle fyzikálních vlastností (objemová hmotnost, nasákavost, pórovitost, petrografie). Zkoušky se provádí i na porušených vzorcích, vzorcích z průzkumných štol a vrtů. Zjišťují mechanické vlastnosti z jednotlivých kvazihomogenních celků horninového masivu (modul deformace, modul pružnosti, pevnost v tlaku, smyková pevnost, soudržnost apod.). Dále technické vlastnosti horniny (vrtatelnost, obrusnost, mrazuvzdornost). Také je nutné prozkoumat objemové změny (bobtnání apod.) a chemické složení podzemních vod. [1]

V inženýrsko-geologickém průzkumu se uplatňuje mnoho laboratorních zkoušek: Stanovení objemové hmotnosti, Statická zatěžovací zkouška deskou, Stanovení vlhkosti zemin, Stanovení zrnitosti zemin, Krabicová smyková zkouška, Proctorova zkouška, Stanovení stlačitelnosti zemin v oedometru, Stanovení propustnosti zemin a další.

Vzorky zemin pro laboratorní zkoušky se řadí do pěti kvalitativních tříd s ohledem na parametry zeminy, u kterých se předpokládá jejich neměnnost během odběru vzorku a manipulace s ním, včetně dopravy a skladování. Tabulka dle ČSN EN 1997 – 2 . [1], [2]

Vlastnosti zeminy/třída kvality	1.	2.	3.	4.	5.
Vlastnosti zeminy zachované beze změny					
zrnitost	*	*	*	*	
vlhkost	*	*	*		
ulehlost, relativní hutnost, propustnost	*	*			
stlačitelnost, smyková pevnost	*				
Vlastnosti, které mohou být stanoveny					
vrstevní sled	*	*	*	*	*
hranice vrstvy – hrubé	*	*	*	*	
hranice vrstvy – jemné	*	*			
Atterbergovy meze, zdánlivá hustota částic, obsah organických látek	*	*	*	*	
vlhkost	*	*	*		
ulehlost, relativní hutnost, pórovitost, propustnost	*	*			
stlačitelnost, smyková pevnost	*				
Kategorie vzorkování podle EN ISO 22475-1	A				
	B				
				C	

Tab. 1 – Třídy kvality vzorků zemin pro laboratorní zkoušky a použité kategorie odběru [2]
Kategorie vzorku: A – vzorek neporušený, B – vzorek porušený, C – vzorek porušený nevyhovující pro inženýrsko-geologický průzkum

Součástí inženýrsko-geologického průzkumu jsou protokoly o všech provedených zkouškách v tabulkové a grafické formě. Výsledky laboratorních zkoušek hornin a zemin jsou součástí zprávy inženýrsko-geologického průzkumu při využívání nově provedených laboratorních zkoušek.

2.1.7 Terénní zkoušky a měření

Terénní zkoušky patří mezi nejvýznamnější, mají vypovídající schopnost o skutečných vlastnostech horninového prostředí. Zkoušky a měření zprostředkovávají žádoucí množství údajů o fyzikálně-mechanických a dalších specifických vlastnostech zemin, hornin a vody v daných reálných podmínkách.

Zkoušky lze rozdělit: -jednoduché
-velkorozměrové
-měření přímo na horninovém masivu nebo vrtech

Jednoduché zkoušky

Jednoduché (indexové) zkoušky jsou realizovatelné ve velkém počtu přímo na líci výrubu, za pomoci přenosných zařízení na stavbě (zkouška pevnosti horniny odrazovým kladívkem, zkouška bodové pevnosti na vrtných jádrech a úlomcích horniny, mikroseismické měření).

Velkorozměrové zkoušky

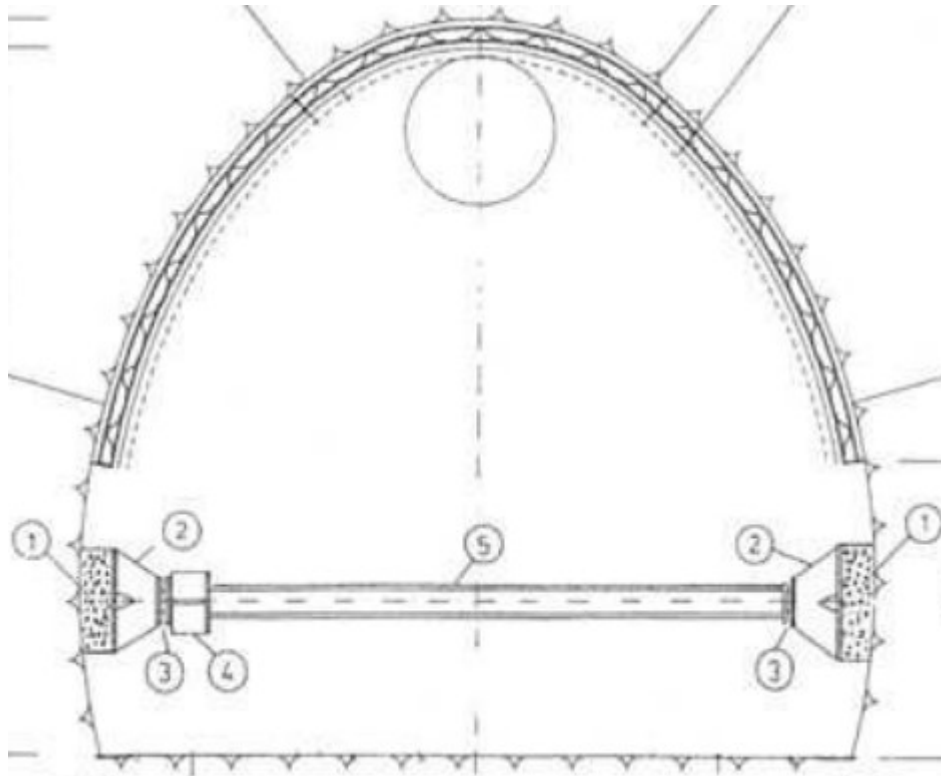
Zjišťujeme mechanické vlastnosti na částečně uvolněných blocích horniny (zkouška pevnosti v prostém a triaxiálním tlaku, zkouška pevnosti ve střihu, případně pevnosti v tahu).

Měření přímo na horninovém masivu nebo ve vrtech

- Měření modulu pružnosti a přetvárnosti prostřednictvím: líc výrubu – zatěžovací desky, zářezy – ploché lisy, vrty – presiometrické, dilatometrické nebo hydraulicky rozpínatelné měřicí buňky
- Určování napjatosti v horninovém masivu: uvolňování vrtného jádra, odlehčovací vrty, vrubové sondy, hydrofracturing
- Měření tlaků horniny na výztuž výrubu: radiální a tangenciální napětí v primárním ostění
- Geodetické měření konvergence výrubu
- Měření deformace horninového prostředí oblasti výrubu: extenzometry, deformetry
- Měření sedání povrchu nad raženým tunelovým dílem: metoda přesné nivelace
- Měření svahových pohybů příportálových úseků: inklinometry, geodeticky
- Technologické zkoušky: vrtatelnost, rozpojitelnost, trhatelnost, únosnost kotev, nárůst pevnosti v čase apod.

- Hydrogeologické zkoušky a pozorování: čerpací, stoupací a nálevové zkoušky, režimní pozorování, chemismus podzemních vod apod.
- Sledování životního prostředí v okolí

[1], [5]



Obr. 9 – Schéma soustavy rozpěrné zatěžovací zkoušky deskou [9]

1 – vysokopevnostní rychletvrdnoucí beton, 2 – ocelová zatěžovací deska, 3 – kulový kloub,
4 – hydraulický lis, 5 – reakční nosník

2.1.8 Geotechnický monitoring

Geotechnický monitoring se provádí v součinnosti provádění ostatních metod inženýrsko-geologického průzkumu. Pomocí geotechnického monitoringu kontrolujeme a dohlížíme na podzemní stavbu v horninovém masivu. Monitoring provádíme z povrchu, tak i přímo z průzkumné štoly. Během realizace průzkumné štoly dochází k narušení primárního stavu napětí a následné koncentraci násobků primární napjatosti za výrubem. Změna napjatosti způsobuje deformační posuny. Vznikají oblasti plastického přetváření a poruch zapříčiňující nárůst tlaků působící na výztuž díla. Během ražby je také kladen důraz

na sledování povrchových pohybů (poklesové kotliny, sedání, trhliny, narušení režimu podzemní vody). [10]

Monitoring z průzkumné štoly

- Vlastní inženýrsko-geologický průzkum a dokumentace
- Konvergenční měření ve štole
- Geodetické měření
- Měření napětí na kontaktu výztuže a horniny
- Měření pevnosti stříkaného betonu
- Měření únosnosti svorníků
- Extenzometrická a inklinometrická měření
- Měření deformací na povrchu
- Monitoring podzemní vody
- Monitoring přetvoření před čelbou

2.1.9 Matematické modelování

Matematický model je virtuální, popsaný matematickými vztahy. Jejich výhodou je poměrně rychlé provedení, efektivní provádění parametrických analýz a velké množství softwarů. Nevýhodou je lidský faktor, nesprávně zadané vstupní hodnoty a interpretace výsledků způsobují nepravdivé závěry.

Požadovanými výstupy modelů bývají různé výsledky, posudky a vyhodnocení například napětí v horninovém masivu a ve výztuži, zatížení konstrukce, různé deformace, posuny apod. [11]

Používané metody modelování

- Metoda konečných prvků
- Metoda hraničních prvků
- Metoda konečných diferencí
- Metoda oddělených elementů

Nejrozšířenější metodou modelování v geotechnice je metoda konečných prvků, která je jedna z nejefektivnějších a využívá jí mnoho softwarových programů, například PLAXIS 2D, PLAXIS 3D, MIDAS GTS, GEO5 MKP, ANSYS a další.

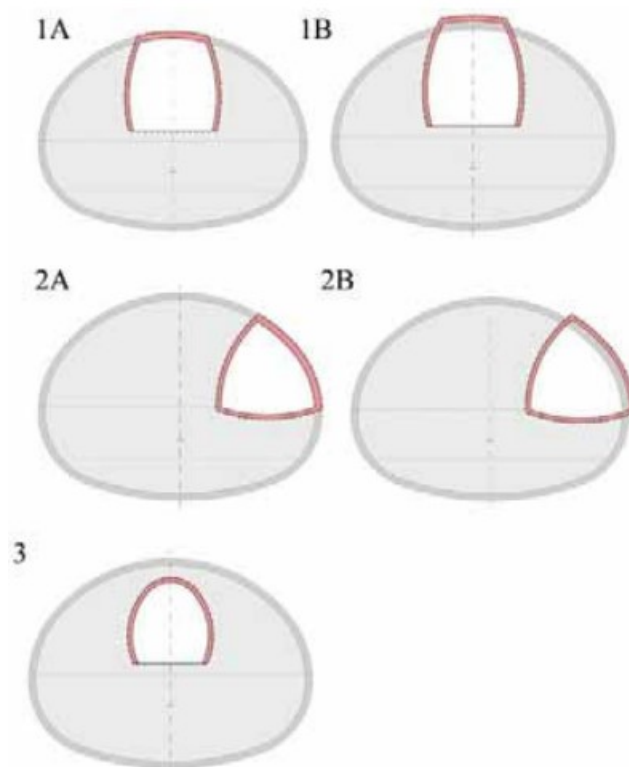
2.2 Účel a přínos průzkumných štol

Průzkumná štola je horizontální nebo mírně ukloněné liniové podzemní dílo o stálém nebo proměnném příčném profilu. Optimální umístění, příčný průřez a potřebná délka štoly ovlivňují i nepříznivé faktory, což jsou navýšení ceny díla a časová náročnost. Průzkumná štola se zpravidla razí v příportálových úsecích nebo ze šachet do oblastí s komplikovanými geologickými poměry.

2.2.1 Účel průzkumných štol

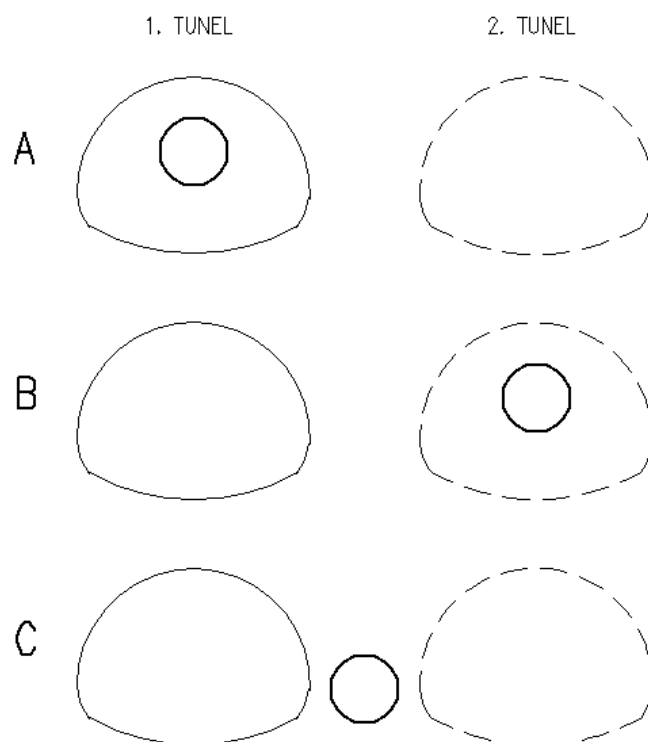
- Zmapování ploch nespojitosti (hustota, charakter, sklon, orientace, k ose raženého díla), mocnosti, charakteru poruchových zón a dislokací
- Upřesnění trasy a situování podzemního díla
- Odběr vzorků pro laboratorní zkoušky
- Provedení indexových zkoušek in-situ
- Klasifikace prostředí
- Měření směru, velikosti a časových průběhů konvergence výrubu, mocnost rozvolněných zón a tvar horninové klenby
- Identifikace místa, množství charakteru a chemického složení přítoků podzemních vod
- Ověření a optimalizování volby technologie ražby pro budoucí tunelové dílo
- Geotechnický monitoring z průzkumné štoly
- Realizace bezpečnostních opatření před samotnou ražbou tunelového díla
- Odvodnění horninového masivu, následné zlepšení pracovních podmínek pro ražbu tunelového díla
- Zmenšení kubatury tunelu a spotřeby trhavin
- Možné využití průzkumné štoly

[1]



Obr. 10 – Umístění a tvary průzkumných štol a jejich příklady (1 – SOKP 513, SOKP 514, 2 – Královopolský Brno, 3 – Mrázovka, Královská obora, Prackovice) [12]

Z hlediska umístění byly v uváděných případech průzkumné štoly realizovány v následujících polohách a tvarech (obr. 10): 1 – Štola soudkovitého tvaru v ose kaloty – s nenadvýšeným (1A) či nadvýšeným (1B) stropem. 2 – Štola trojúhelníkového tvaru v oblasti opěrového (bočního) tunelu – s nenadvýšeným (2A) či nadvýšeným (2B) stropem. 3 – Štola podkovovitého tvaru v oblasti kaloty (s nadvýšeným či nenadvýšeným stropem). [12]



Obr. 11 – Umístění průzkumné štoly vzhledem k tunelovým profilům [13]

Případ A: Štola uvnitř tunelu – snížení kubatury budoucího tunelu, ražba 1. tunelu až po dokončení ražby štoly

Příklad B: Štola umístěná mimo 1. tunel, paralelně sním – ražba 1. tunelu s menším zpožděním za ražbou šachty, štola lze využívat během ražby jako provozní, únikovou, k větrání, odvodnění a vedení sítí

Příklad C: Štola umístěná mimo tunel – urychlení výstavby, jako přístupová štola, případně trvalé využívání pro technologie jako trvalá složka stavby

2.2.2 Přínos průzkumných štol

Jednoznačný přínos průzkumných štol nastává v okamžiku, kdy není možné aplikovat jinou metodu inženýrsko-geologického průzkumu na to, abychom získali patřičně vypovídající poznatky pro budoucí ražbu podzemního díla. To nastává v případech, kdy budoucí tunelové dílo se nachází ve velkých hloubkách a jiné metody například vrtný průzkum by byl technologicky velmi náročný a neefektivní. Dále v zastavěných územích má své opodstatněné místo. Realizace průzkumné štoly je nutná v případech složitých geologických a hydrogeologických poměrech s nepřístupným terénem.

Přínos průzkumných štol spočívá v přesných, spolehlivých dat a výsledků, které jinou metodou nelze získat. Takové přesné hodnoty získáváme díky realizaci inženýrsko-geologických metod přímo z míst budoucího tunelového díla díky průzkumné štoli. Dalším přínosem je bezpečnost ražby a předcházení budoucím havarijním stavům, zřízení staveniště, dopravy a techniky.

2.3 Specifika inženýrsko-geologického průzkumu pro tunelové stavby

Informace získané z průzkumu mají napomoci rozhodování o optimálním umístění tunelového díla v horninovém masivu zohledňující technologii ražení i prostorové vedení komunikace. Tunelová roura a horninové prostředí vytvářejí společně jeden celek statického systému, v kterém se rozložení napětí a přetváření vzájemně ovlivňují. Cílem návrhu je, aby interakce výztuže a horninového prostředí byla co nejefektivnější a splňovala provozní a bezpečnostní kritéria. V tomto důsledku je nutné, abychom za pomoci průzkumu zjistili mechanicko-fyzikální a technologické vlastnosti horninového prostředí co možná nejpodrobněji, jako v případě parametrů konstrukcí stavby. Znalost litologie, stanovení báze kvartéru, stupeň a hloubku zvětrání horninového prostředí, lokalizace tektonických nebo poruchových pásem, intenzita rozpukání, směr a sklon puklin. Pro zpracování analýzy geotechnických rizik spojených s ražbou, výstavbou a provozem budoucího tunelu je nutné znát celkové geologické, hydrogeologické a geomorfologické poměry horninového prostředí. Za pomoci vyhodnocení geotechnických rizik se optimalizuje směrové i výškové vedení trasy tunelu, umístění portálů, vhodná technologie ražby, vystrojování a provádění ostění.

Účelem průzkumu pro velké tunelové stavby je především zjištění informací pro optimalizování a výškové vedení trasy tunelu a umístění jeho portálů. Určení optimální technologie ražby a realizace tunelu, dočasné výstroje i zabudovaného ostění. [14]

2.4 Zkušenosti z ČR

Průzkumné štoly jsou u nás poměrně často využívány jako nástroj inženýrsko-geologického průzkumu pro budoucí tunelová díla.

Silniční tunely Road tunnels	Zahájení ražby Excavation commencement	Dokončení ražby Excavation completion	Délka ražeb (m) Excavation length (m)	Průzkumná štola Exploratory gallery	Havárie při ražbě Excavation incidents
Hřebeč	1995	1996	275	ano / yes	ano / yes
Pisárecký	1995	1997	600	ne / no	ne / no
Mrázovka	1999	2002	2 200	ano / yes	ne / no
Valík	2004	2005	660	ano / yes	ne / no
Panenská	2003	2005	4 000	ano / yes	ne / no
Libouheč	2005	2006	900	ne / no	ne / no
Klímkovice	2004	2006	1 740	ne / no	ne / no
SOKP 514	2006	2008	2 550	ano / yes	ne / no
SOKP 513	2006	2008	3 350	ano / yes	ne / no
Prackovice	2008	2009	300	ano / yes	ne / no
Královopolské	2006	2010	2 100	ano / yes	ne / no
Radejčín	2009	2010	1 150	ne / no	ne / no
Královská obora (Blanka, Špelc)	2007	2010	4 400	ano / yes	ano / yes
Brusnice (Blanka, Mypra)	2009	2011	1 100	ne / no	ano / yes

Obr. 12 – Přehled silničních tunelů v ČR a využívání průzkumných štol [15]

2.4.1 Průzkumná štola MO Špejchar – Pelc – Tyrolka (Tunel Blanka)

Průzkumná štola délky 1940 m, příčný průřez v rozmezí od 10,5 m² do 22 m². Nadloží 15 až 20 m.

Raženo pomocí technologie NRTM, rozpojování hornin trhacími pracemi a odtěžení pomocí kolejové dopravy. Průzkumná štola umístěná excentricky ve vrcholu kaloty budoucího tunelu. Štola byla vedena převážně v jižní tunelové trubě.



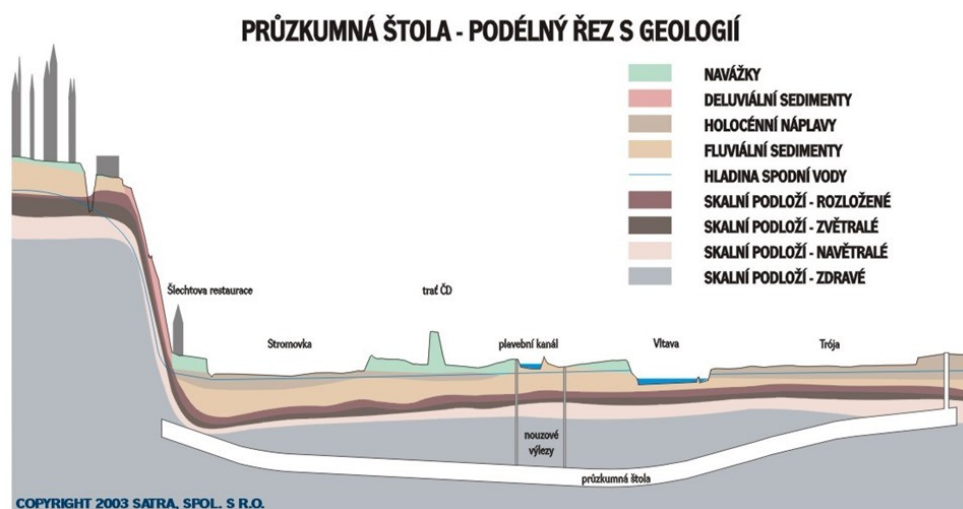
Obr. 13 – Pohled průzkumné štoly MO Špejchar – Pelc – Tyrolka [17]

Průzkumná štola v trase budoucích tunelů umožnila:

- Realizaci podrobného průzkumu v zájmových kritických úsecích trasy pod Vltavou a Královskou oborou, tj. v místech podcházení tunelu v silně zvodnělých pokryvných útvarech s minimálním skalním nadložím, které pod patou letenského svahu dosahuje mocnosti pouhých dvou metrů.
- Specifikaci rozsahu tektonických poruch
- Stanovení průběhu křemenců a rozsah použití trhacích prací
- Stanovení parametrů pro návrh ostění tunelu a sanování horninového prostředí
- Identifikaci míst s nadměrnými přítoky do výrubu
- Provedení sanačních injektáží v poruchových místech a místech velkého přítoku vody
- Navýšení stability čelby výrubu tunelů
- Zjištění a ověření dopadu ražby na okolí

Během provádění průzkumné štoly se klade důraz na deformace terénu a primárního ostění. V tomto případě byly stanoveny projektantem maximální deformace terénu 20 mm a konvergence primárního ostění 25 mm. Během ražby štoly byly naměřeny maximální deformace terénu 3 mm a 15 mm u deformací primárního ostění. Dynamické a akustické účinky byly též v normě.

Prováděná průzkumná štola poskytla potřebné informace o pevnosti a přetvárných vlastnostech horninového prostředí, přítomnosti podzemních vod, možnosti sanací. Většina informací poskytnutá štolou je nezbytná pro následnou bezpečnou, ekonomickou a technologickou realizaci tunelového díla. [16]

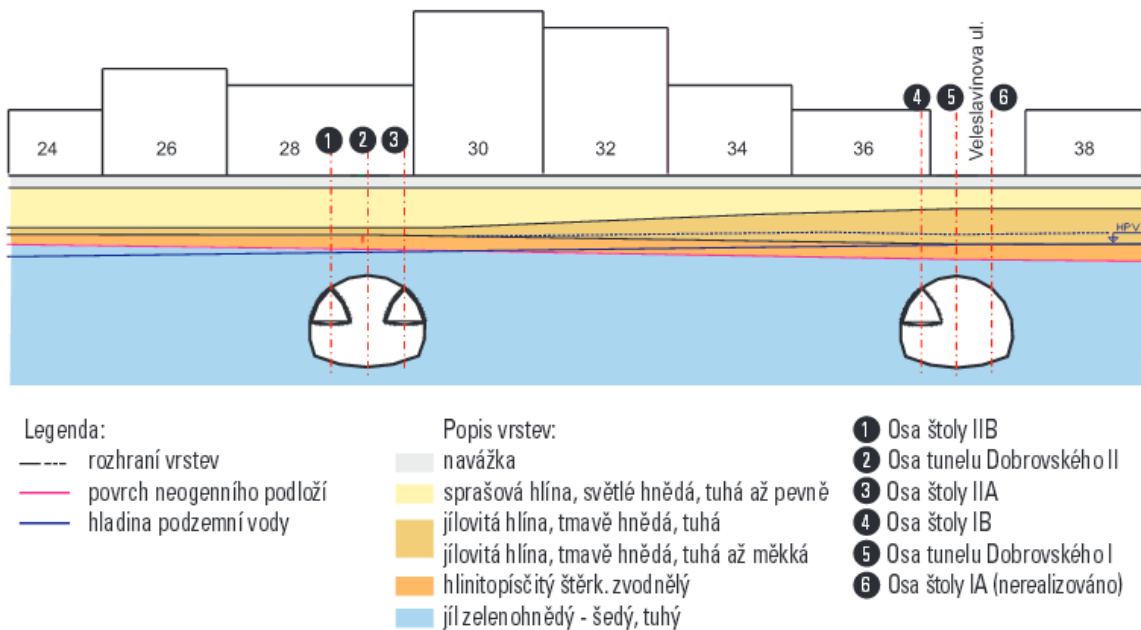


Obr. 14 – Podélný řez průzkumné štoly MO Špejchar – Pelc – Tyrolka [17]

2.4.2 Průzkumné štoly tunelu Dobrovského

Štoly využity jako konstrukční součásti výstavby tunelů. Raženy celkem 3 štoly technologií o různých délkách. IB o délce 365 m (Metrostav, a.s.), IIB o délce 831 m (ŽS Brno, a.s.) a IIA délky 831 (Subterra, a.s.). Průřez štoly v rozmezí 13 m² až 14 m².

Ražba štol realizována technologií strojního ražení NRTM, v počátečních fázích s mikropilotovými dešťníky. Ostění štol SB20 s KARI sítí a s tuhou výztuží K24.



Obr. 15 – Geologický příčný řez: staničení km 1,38 tunelu Dobrovského [15]

Průzkumné štoly měly za úkol zjistit geotechnické parametry horninového prostředí v trase tunelů, ověřit technologii ražení a zjistit vlivy na městskou zástavbu. Pomocí průzkumu zjištěna značná tektonická postižení jílu, v některých částech o mocnosti desítek metrů s hrubě blokovitým rozpadem. Stálý přítok vody v některých částech komplikoval realizaci a stabilitu stropu a čelby. Během ražby docházelo k neočekávanému sedání nad štolami, které způsobovaly následné deformace na povrchu. Proto byla nutná opatření: eliminace vzájemného ovlivňování od ražeb štol IIA a IIB, prodloužení vzdálenosti čelb od sebe. Odstraňování rozměklých a porušených vrstev jílu ze dna štoly před pokládáním TH výztuže. Založení ráků na roznášecí patky k omezení sedání ráků. Dvojnásobné zhuštění vzdálenosti ráků TH (oproti Projektové dokumentaci). [15]



Obr. 16 – Pohled průzkumné štoly Dobrovského [15]

2.5 Zkušenosti ze zahraničí

2.5.1 Průzkumná štola Višňové

Průzkumná štola v celé délce budoucího tunelu 7480 m. Štola ražena z obou portálů plánovaného dálničního tunelu. Ze západní strany se štola podkovitého tvaru razila technologií NRTM. Plocha výrubu se pohybovala mezi $11,6 \text{ m}^2$ a $12,9 \text{ m}^2$. NRTM technologií vyražena štola o délce 3118 m ve sklonu 2,27 %. Z východního portálu ražba realizována plnoprofilovým razícím strojem (TBM) s průměrem výrubu 3,5 m o ploše $9,6 \text{ m}^2$. TBM technologií vyražena štola délky 4362 m.

Během ražby byl největším problémem výskyt podzemní vody. Přítok dosahující až 154 l/s byl v úseku raženém úpadně NRTM. V trase štoly vybudovány jímky (celkem 7) s výkonnými čerpadly, využívané jako přečerpávací stanice. V případě krátkodobé výluky (desítky minut) dodávky elektrické energie znamenala zatopení čelby i strojního zařízení. Při ražbě dovrčně TBM z východního portálu způsobovala komplikace také voda. Přítoky na čelbě činily 120 l/s a v celé části štoly dokonce 420 l/s. Další komplikací byly poruchové zóny v pásmu vyvřelých hornin. Zdegenerovaná hornina se při výskytu vody měnila na měkkou hmotu. Také byly obtížné sanační práce před strojem, způsobené malým průměrem hlavy stroje a přístupem před řeznou hlavu. [18]



Obr. 17 – Řezná hlava TBM a výrony vody na průzkumné štolé Višňové [18]

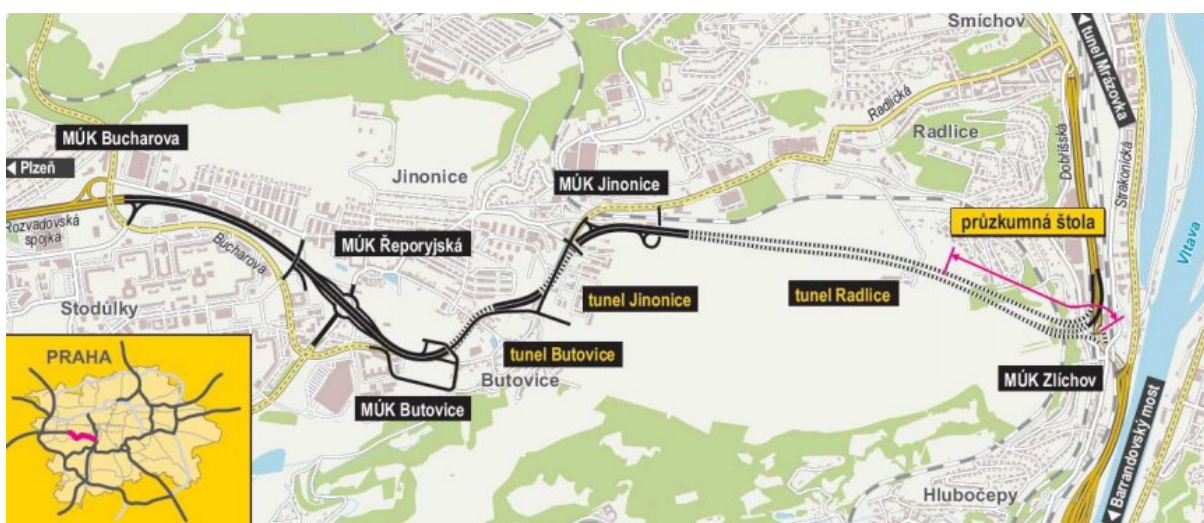
Pomocí průzkumné štoly bylo prostředí klasifikované jako heterogenní. Prostředí obsahovalo pestrou litologickou stavbu, mineralogické složení hornin, tektonické procesy

Průzkumná štola ověřila rizika:

- Ztráta stability výrubu v čelbě a stěnách uvolňováním úlomků, bloků, nadvýlomu
- Ztráta stability v kalotě čelby, respektive z předpolí se vznikem nadvýlomu případně závalu
- Nestabilita hornin a zemin jako produktu tektonického porušení při změně vlhkosti a na styku s vodou
- Vývoj, růst deformací výrubu, svírání stěn podzemního díla v kataklasticky porušených zónách sesuvem porušeného paleogénu, mezozoika, kontaktních zón mezi tektonickými jednotkami. Naměřené maximální deformace v zóně karbonatických jílu s celkovou konvergencí v horizontálním směru do 385 mm. Úsek byl sanovaný kompletním přebudováním v etapě výstavby únikové štoly.
- Soustředěné a rozptýlené přítoky, v některých případech přívaly podzemní vody
- Čerpání vody
- Chemismus podzemních vod a jejich agresivita
- Změny hydrogeologického režimu pramenů
- Riziko znečištění podzemních vod [19]

3. SITUACE PŘI PROVÁDĚNÍ INŽENÝRSKO-GEOLOGICKÉHO PRŮZKUMU PRO PRŮZKUMNOU ŠTOLU RADLICKÁ

Radlická radiála v budoucnu propojí vnější a vnitřní městský okruh Prahy. Celková délka stavby je 5,5 km, z nichž více jak polovina vede tunely. Na trase radiály se vyskytují celkem 3 silniční tunely. Ražený tunel Radlický o délce 2220 m, dále hloubené tunely Jinonice a Butovice o stejné délce 220 m. Budoucí Radlické tunely budou tvořeny dvěma tunelovými tubusy, severním a jižním o celkové délce 4089 metrů ražené části a 616 metrů hloubené části. [20], [21]



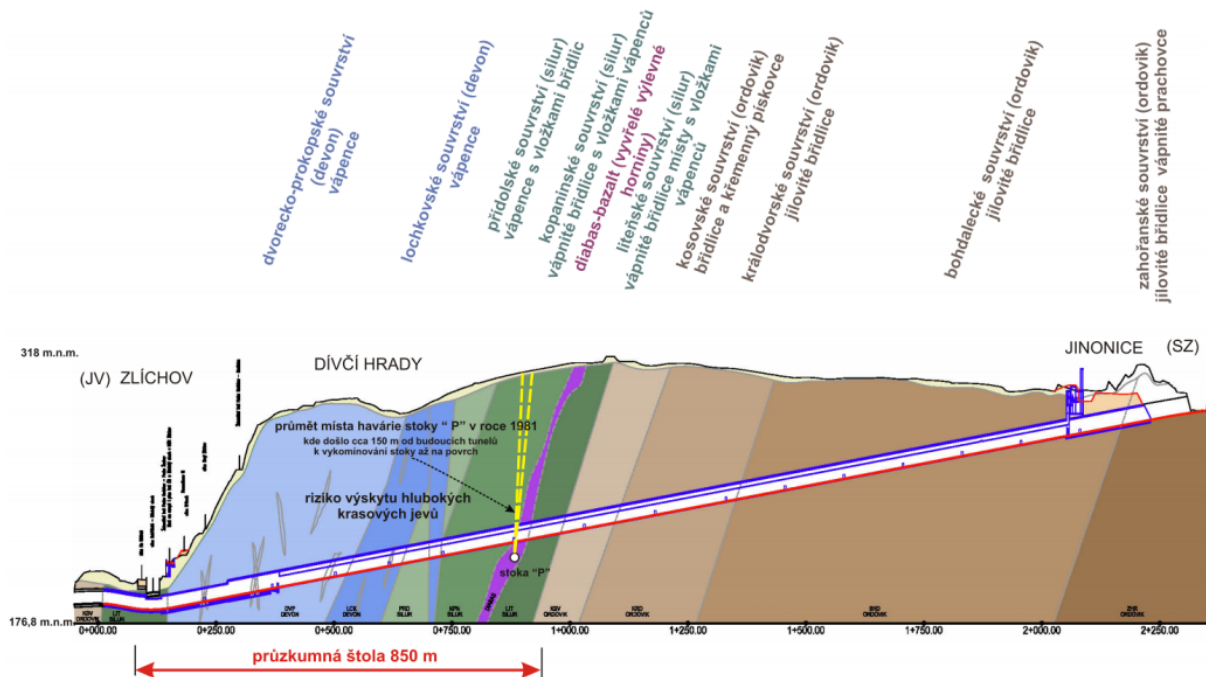
Obr. 18 – Situace trasy Radlické radiály s vyznačením tunelových úseků [20]

3.1 Inženýrsko-geologické a hydrogeologické poměry

Geologické poměry znázorněny na Obr. 18. Zájmová oblast budoucího tunelu se nachází v horninách paleozoického stáří. Od západu hornina ordovické, dále pak silurské a na východě hornina devonské. Subhorizontálně uložené reliktů křídových sedimentů modelující celou náhorní plošinu se vyskytují na horninách paleozoika. Kvartérně pokryvné útvary tvoří v prostorách plošin Dívčích hradů eolické a deluviální sedimenty. Fluviální terasové sedimenty a navážky jsou v údolí Vltavy.

Hydrogeologické poměry v dané lokalitě závisí na geologické stavbě a vlastnostech prostředí, množství srážek, dále také přítoku podzemní vody z reliktů křídových sedimentů do horninového prostředí Radlického tunelu. V našem zájmovém území se vyskytují dva

typy podzemní vody. Podzemní voda horninového prostředí s průlinovou propustností a podzemní voda v prostředí s puklinovou propustností. Což značí poměrně komplikované poměry. [20], [21]

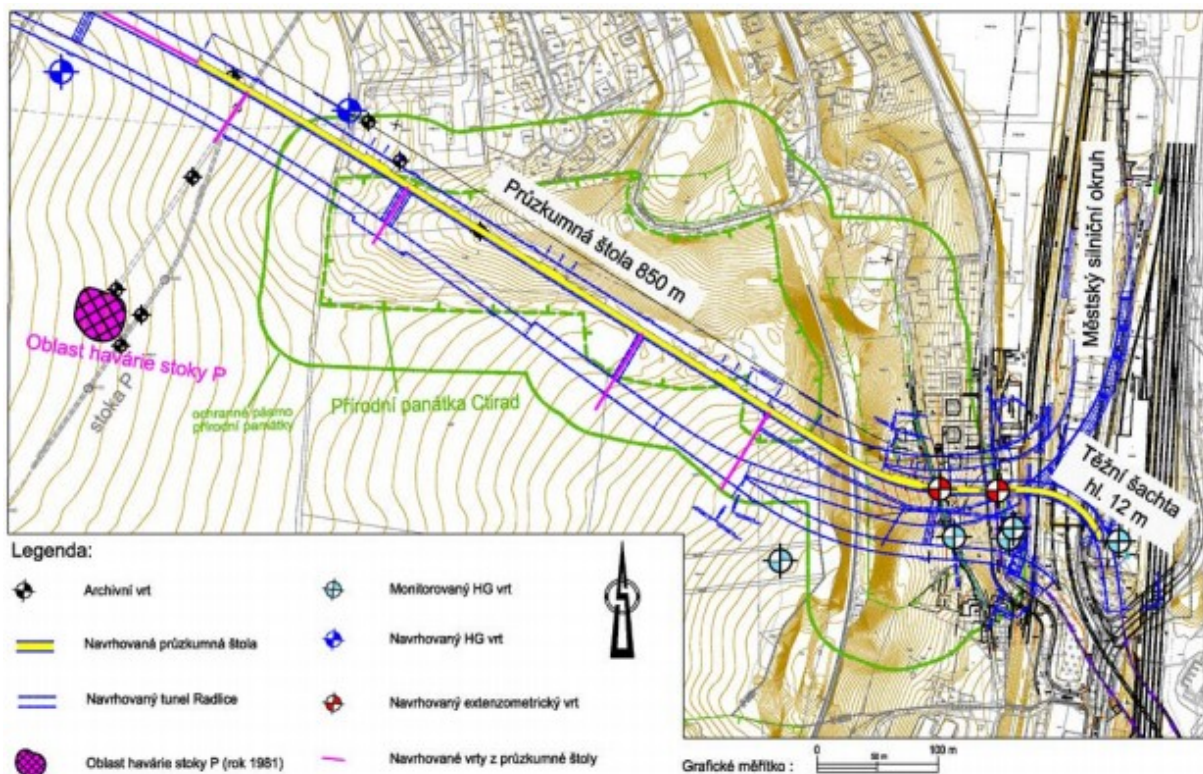


Obr. 19 – Podélný geologický řez tunelem Radlice s vyznačeným úsekem průzkumné štoly [20]

V minulosti v zájmové oblasti došlo k havárii při ražbě kanalizační stoky „P“ v úseku Hlubočepy – Radlice, také se objevily výrazné a velmi hluboké vertikální krasové porušení devonských a silurských hornin s převahou vápenců. Krasové jevy o hloubce 120 m a mocnosti dosahující 30 m jsou vyplněné křídovými zvětralinami charakteru zvodnělých zemin. Reálným rizikem pro ražbu je nafárání těchto krasových jevů s výplní zvodněných nesoudržných zemin. Stoka „P“ se nachází více jak 100 m pod povrchem a kolmo mimoúrovňově kříží trasu navrženého tunelu Radlický ve vzdálenosti okolo 800 m od přístupové šachty průzkumné štoly. V roce 1981 po odpalu došlo k proražení štoly do výrazné krasové dutiny vyplněné zvodnělým pískem. Vyvalilo se kolem 800 až 1000 m³ silně zvodněných hlinitých a jílovitých jemnozrnných písků s vločkami písčitých jílu. Díky průvalu došlo k vytvoření kaverny. Nafáráním krasových jevů je reálné riziko pro ražbu tunelu. I z tohoto důvodu návrh realizace štoly. [20], [21]

3.2 Průzkumná štola

- Celková délka: 850 m
- Maximální podélný sklon: 6.56 %
- Plocha příčného průřezu: 13,46 m², výhybna 23,35 m²
- Maximální šířka výrubu: 4225 mm, výhybna 6550 mm
- Maximální výška výrubu: 4335 mm, výhybna 4300 mm
- Technologie realizace: NRTM
- Způsob rozpojování: trhací práce
- Způsob dopravy: kolová



Obr. 20 – Situace navrhované průzkumné štoly tunelu Radlice [20]

Přístup do průzkumné štoly je z těžní šachty hloubky 12 m. Šachta je zajištěna po obvodu záporovým pažením z ocelových profilů I 220, stříkaným betonem tloušťky 100 mm se sítěmi a ocelovými svorníky ve spodní části. V trase šachty předpoklad 5 technologických tříd. Pro jejich určení během realizace využití klasifikace QTS. V trase štoly navrženy výhybny délek 22 m po vzdálenostech kolem 150 m. Realizace díla má nepatrný dopad na povrch, maximální očekávané deformace na povrchu do 10 mm. [20], [21]



Obr. 21 – Pohled do těžní šachty [foto: T.Pospíšil 2016]

V rámci podrobného inženýrsko-geologického průzkumu prováděného pomocí průzkumné štoly části tunelu Radlice proběhne komplexní soubor průzkumných prací a měření. Mezi průzkumné práce patří detailní průběžná geotechnická a geologická dokumentace průzkumné štoly, dokumentace geologických vrtů realizovaných z povrchu i ze štoly, presiometrické zkoušky a zatěžovací zkoušky deskou, hydrogeologické sledování, laboratorní zkoušky mechaniky skalních hornin a zemin, včetně zkoušek technologických vlastností. Dále korozní průzkum a různá geofyzikální měření z povrchu i ze štoly.



Obr. 22 – Pohled průzkumnou štolou [22]

3.2.1 Průzkumné práce a měření před ražbou průzkumné štoly

Prováděné hydrogeologické sledování hladiny podzemní vody na vybudované síti monitorovacích hydrogeologických vrtů. Rozšíření sítě monitorovacích vrtů zejména u konce průzkumné štoly. Pasportizace studní a pramenů. Provedení souboru geofyzikálních měření z povrchu podél plánované trasy průzkumné štoly. Geofyzikální měření prováděno seismickými, geoelektrickými, gravimetrickými a georadarovými metodami. Cílem realizace prováděných úkonů před ražbou štoly je lokalizování průběhů poruchových zón a indikaci krasových jevů. Vyhodnocení geofyzikálních měření nám umožňuje stanovit potenciální rizikové úseky, nestability výrubu z nafárání zvodnělých či nezvodnělých poruchových pásem a krasových kaveren ještě před započítím realizace štoly. [21]

3.2.2 Průzkumné práce a měření v průběhu ražby průzkumné štoly

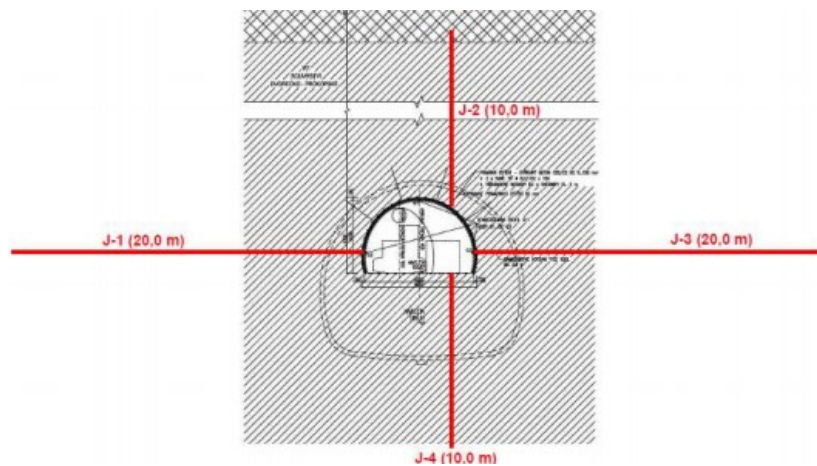
V rámci podrobného inženýrsko-geologického průzkumu pomocí průzkumné štoly se provádí geotechnické a geologické sledování nezajištěného výrubu průzkumné štoly. Provádí se každý záběr velice podrobně s následným využitím interpretace geologických poměrů pro Radlický tunel. Dále jako podklad pro zařídění horninového masivu do geotechnických klasifikací QTS, RMR a GSI. Realizována strukturní kinematická analýza nezajištěného horninového masivu. Operativní vyhodnocování bezpečnostních jádrových předvrtů délky 20 m v místech s předpokladem rizik pro ražbu štoly. Dále provádění radiálních presiometrických vějířů, u kterých se ve vrtech provedou presiometrická měření za účelem získání přetvárných vlastností horninového masivu. Následné využití vrtů pro geofyzikální měření. Během ražby štoly se intenzivněji měří hladiny podzemní vody v monitorovaných vrtech, také přítok do čela výrubu i celkový přítok ze štoly. [21]



Obr. 23 – Přítok podzemní vody z krasové pukliny v lochkovském souvrství [21]

3.2.3 Průzkumné práce a měření po vyražení průzkumné štoly

Po dokončení ražby v celé délce štoly budou provedeny průzkumné vrty do oblasti jižního tubusu. Jejich poloha bude zadána na základě vyhodnocených geologických podmínek zastižených průzkumnou štolou. Průzkumné vrty budou geologicky popsány, provedou se geotechnické zkoušky a geofyzikální měření uvnitř vrtu. Na konci štoly bude vyvrtán průzkumný subhorizontální vrt ve směru ražby budoucího tunelu délky 70 m. Po vyražení štoly budou také prováděny rozpěrné zatěžovací zkoušky deskou a další geofyzikální měření. Dále měření hladin podzemní vody i celkového přítoku ze štoly. [21]

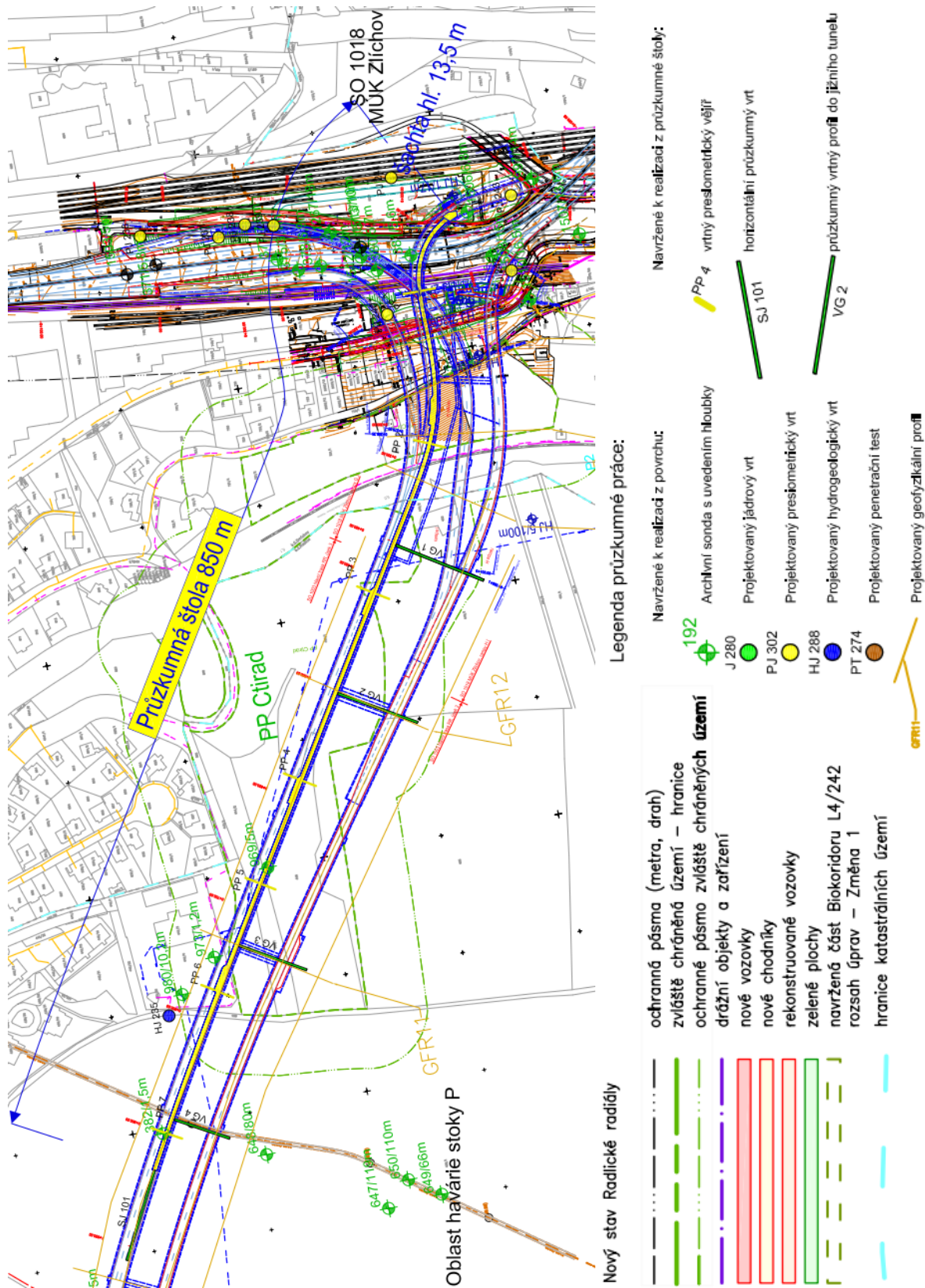


Obr. 24 – Presiometrický vějíř ve výhybně [21]

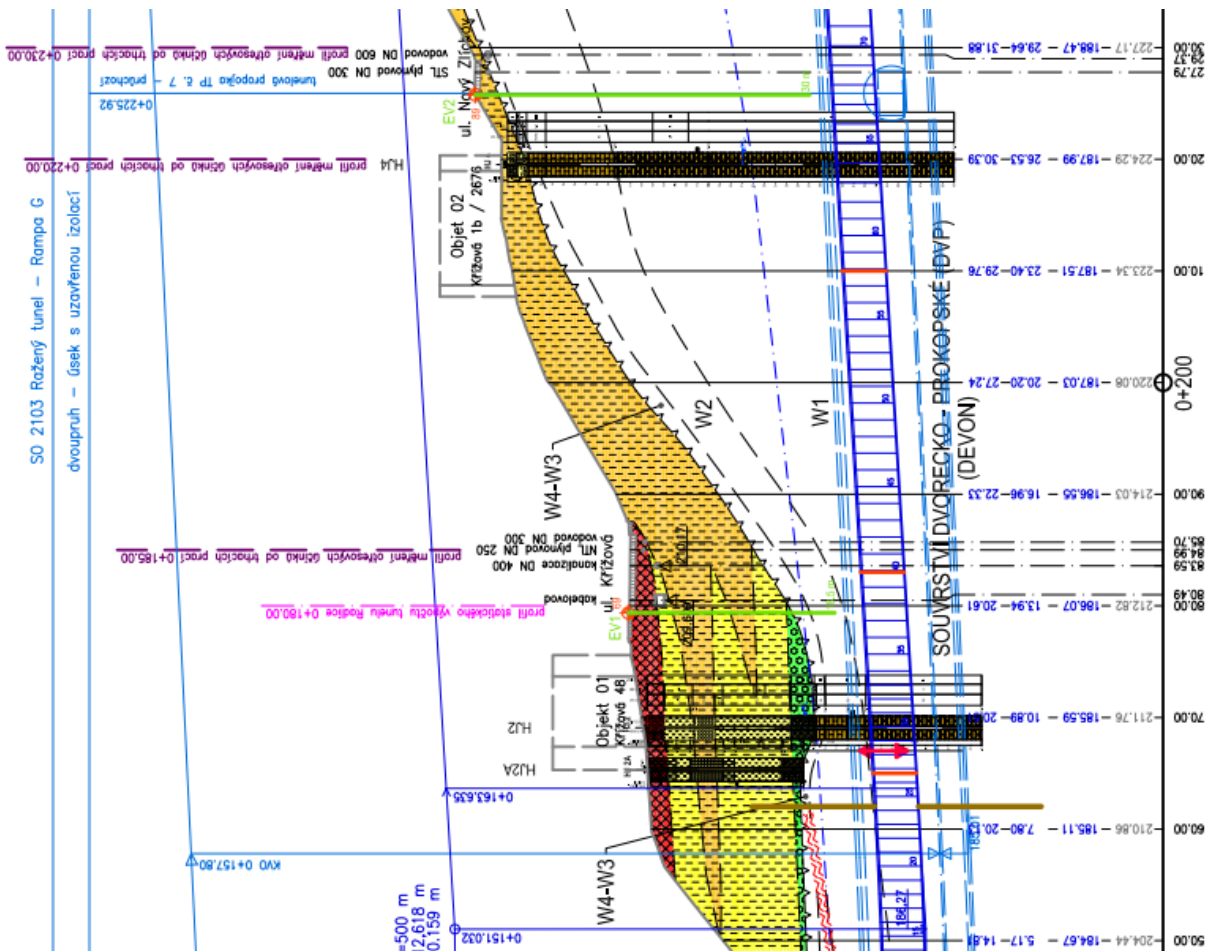
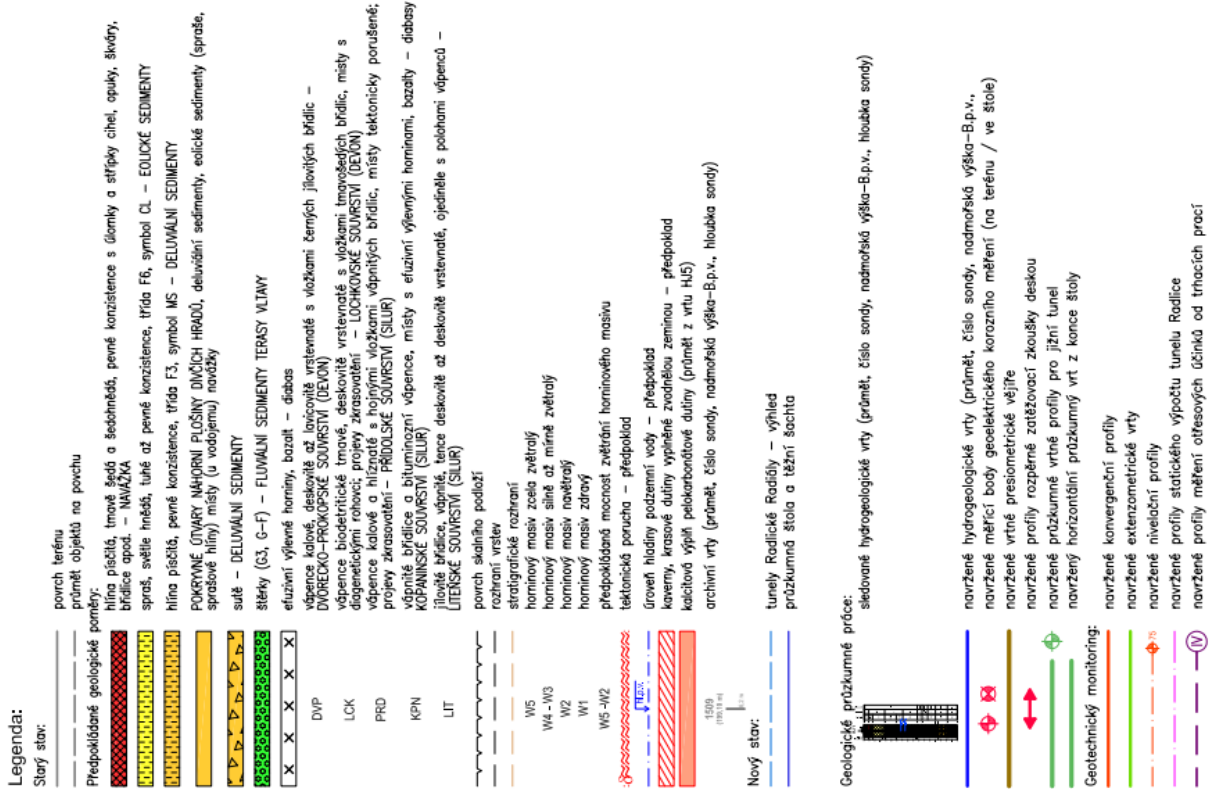
3.2.4 Monitoring

- Vybudování lokální geodetické sítě
- Měření deformací povrchu terénu
- Měření deformací objektů nadzemní zástavby
- Sledování a měření poruch nadzemní zástavby
- Konvergenční měření
- Dynamické a akustické měření
- Měření namáhání primárního ostění
- Extenzometrická měření
- Kontrolní zkoušky svorníků z betonu
- Měření na portálech a stavebních jámách
- Měření vlhkosti půdních horizontů [21]

3.3 Získané výsledky průzkumu



Obr. 25 – Situace s vyznačením geologických prací [9]



Obr. 26 – Část podélného řezu průzkumnou štolou s vyznačením geologických prací [9]

3.3.1 Inženýrskogeologické a geotechnické sledování výrubu průzkumné štoly

V úseku 121,80 – 137,70 km byly dokumentovány kalové mikritové vápence, tmavě šedé až černošedé, hlíznaté, tence deskovitě až lavicovitě vrstevnaté, pukliny byly druhotně vyplněny kalcitem, hustota diskontinuit střední až malá, zdravé W1, třídy R2 ojediněle R3, třída těžitelnosti 6 (ČSN 73 3050) a III (ČSN 73 6133) - DVORECKO-PROKOPSKÉ VÁPENCE - PRAŽSKÉ SOUVRSTVÍ - DEVON. Ražbou byl v tomto úseku rovněž zastižen i biolitický lamprofyr - mineta (byl dokumentován cca v průběhu celého úseku), světle šedý, místy nazelenalý, porfyrický, masivní, slídnatý (biolit), zdravý W1, třídy R2, třída těžitelnosti 6-7 (ČSN 73 3050) a III (ČSN 73 6133) - VARISKÉ VULKANITY V PALEOZOIKU.

Vrstevnatost se pohybovala v rozmezí 150-210°/140-45°. Její plochy byly popsány jako rovné, hladké, zcela průběžné, s průměrnou roztečí 100-350 mm, sevřené, místy kalcitovou výplní a tenkými vrstvičkami břidlice. Orientace minetové žíly byla 40°/45° a od staničení 125,05 tm byla dokumentována s orientací 350°/170°.

V tomto úseku byly dokumentovány dva stálé systémy puklin. První měl orientaci 350°/150°. Jeho plochy byly popsány jako zvlněné, drsné, od staničení 126,05 tm jako zazubené drsné, neprůběžné s průměrnou roztečí 80-150 mm. Druhý systém měl orientaci 60°/60-70° a jeho plochy měly obdobný charakter, s průměrnou roztečí 80-150 mm.

Tektonické poruchy se v tomto úseku nevyskytovaly.

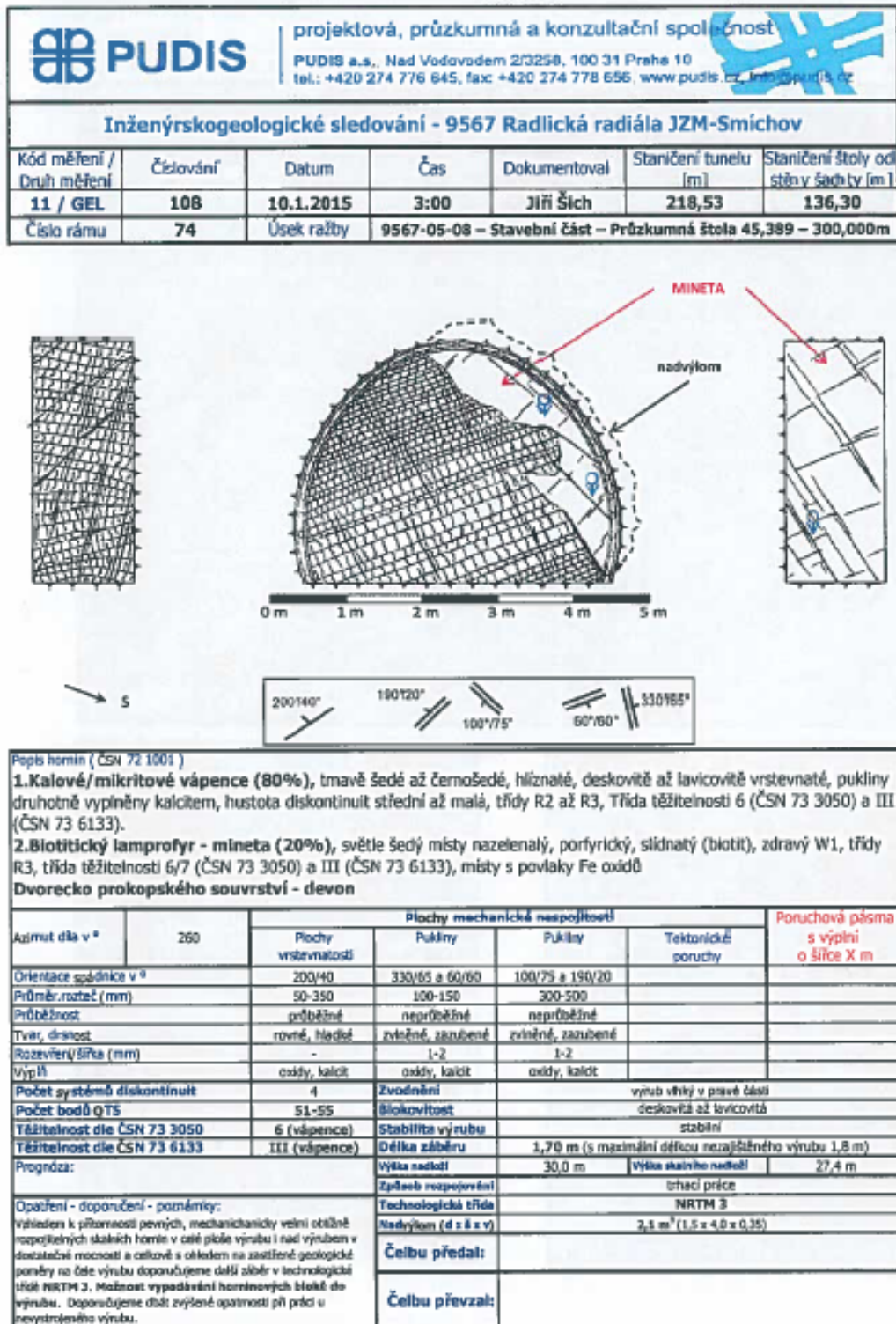
V úseku 137,70 — 256,70 tm byly dokumentovány kalové mikritové vápence, tmavě šedé až černošedé, hlíznaté, tence deskovitě až lavicovitě vrstevnaté, pukliny byly druhotně vyplněny kalcitem, hustota diskontinuit střední až malá, zdravé W1, třídy R2 (ojediněle R3), třída těžitelnosti 6 (ČSN 73 3050) a III (ČSN 73 6133) - DVORECKO-PROKOPSKÉ VÁPENCE - PRAŽSKÉ SOUVRSTVÍ — DEVON.

Vrstevnatost se pohybovala v rozmezí 180-210°/130-45°, ve staničení 242,95 — 248,15 tm až 240°/130°. Její plochy byly popsány jako zvlněné až rovné, hladké, zcela průběžné, s průměrnou roztečí 150-350 mm, sevřené, místy kalcitovou výplní.

V tomto úseku byly dokumentovány dva systémy puklin. První měl orientací 310-330°/165-80° a druhý 70-75°/50-85°. Jejich plochy byly popsány jako zvlněné, drsné, do staničení 203,40 tm jako zazubené drsné, neprůběžné s průměrnou roztečí 100-250 mm.

Tektonické poruchy se v tomto úseku orientovaly 55°/75°, 105-115°/50°, 230°/30°, 300°/75° a 90-95°/80°. Jejich plochy byly popsány jako zvlněné drsné v případě 115°/175° a jinak zvlněné, hladké, zcela průběžné s průměrnou šířkou 50-150 mm. Výplň byla tvořena převážně kalcitem a podrcenou horninou.

Rozpojování probíhalo pomocí trhačích prací. Čelo výrubu bylo suché. Výrub byl hodnocen jako stabilní. Výška skalního nadloží rostla od 22,4 m do 82,2 m (celkové nadloží 28,6 - 84,0 m). [23]



Obr. 27 – Ukázka protokolu sledování výrubu čela [23]

V 1. čtvrtletí v průběhu ražby průzkumné štoly:

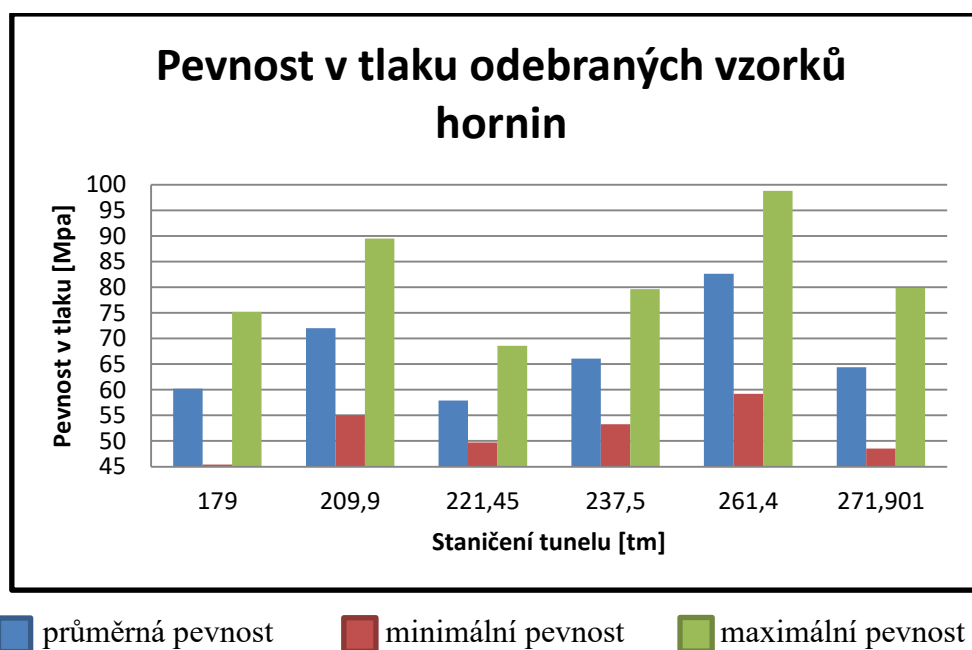
- Odebráno 6 vzorků hornin
- 30 zkušebních těles pro zkoušky základních indexových vlastností hornin

INDEX PEVNOSTI PŘI BODOVÉM ZATÍŽENÍ									
akce:	Radická radiála - štola								
	index I_{sp} (MPa)	index I_{50} (MPa)	index I_{50} (MPa)	index I_{50} (MPa)	K _{env}	pevnost v tlaku	vlhkost w (%)	klasif. ČSN 73	
	18,63	12,64	3,82	14,4	55,1	0,14	R2	1001, ČSN 73 6133	
	5,73	5,13	3,16	14,4	45,4	0,14	R3		
	7,98	6,49	5,22	14,4	75,2	0,14	R2		
	7,38	5,43	3,76	14,4	54,1	0,14	R2		
	8,30	6,74	4,94	14,4	71,2	0,14	R2		
					45,4		min		
					75,2		max		
					60,2		ave		
					pevnost v prostém tlaku:				
					8,27	5,66	14,4	81,6	
					6,35	4,94	14,4	71,1	
					7,72	4,36	14,4	62,7	
					6,90	6,21	14,4	89,5	
					4,70	3,82	14,4	55,0	
					55,0		min		
					89,5		max		
					72,0		ave		
					pevnost v prostém tlaku:				
					7,20	3,88	14,4	55,8	
					6,76	3,50	14,4	50,4	
					5,26	4,20	14,4	49,7	
					4,53	4,56	14,4	68,6	
					6,77	4,51	14,4	55,0	
					49,7		min		
					68,6		max		
					57,9		ave		
					pevnost v prostém tlaku:				

Obr. 28 – Ukázka protokolu laboratorních zkoušek hornin z průzkumné štoly [23]

Místo odběru	Typ horniny	Pevnost v tlaku σ_c [MPa]	Zatřídění podle ČSN 736133 /ex731001
st. tunelu km 0,262.00 (179,00 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	45,4-75,2 (prům. 60,2)	R2
st. tunelu km 0,291.40 (209,90 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	55,0-89,5 (prům. 72,0)	R2
st. tunelu km 0,304.45 (221,45 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	49,7-68,6 (prům. 57,9)	R2
st. tunelu km 0,320.50 (237,50 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	53,3-79,6 (prům. 66,1)	R2
St. tunelu km 0,344.40 (261,40 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	59,2-98,8 (prům. 82,6)	R2
st. tunelu km 0,354.90 (271,901m)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	48,5-79,9 (prům. 64,4)	R2

Tab. 2 – Přehled výsledků laboratorních zkoušek hornin [23]



Obr. 29 – Pevnost v tlaku odebraných vzorků hornin [23]

Abrazivost a obrusnost

Při strojním rozpojování hornin je nedílnou součástí zatřídění jednotlivých materiálů na trase nejen podle pevnosti, ale také dle parametrů abrazivnosti a obrusnosti. V tomto tunelovém úseku odebrané 2 vzorky. Na nejvíce zastoupeném horninovém typu zdravého mikritického vápence a zdravého biotického lamprofyru – minety. [23]

Místo odběru	Typ horniny	Abrazivnost podle ÚGN Fv [mg/m]	Cerchar Abrasiveness Index CAI	Třída abrazivnosti podle Barona-Kuzěcova	Průměrná obrusnost [mg/m]
st. tunelu km 0,320.50 (237,50 tm)	mikritický vápenec, zdravý (W1)	0,02 – 0,17 (0,06)	0,82	I.horniny velmi málo abrazivní	15,78
st. tunelu km 0,219.40 (136,40 tm)	Biolitický lamprofyr – mineta, zdravá (w1)	0,35 – 0,44 (0,41)	1,57	I.horniny velmi málo abrazivní	47,64

Tab. 3 – Přehled výsledků laboratorních zkoušek ze stanovení abrazivnosti a obrusnosti v ÚGN AV ČR [23]

Strukturní kinematická analýza horninového masivu – metoda klíčového bloku

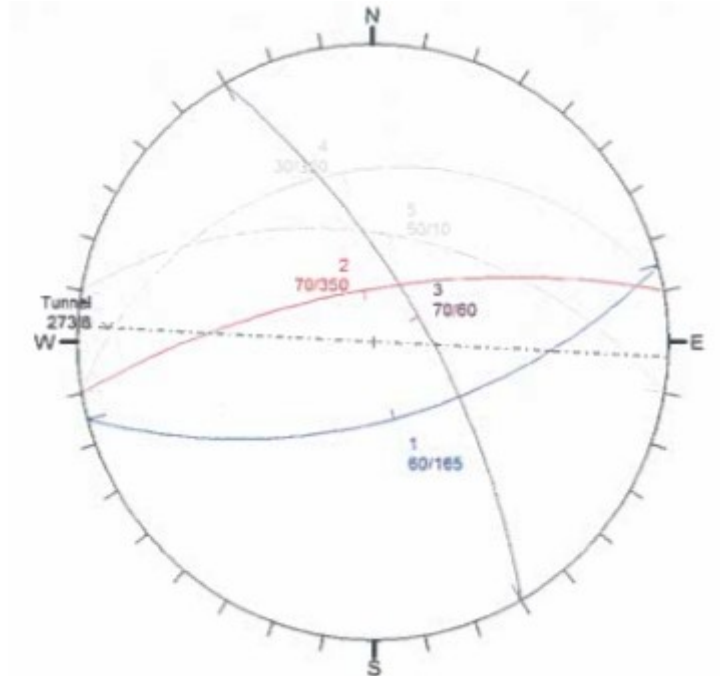
V průběhu ražby také prováděna strukturní kinematická analýza horninového masivu (metoda klíčového bloku) pro každý jednotlivý záběr speciálním softwarem (Unwedge version 3.0 od firmy Rocksience Inc.). Během této analýzy se provádí také stereogramy stereografická projekce diskontinuit na spodní polokouli) pro každý jednotlivý záběr.

Metodika: Podzemní díla ražená v rozpukaných horninových masivech v relativně mělkých hloubkách jsou nejčastěji porušována vyjíždějícími a vypadávajícími bloky hornin (dále jen klíny) podél systémů diskontinuit. Klíny vznikají na křížení významných strukturních prvků, jako jsou plochy vrstevnatosti, tahové, tlakové či střížené pukliny a tektonické poruchy (zlomy-poklesy, přesmyky, poruchová pásma). Tyto strukturní prvky rozdělují horninový masiv na diskrétní horninové celky. Při ražbě podzemního díla dochází k redistribuci napětí v horninovém masivu, ke změně okrajových podmínek a navýšení stupňů volnosti jednotlivých klínů. V důsledku těchto změn může docházet k vyjíždění a vypadávání jednotlivých klínů do výrubu. Analýza metodou klíčových bloků obecně probíhá

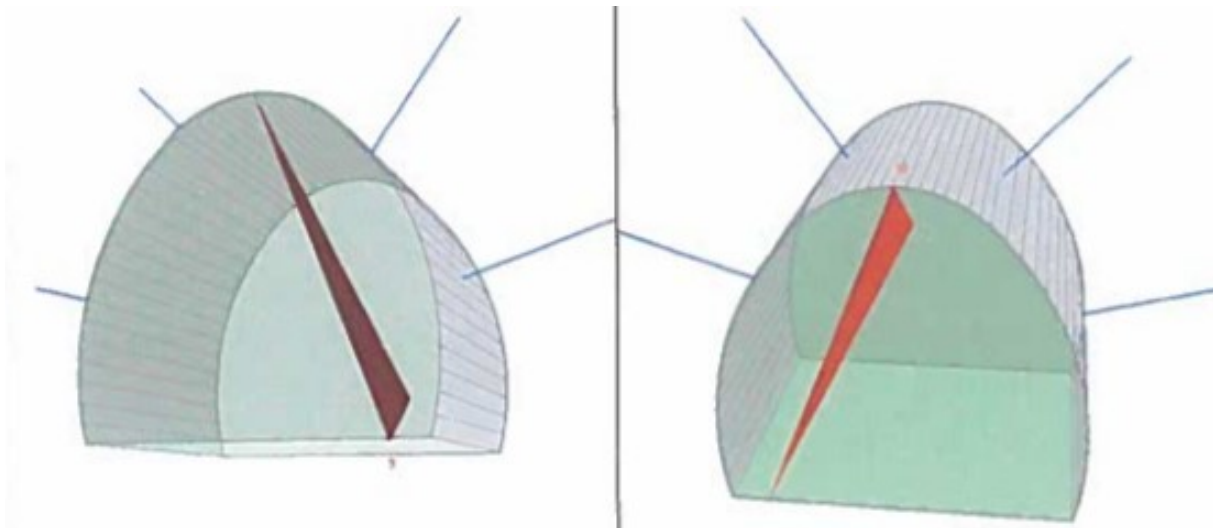
v následujících krocích:

1. Určení nejnepříznivější kombinace systémů diskontinuit pro tvorbu klínů vzhledem ke tvaru a orientaci podzemního díla (orientace, rozteč, průběžnost, výplň, drsnost a další mechanické parametry, např. smyková pevnost na diskontinuitách)

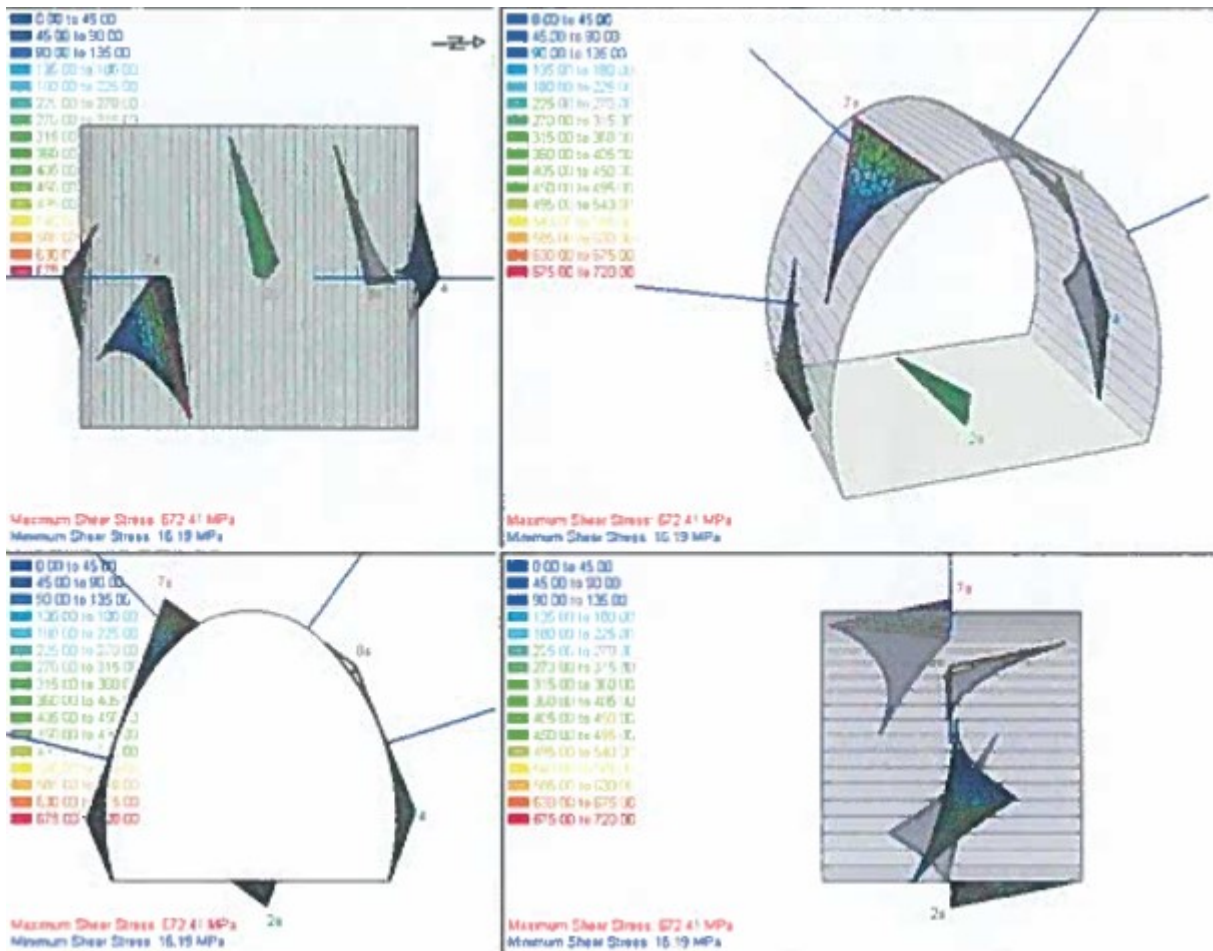
2. Identifikace potencionálních klínů, které mohou vypadnout nebo vyjet do výrubu
3. Výpočet stupně bezpečnosti těchto klínů ($FS < 1,5$ nestabilní)
4. Návrh dimenzování výztuže (kotvy, stříkaný beton) pro jednotlivé klíny pro dosažení požadovaného stupně bezpečnosti ($FS \geq 1,5$) [9], [23]



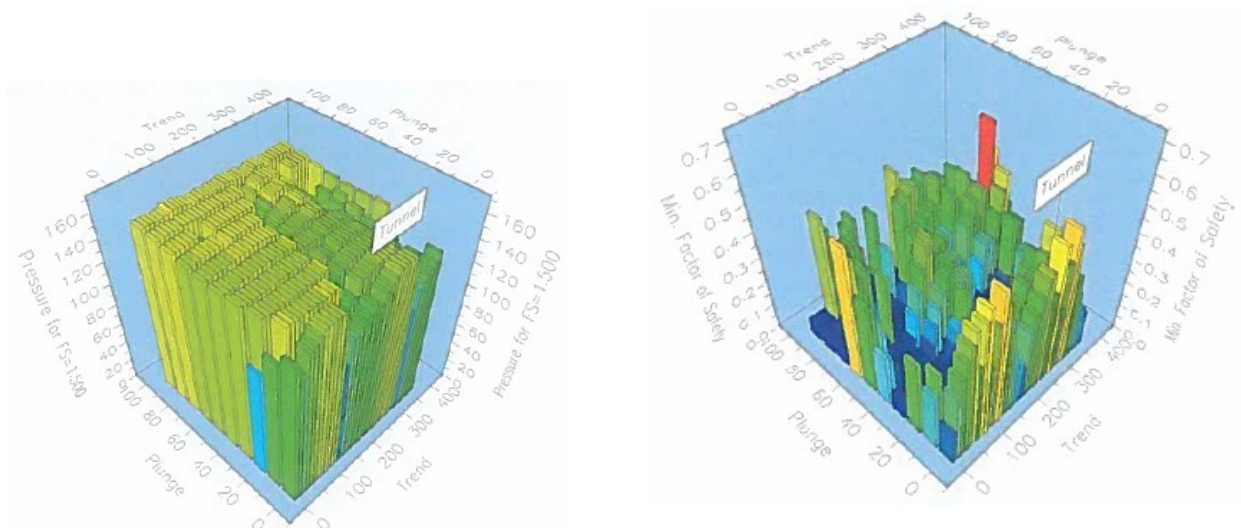
Obr. 30 – Stereografická projekce vybraných diskontinuit, spodní polokoule v tm 126,65 [23]



Obr. 31 – Klíny v čele výrubu v tm 126,65 [23]



Obr. 32 – Napěťové pole přirozené klenby působící na bloky v tm 126,65 [23]



Obr. 33 – Vliv orientace osy tunelu na výstupní proměnné tm 126,65; minimální podpůrné napětí pro stupeň bezpečnosti 1,5; minimální stupeň bezpečnosti [23]

3.3.2 Hydrogeologické sledování

U Zlíchovského portálu tunelu Radlice v oblasti průzkumné štoly hydrogeologicky sledovány vrty HJ 1 až HJ 5 o délkách 17 – 100 m.

Vrt HJ 1

Vrt je situován v blízkosti těžní šachty, kde v předcházejícím období docházelo k poklesu hladiny podzemní vody vlivem vlastního hloubení šachty a čerpání vody z ní, což zapříčinilo pokles na úroveň počvy těžní šachty. Při měření v 1. čtvrtletí 2015 byly hladiny podzemní vody stále na podobné úrovni z důvodu čerpání vody. Následně na konci února došlo ke vzestupu hladiny podzemní vody přibližně o 0,5 m a poté ke konci března došlo ke vzestupu o více jak 4 m. Důvod vzestupné hladiny podzemní vody nebyl zjištěn, ale jeho maximální hodnota z konce března již nebyla překročena.

Maximální úroveň hladiny podzemní vody 191,57 m.n.m. a minimální 187,10 m.n.m.

Vrt HJ 2

V případě tohoto vrtu docházelo k postupnému mírnému poklesu, pravděpodobně vlivem ražby průzkumné štoly. Nutné zohlednění období s výskytem minimálních srážek.

Maximální úroveň hladina podzemní vody 195,23 m.n.m. a minimální 194,34 m.n.m.

Vrt HJ 2A

Ve vrtu nebyla zastižena hladina podzemní vody.

Vrt HJ 4

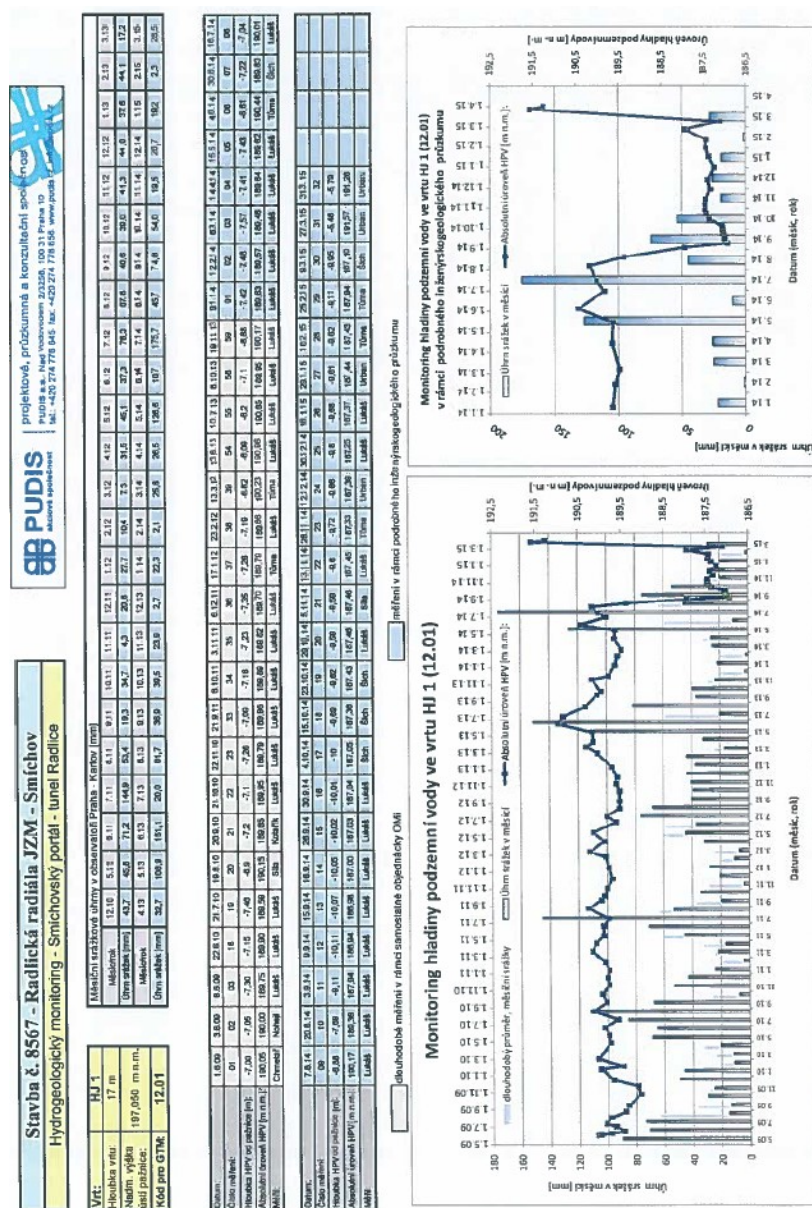
Vrt s minimální mocností pokryvných útvarů 1,7 m a hladinou podzemní vody dlouhodobě zakleslou více než 20 m ve skalním podloží. Úroveň hladiny podzemní vody v 1. čtvrtletí 2015 zaklesla o cca 3,0 m od úrovně hladiny podzemní vody změřené v minulém období. Možný je vliv ražby průzkumné štoly. Je však nutné uvážít, že to bylo v období s minimálními srážkami. Tato snížená hladina je dále měřena v průběhu února a března 2015.

Maximální úroveň hladiny podzemní vody byla tedy 200,26 m n.m. a minimální úroveň hladiny podzemní vody byla 1913,77 m n.m.

Vrt HJ 5

Ve vrtu byla hladina podzemní vody v souladu s teoretickým předpokladem kolísání (rozkyvu) hladiny podzemní vody během hydrogeologického roku, tzn. že byla ovlivněna jak srážkami, tak teplotami (vsakem a odparem).

Maximální úroveň hladiny podzemní vody v 1. čtvrtletí 2015 byla 266,29 m n.m. a minimální úroveň hladiny podzemní vody byla 266,12 m n.m. [23]



Měření technologické vody a čerpaného množství balastních vod

Dále také probíhalo průběžné sledování dodávané technologické vody do průzkumné štoly a množství čerpaných balastních vod.

Chemické a fyzikální rozbory podzemních vod

V 1. čtvrtletí byla odebrána a analyzován vzorek z vrtu J-3 presiometrického vějíře PP-2 ve staničení štoly km 0,187. [23]

3.3.3 Presiometrické vějíře z průzkumné štoly

V sledovaném období 1. čtvrtletí 2015 byl realizován presiometrický profil PP-3 ve staničení 0,270 km, obsahujícím celkem 4 radiálně orientované vrty o celkové délce 60 m. V nich bylo realizováno celkem 60 presiometrických zkoušek, z nichž 30 zkoušek bylo modifikovaných, tj. zařazením odlehčovací a další zatěžovací větve byl určen též presiometrický modul pružnosti.

Jako doprovodné zkoušky byly realizovány laboratorní zkoušky mechaniky hornin, pro něž bylo ze 4 vrtů presiometrického profilu PP-3 odebráno 10 horninových vzorků, představujících celkem 50 zkušebních těles pro stanovení pevnosti v prostém tlaku a příčném tahu resp. u 20 vybraných těles pro zjištění deformačních vlastností horninového materiálu, tj. modulu přetvárnosti.

Následně byla v těchto presiometrických vrtech realizována geofyzikální měření. Konkrétně: vrtná georadarová měření, seizmocarotáž, seizmické prosvěcování mezi vrty tomografie.

Presiometrické zkoušky na nepažených stěnách jádrových vrtů průměru 76 mm byly uskutečněny aparaturou francouzské firmy MÉNARD typu GA s rozsahem radiálního tlaku 8 MPa a sondou typu NX o průměru 74 mm. Z důvodu nezbytného zachování neporušených stěn vrtu se zkoušky střídaly s vrtáním jednotlivých etáží.

Metodický postup a vyhodnocení zkoušek bylo v souladu s pravidly pro standardní presiometrickou zkoušku tak, jak je uvedeno ve francouzských originálech a ČSN 72 1004. Objemové deformace byly odečítány po 15, 30 a 60 sekundách. Korekce tlakových a objemových ztrát přístroje byly při vyhodnocení respektovány podle kalibračních křivek.

Z přetvárných diagramů závislosti objemové deformace na vyvozeném radiálním tlakovém napětí (resp. zejména ze závislosti tečení na tlakovém napětí) byly určeny jako výsledky zkoušky následující hraniční body mezi třemi fázemi - elastickou, pseudoelastickou a plastickou.

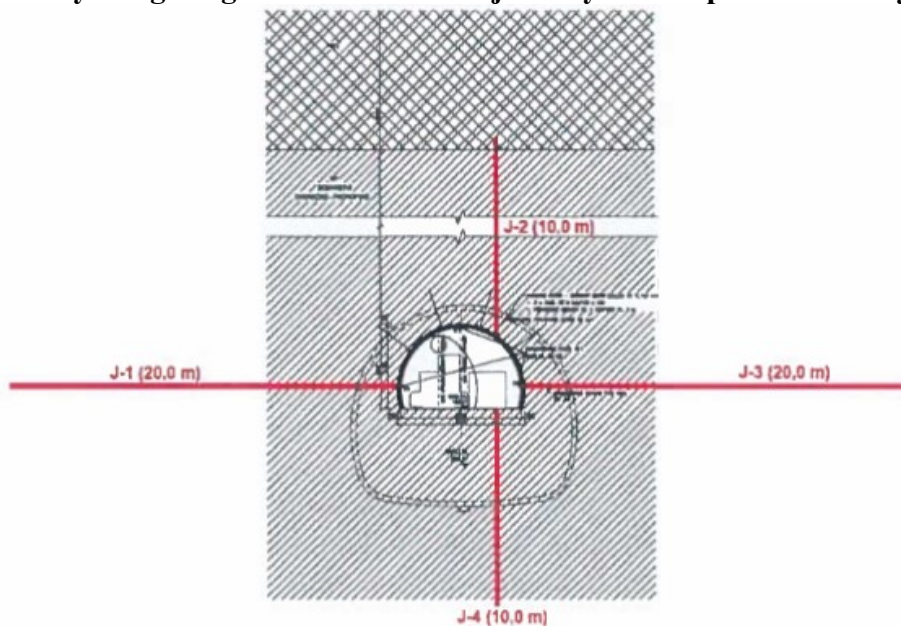
Možnost určení všech uvedených mezí závisí na pevnosti zkoušeného materiálu a dosahuje se zpravidla u zemin. U skalních či poloskalních hornin rozsah radiálního tlaku přístroje často nedostačuje ke zjištění mezního tlaku ani mezi tečení.

Nejdůležitějším výsledkem zkoušky je presiometrický modul přetvárnosti $E_{\text{def,p}}$, který je stanoven vždy z lineární pseudoelastické fáze přetvárného diagramu, tedy jako maximální hodnota všech modulů přetvárnosti v celém oboru vyvozeného napětí. Je vypočten ze vztahu:

$$E_{\text{def,p}} = 2 (1 + \nu) (v_o + v_m) \Delta_p / \Delta_v$$

- $v_o \dots$ základní objem měřicí buňky prázdné presiometrické sondy (nulové čtení)
- $v_m \dots$ objem vody natlačené do měřicí buňky středním tlakem, odpovídajícím středu lineárního stádia přetvárného diagramu
- $\Delta_p / \Delta_v \dots$ směrnice přetvárného diagramu v lineárním pseudoelastickém stadiu
- $\nu \dots$ Poissonovo číslo [9], [23]

3.3.4 Inženýrskogeologická dokumentace jádrových vrtů presiometrických věžíů



Obr. 35 – Profil PP-3 ve staničení km 0,270 [23]

Popis vrtu J-1 presiometrického vějíře PP-3

Hloubka [m]: Popis:

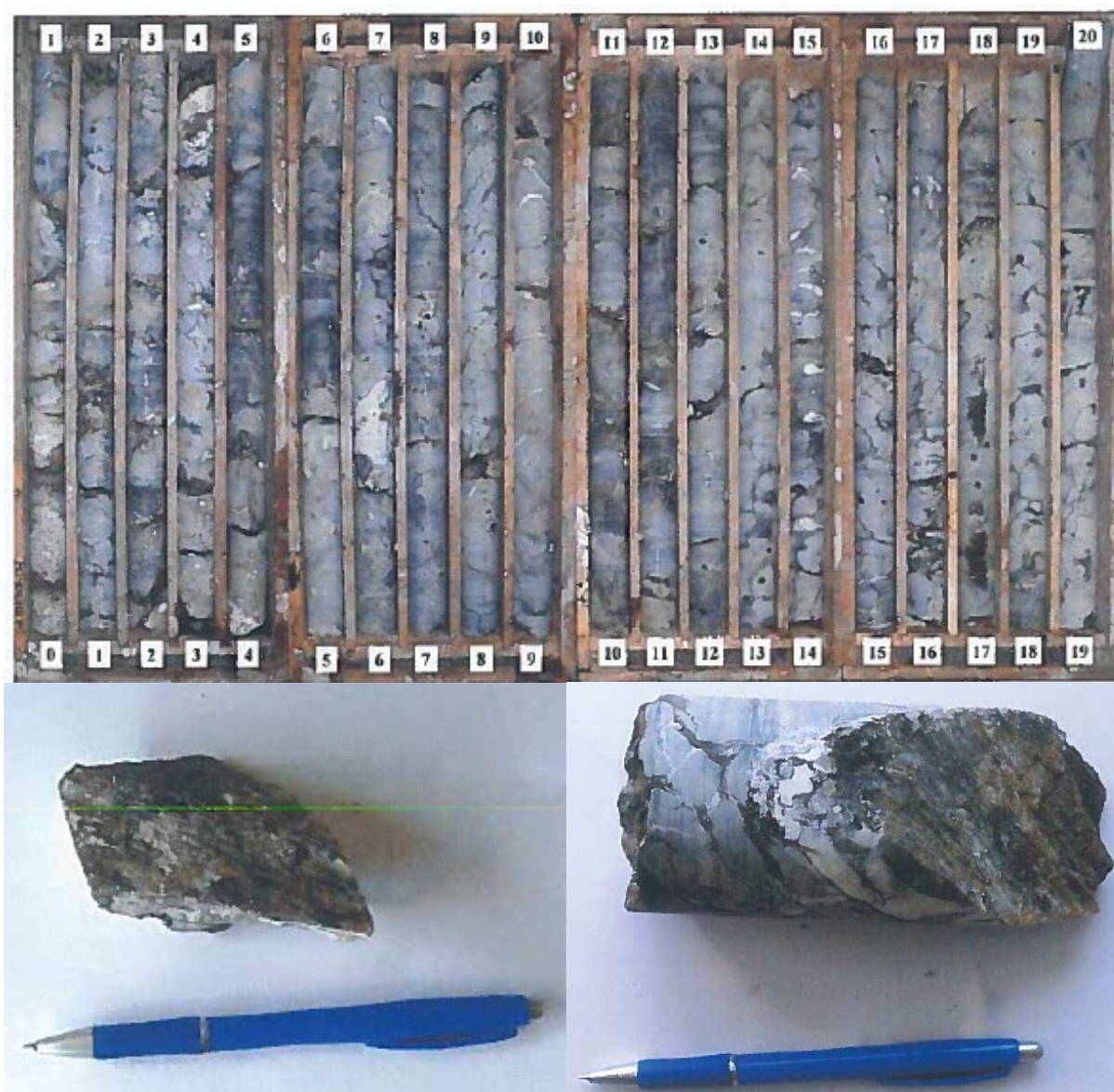
0,0 -0,4	beton - obezdívka tunelu
0,4-0,8	mikritický kalový vápenec, zdravý (W1), tmavě šedý až černošedý, hlíznatý, s četnými kalcitovými žilkami - částečně porušen ražbou tunelu
0,8 -10,0	mikritický kalový vápenec, zdravý (W1), tmavě šedý až černošedý, hlíznatý, s četnými kalcitovými žilkami, deskovité vrstevnatý, pukliny druhotně vyplněny kalcitem, hustota diskontinuit převážně střední (ojediněle velká), třídy R2 (ojediněle R3) s vložkami vápenných prachovitojílovitých břidlic do 10 cm, zdravých (W1), šedočerných až černých, třídy R3-R4
10,0 -12,1	vápenná prachovitojílovitá břidlice, šedočerná až černá, zdravá (W1), deskovitě vrstevnatá, hustota diskontinuit střední, třída pevnosti R3
12,1 -20,0	mikritický kalový vápenec, zdravý (W1), tmavě šedý až černošedý, hlíznatý, deskovitě vrstevnatý, pukliny druhotně vyplněny kalcitem, hustota diskontinuit převážně střední, třídy R2 (ojediněle R3)

Dvorecko-prokopské souvrství – devon.

Celková hloubka vrtu 20,0 m.

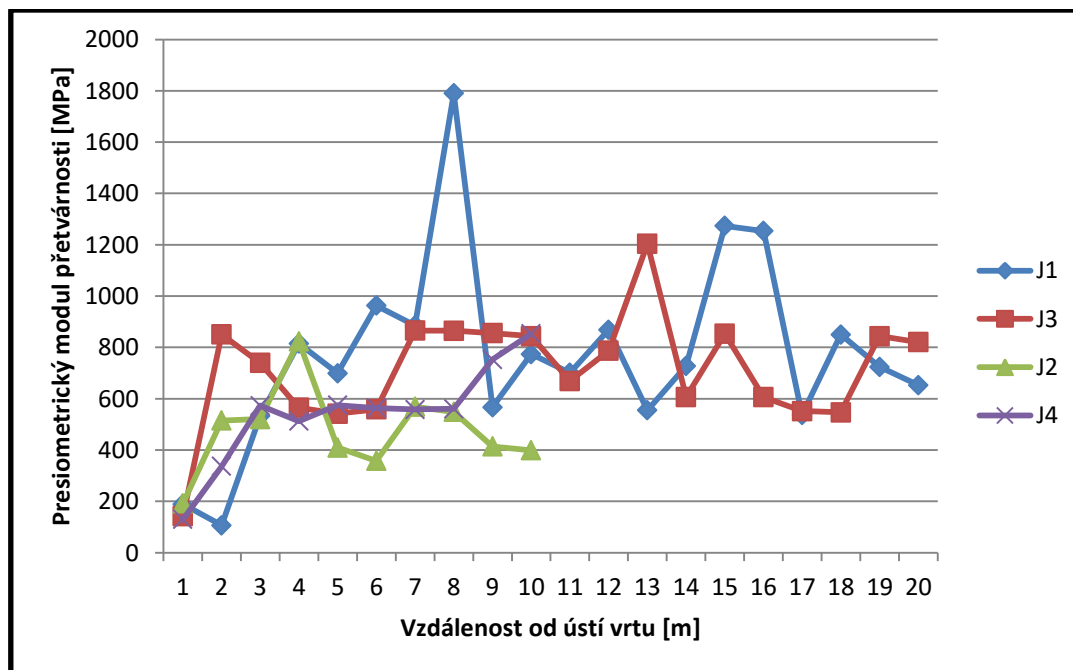
Zařídění dle RQD:

0,4 — 1 m	50%	7 — 8 m	100%	14 — 15 m	100%
1 — 2 m	75%	8 — 9 m	90%	15 — 16 m	100%
2 — 3 m	90%	9 — 10 m	100%	16 — 17 m	100%
3 — 4 m	80%	10 — 11 m	80%	17 — 18 m	90%
4 — 5 m	100%	11 — 12 m	90%	18 — 19 m	100%
5 — 6 m	100%	12 — 13 m	80%	19 — 20 m	100%
6 — 7 m	100%	13 — 14 m	100%		



Obr. 36 – Fotodokumentace vrtu J1 presiometrického vějíře PP-3 [23]

Průběh presiometrických modulů přetvárnosti ve všech 4 vrtech profilu PP-3 znázorněn graficky na obr. 37. Naměřené hodnoty presiometrických modulů odpovídají charakteru horninového prostředí v místech měřených presiometrických profilů. Výsledky zkoušek znázorňují stav horninového masivu v okolí vyražené průzkumné štoly. V pásmu sousedícím s lícem výrubu v odlehčené zóně jsou hodnoty modulů oproti stavu v přirozeném uložení dosti sníženy. Oproti tomu dále od výrubu v přitížené zóně jsou vzhledem ke komprimaci horniny a souvisejícímu těsnému sevření rozdělovacích ploch presiometrické moduly vyšší než v přirozeném uložení. [9], [23]



Obr. 37 – Průběh presiometrického modulu přetvárnosti v profilu PP-3 [23]

3.3.5 Laboratorní zkoušky mechaniky hornin

V průběhu realizace presiometrických zkoušek byly odebírány vzorky hornin ze všech jádrových vrtů.

Z vrtného jádra byly zhotovovány válcová zkušební tělesa průměru a výšky 60 mm. U těchto těles se stanovovaly hodnoty indexových vlastností horninové substance včetně pevnosti v prostém tlaku, případně pevnosti v příčném tahu. Dále byla stanovena stlačitelnost horninové substance – modul přetvárnosti.

Zjištěné hodnoty základních i pevnostních a přetvárných charakteristik horninové hmoty z profilu PP-3 vykazují značné homogenní horninové prostředí v měřeném profilu s většinovým zastoupením zdravých mikritických vápenců a menšinovým zastoupením zdravých vápnitých břidlic. [9], [23]

3.3.7 Geofyzikální měření z povrchu terénu

Geofyzikálním měřením z povrchu realizována v oblasti přírodní památky Ctirad soustava podélných a příčných profilů. Využito metod gravimetrického měření a seizmického měření. Předpoklad výskytu devonské horniny dvorecko-prokopského a lochkovského souvrství, silurská souvrství přídolské a kopaninské. Dále přítomnost výlevných vulkanických diabasů. Ověření složité geologické stavby s možností zastihnutí zkrasovění u vápenců jednotlivých souvrství. Přítomné horniny se nalézají v různém stupni zvětrání a tektonických poruch.

Seizmické rozhraní na osovém profilu procházející horninami třídy R5. Rozhraní vyneseno do podélného řezu a prochází v nadmořských výškách 277 – 305 m. n. m., tj. hloubka 1 – 25 m pod povrchem. Dále je patrné zahloubení s lokálními depresiemi a elevacemi skalního podloží. [9], [23]

3.3.8 Geoelektrický korozní průzkum

Korozní průzkum je v přímé návaznosti na postupu ražby. Práce prováděny na odkryté čelbě. Průběh stanovení korozních parametrů v plánovaných bodech, které jsou vztažené k aktuálním realizovaným měřicím bodům v podzemí. Stanovena korozní agresivita horninového prostředí z hlediska hustoty proudu v půdě v cizím proudovém poli a hlediska měrného odporu. Dále měřen potenciál ocelového pažení štol.

3.3.9 Další realizované metody

- Jádrové předvrty
- Zatěžovací zkoušky deskou

4. VYHODNOCENÍ

4.1 Zhodnocení přínosu jednotlivých metod a jejich oprávněnost

4.1.1 Inženýrskogeologické a geotechnické sledování výrubu průzkumné štoly

Za pomoci inženýrskogeologického a geotechnického sledování výrubu byla realizována geologická dokumentace nezajištěného čela výrubu, ověřování geologie a vytváření geologického modelu horninového masivu. Zaznamenávání hydrogeologických poměrů při ražbě, projevů nestability čela výrubu, vyjždění horninových bloků, vysypávání či vyplavování výplně tektonických poruch či krasových jevů. Inženýrskogeologický pasport čela výrubu zaznamenával litologická a stratigrafická rozhraní, systémy diskontinuit, přítoky podzemní vody, místa odběru vzorků hornin či podzemní vody, petrografický popis hornin, stupeň pevnosti materiálu, hustotu diskontinuit, stupeň rozpukání, tektonické porušení, orientaci diskontinuit a mnoho dalších podstatných informací.

Z výsledků je zřejmé, že pevnostní charakteristiky hornin u odebraných vzorků v trase průzkumné štoly v 1. čtvrtletí vykazovaly poměrně malý rozptyl, odpovídající většinovému zastoupení zdravých makrotických vápenců. Horninové prostředí v tomto úseku bylo poměrně homogenní.

Z hlediska klasifikace dle obrusnosti a abrazivnosti v daném úseku zastoupeném zdravými mikritickými vápenci a zdravým biotitickým lamprofyrem – minety se bude jednat o velmi málo abrazivní horniny ($F_v = 0,0 - 1,0 \text{ mg/m}$), při kterém bude docházet k přirozenému opotřebování rozpojovacích pracovních nástrojů. Při klasifikování abrazivnosti hornin dle indexu CAI byla výsledná průměrná hodnota CAI = 0,82 pro mikritický vápenc a CAI = 1,57 pro biotitický lamprofyr – minetu.

V průběhu ražby byla také prováděna strukturní kinematická analýza horninového masivu – metoda klíčového bloku pro každý jednotlivý záběr. Tato analýza byla průběžně prováděna na základě možného vyjždění a vypadávání horninových bloků v nezajištěné části čela výrubu štoly. Zjištěno při zastižených průběžných ploch vrstevnatosti a tektonických puklin dochází k tvorbě uvolněných horninových bloků v nezajištěné části výrubu.

Díky získaným údajům se vytváří parametry pro klasifikační systémy. Postupné doplňování a sestavování geologických řezů. Zatřídění do technologických tříd NRTM. Informace získané touto metodou jsou nepostradatelné jak z hlediska ražby průzkumné štoly,

tak z hlediska budoucí ražby tunelového díla. Tato metoda velkou měrou napomáhá následné časové náročnosti projektu, ekonomičnosti a v neposlední řadě bezpečnosti. Inženýrskogeologický průzkum se bez této metody průzkumu pro takové dílo neobejde. [9], [22], [23]

4.1.2 Hydrogeologické sledování

V rámci hydrogeologického sledování probíhalo měření hladiny podzemní vody ve vrtech, aktualizace pasportizace a repasportizace studní a pramenů, měření přítoků podzemní vody do výrubu, měření celkového přítoku do průzkumné štoly a chemická analýza podzemních vod.

Z výsledků je patrné, že ve vrtech v 1. čtvrtletí 2015 docházelo ke kolísání hladiny podzemní vody vlivem ražby štoly. Během sledování byl minimální výskyt srážek. Pouze ve vrtu HJ 2A nebyla zastižena hladina podzemní vody.

Při ražbě dokumentovány výraznější nesoustředěné přítoky podzemní vody na čelo výrubu v začáteční fázi průzkumné štoly, kde se vyskytovalo nízké nadloží. Při dalším postupu čelo výrubu bylo převážně suché místy vlhké. Jediné místo výskytu soustředěného přítoku z krasové dutiny byl se staniční 0,517 km na začátku vápenců lochkovského souvrství.

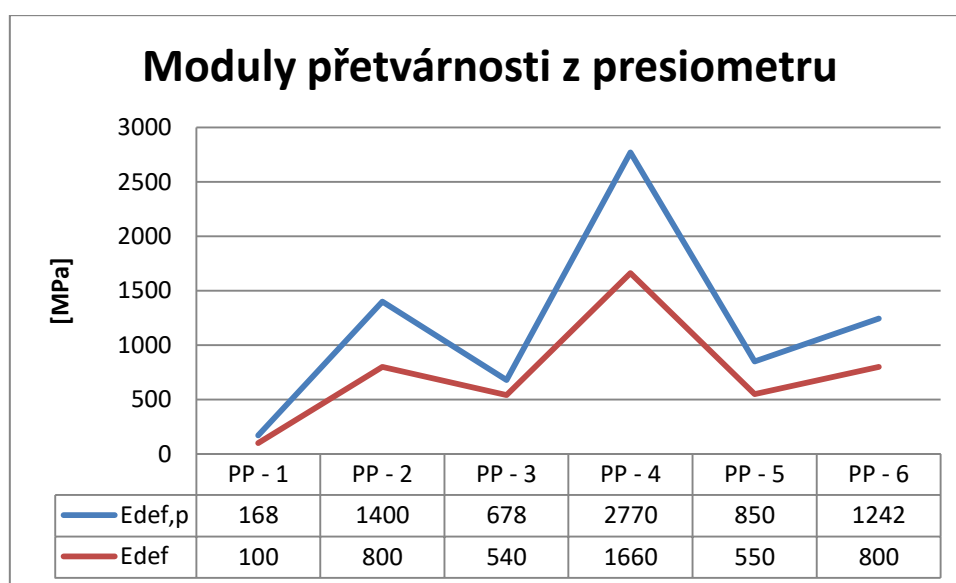
Chemické a fyzikální rozborů vzorků podzemních vod z přítoků ze štoly byl stanoven stupeň agresivity XA1 pro devonské horniny a XA1, XA2 pro silurské horniny.

Za pomoci hydrogeologického sledování se ověřovala hladina podzemní vody a její kolísání vlivem ražby, dále naměřen přítok podzemní vody ve štole a zastižen v části větší přítok vody vlivem krasové dutiny. V neposlední řadě zjištěna chemická analýza vody, která má vliv na ostění, vyztužení a v neposlední řadě na typ a způsob izolace budoucího tunelového díla a tím i náklady na její celkovou cenu. Z tohoto hlediska je tato metoda průzkumu účelná a nutná. [9], [22], [23]

4.1.3 Presiometrické vějíře z průzkumné štoly

Terénní presiometrické zkoušky využity pro ověření mechanických vlastností horninového prostředí v profilu budoucího tunelu situované v radiálně orientovaných vrtech v rovině kolmé na osu štoly. Celkem bylo vytvořeno 7 presiometrických profilů v trase průzkumné štoly. Každý presiometrický profil se skládal ze 4 presiometrických vrtů uspořádaných ortogonálně nebo diagonálně o celkové délce vrtů v jednom vějíři 60 m.

Vrtné vějíře a samotné presiometrické zkoušky byly realizovány v profilu průzkumné štoly bezprostředně po vyražení příslušného úseku. V rámci realizace presiometrického vějíře byl proveden následný popis jádrových vrtů, stanoven příčný inženýrskogeologický řez každého vějíře. V každém vějíři po metrových intervalech provedeny presiometrické zkoušky: 60 standartních měření pro stanovení modulu přetvárnosti a 30 modifikovaných zkoušek. Dále zhotoveny laboratorní zkoušky skalních hornin. Z každého presiometrického vrtu 2 charakteristické vzorky hornin pro určení především pevnosti v tlaku, příčném tahu a indexu pevnosti v bodovém zatížení. Presiometrické vějíře dále využity pro geofyzikální měření mezi vrty (georadar, seizmika, tomografie). [9], [22], [23]



Obr. 39 – Moduly přetvárnosti z presiometru [23]

$E_{def,p}$ – presiometrický modul přetvárnosti, E_{def} – modul přetvárnosti, PP-1 – PP-6: presiometrické profily

4.1.4 Geofyzikální měření

Geofyzikální měření provedeno podél celé trasy průzkumné štoly. Využito bylo metod seizmických, geoelektrických, gravimetrických a georadarových. Tyto měření měly za cíl v předstihu před ražbou průzkumné štoly najít průběhy poruchových zón a indikaci primárních krasových jevů ať již korozních diskontinuit nebo kaveren se zeminou výplní.

V úseku ve staničení 0,500 – 0,600 km se identifikovali zkrasovatělé vápence lochkovského souvrství v nadloží štoly. V úseku ve staničení 0,650 – 0,750 km se zjistily hranice zkrasovatělého lochkovského souvrství a požárského souvrství, patrná morfologická

deprese s linií směřující k místu havárie stoky P v minulosti, kde se vyskytovaly hluboké krasové jevy vyplněné zvodněnými zeminami.

4.2 Další možnosti provádění inženýrsko-geologického průzkumu

V rámci provádění inženýrsko-geologického průzkumu mohlo být využity další metody geofyzikálního měření, jako jsou metody geotermické, radiometrické či magnetometrické.

Magnetometrická metoda by napomohla k podrobnějšímu litologickému zmapování a lokalizaci kovových překážek, vedení a předmětů. Radiometrická metoda by mohla být využita k důkladnějšímu rozlišení horninových typů a indikaci poruch. Dále by bylo umožněno stanovení objemové vlhkosti hornin, hustota, pórovitost a obsah minerálů a těžkých kovů. Díky geotermické metodě se mohou získat podrobnosti různých anomálií chemizmu, litologické stavby horninového prostředí, endogenních procesů. Lze také indikovat smykové plochy, lokalizovat podzemní dutiny a prameny podzemní vody.

Zařazením těchto geofyzikálních metod do inženýrsko-geologického průzkumu bychom získali další důležité informace, které by nám posloužily k podrobnějšímu prozkoumání dané oblasti. Výhodou těchto metod spočívá i ve využití, jak na povrchu, tak i ve vrtech. Jsou to poměrně univerzální metody, které napomůžou ke zkvalitnění průzkumu.

V rámci terénních zkoušek, kdy byly použity presiometrické zkoušky a zatěžovací zkouška deskou, mohlo být nadále využito jejich alternativ a to ploché lisy, radiální lisy a vodní tlaková zkouška.

V oblasti vrtných prací lze dále využít metody odlehčení vrtného jádra, pomocí které se sledují probíhající změny v horninovém masivu a dochází ke zjištění primární napjatosti.

Do součásti inženýrsko-geologického průzkumu lze zahrnout také sledování přetvoření před čelbou. Analyzovat posuny lze víceúrovňovými extenzometry.

Během ražby a zejména po vyražení štoly se uplatní celá řada zástupců geotechnického monitoringu. V neposlední řadě díky již známým parametrům získaných pomocí inženýrsko-geologického průzkumu lze vytvářet matematické modely, které nám pomohou přiblížit stav napětí v horninovém masivu, zatížení konstrukce, posuny, deformace a další hodnotné informace. Lze je využít k následné aplikaci na budoucí tunelovou stavbu.

Z globálního hlediska lze říci, že návrh inženýrsko-geologického průzkumu a zvolené metody na průzkumné štolě Radlická byly zvoleny správně. Díky jejich aplikaci došlo

dostatečné prozkoumanosti dané oblasti, potvrzení její geologie a zpřesnění parametrů. Také se potvrdil výskyt krasových jevů, i když v nikterak velkém rozsahu. V rámci ražby se narazilo na krasovou dutinu se soustředěným přítokem vody. Po tomto výskytu byly realizovány jádrové předvrty. Možná aplikace vrtného vějíře ve staničení výskytu přítoku vody. Pomocí vrtů možné zastižení dalších krasových jevů, jejich následné využití pro presiometrickou zkoušku, geofyzikální zkoušky a laboratorní zkoušky, díky kterým dosáhneme kompletnějších informací a zajištění bezpečnosti.

5. ZÁVĚR

Provádění inženýrsko-geologického průzkumu pro velké tunelové stavby průzkumnou štolou je nezbytnou součástí při realizaci takových staveb, obzvláště v případech neprozkoumaného území, neznalosti geologie a hydrogeologie v dané oblasti. Další využití průzkumné štoly nastává v případě výskytu komplikovaných geologických a hydrogeologických podmínek, v zastavěných oblastech nebo v případě je-li dílo situované ve velkých hloubkách.

Za pomoci průzkumné štoly jsme schopni získat přesné a spolehlivé výsledky, které jinou metodou nelze získat. Štolu lze také nadále využívat k dalším metodám inženýrsko-geologického průzkumu přímo v zájmové oblasti. Jsme přímo v kontaktu s budoucím dílem. V neposlední řadě nám také napomáhá k bezpečnosti ražby a následné interpretaci získaných informací, pomocí kterých se optimalizuje vedení trasy tunelu, technologie ražby a celková realizace budoucího tunelu. Na druhé straně je nežádoucí finanční nástavba celého projektu, prodloužení doby realizace díla a změny napjatosti v horninovém masivu. Proto je třeba vycházet ze zkušeností, všech dostupných informací a najít kompromis mezi cenou, dobou realizace a bezpečností budoucího díla.

Průzkum na průzkumné štolě Radlická je poměrně rozsáhlý a sloužil především k ověření geologických a hydrogeologických poměrů, zejména potvrzení výskytu krasových jevů a vliv ražby na okolí. Krasové jevy se potvrdily, ale předpokládaly se ve větším rozsahu, to však neznamená, že je možné jejich zastižení v jiných oblastech v rozdílném objemu. Během ražby byla nafáraná krasová puklina se soustředěným přítokem podzemní vody. V rámci průzkumu byla provedena celá řada inženýrsko-geologických metod průzkumu. Měly své opodstatněné místo v projektu a posloužily k řadě cenných informací. Z globálního hlediska lze říci, že využití metody potvrdily a upřesnily prognózy naší zájmové oblasti. V rámci průzkumu využito inženýrsko-geologického a geotechnického sledování výrubu průzkumné štoly, hydrogeologické sledování, presiometrické vějíře, laboratorní zkoušky, geofyzikální měření, geoelektrický korozní průzkum, jádrové předvrty a zatěžovací zkoušky deskou. Další možnosti provádění průzkumu jsou aplikace geofyzikálních měření využití metody geotermické, radiometrické a magnetotermické. Vodní tlakové zkoušky, ploché lisy, odlehčovací vrtná jádra, sledování přetvoření před čelbou a geotechnický monitoring.

Cílem diplomové práce je popis inženýrsko-geologického průzkumu pro tunelové stavby, zejména průzkumnou štolou. Metodika průzkumu, poznatky z již realizovaných

tunelových staveb. Následná situace při provádění inženýrsko-geologického průzkumu na průzkumné štole Radlická, zhodnocení přínosu a oprávněnost jednotlivých metod a další možnosti jeho provádění.

At' je predikce inženýrsko-geologického průzkumu jakákoliv, nejsme nikdy schopni s předstihem s naprostou jistotou říci, že daný bod, část či oblast je naprosto bezpečná, dokud s ní nejsme v přímém kontaktu.

6. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

Seznam obrázků

Obr. 1 – Inženýrsko-geologická mapa rajonů části oblasti Prahy 5 [3]	9
Obr. 2 – Odporový řez [6]	11
Obr. 3 – Radarový řez, metoda: georadar [6]	11
Obr. 4 – Obecný princip seismického měření [6]	12
Obr. 5 – Hloubkový řez mělké refrakční seizmiky [6]	12
Obr. 6 – Princip měření v metodě přímých vln [6]	13
Obr. 7 – Rychlostní profily podél vrtů, metoda: seismokarotáž ve vějíři vrtů [6]	14
Obr. 8 – Konstrukce jednoduchého a dvojitého jádrováku [8]	16
Obr. 9 – Schéma soustavy rozpěrné zatěžovací zkoušky deskou [9]	20
Obr. 10 – Umístění a tvary průzkumných štol a jejich příklady (1 – SOKP 513, SOKP 514, 2 – Královopolský Brno, 3 – Mrázovka, Královská obora, Prackovice) [12]	23
Obr. 11 – Umístění průzkumné štoly vzhledem k tunelovým profilům [13]	24
Obr. 12 – Přehled silničních tunelů v ČR a využívání průzkumných štol [15]	26
Obr. 13 – Pohled průzkumné štoly MO Špejchar – Pelc – Tyrolka [17]	26
Obr. 14 – Podélný řez průzkumné štoly MO Špejchar – Pelc – Tyrolka [17]	27
Obr. 15 – Geologický příčný řez: staničení km 1,38 tunelu Dobrovského [15]	28
Obr. 16 – Pohled průzkumné štoly Dobrovského [15]	29
Obr. 17 – Řezná hlava TBM a výrony vody na průzkumné štole Višňové [18]	30
Obr. 18 – Situace trasy Radlické radiály s vyznačením tunelových úseků [20]	31
Obr. 19 – Podélný geologický řez tunelem Radlice s vyznačeným úsekem průzkumné štoly [20]	32
Obr. 20 – Situace navrhované průzkumné štoly tunelu Radlice [20]	33
Obr. 21 – Pohled do těžní šachty [foto: T.Pospíšil 2016]	34
Obr. 22 – Pohled průzkumnou štolou [22]	34
Obr. 23 – Přítok podzemní vody z krasové pukliny v lochkovském souvrství [21]	35
Obr. 24 – Presiometrický vějíř ve výhybně [21]	36
Obr. 25 – Situace s vyznačením geologických prací [9]	37
Obr. 26 – Část podélného řezu průzkumnou štolou s vyznačením geologických prací [9]	38
Obr. 27 – Ukázka protokolu sledování výrubu čela [23]	40

Obr. 28 – Ukázka protokolu laboratorních zkoušek hornin z průzkumné štoly [23].....	41
Obr. 29 – Pevnost v tlaku odebraných vzorků hornin [23]	42
Obr. 30 – Stereografická projekce vybraných diskontinuit, spodní polokoule v tm 126,65 [23]	44
Obr. 31 – Klíny v čele výrubu v tm 126,65 [23]	44
Obr. 32 – Napěťové pole přirozené klenby působící na bloky v tm 126,65 [23].....	45
Obr. 33 – Vliv orientace osy tunelu na výstupní proměnné tm 126,65; minimální podpůrné napětí pro stupeň bezpečnosti 1,5; minimální stupeň bezpečnosti [23].....	45
Obr. 34 – Hydrogeologický monitoring vrtu HJ1 za období 1. čtvrtletí 2015 [23]	47
Obr. 35 – Profil PP-3 ve staničení km 0,270 [23]	49
Obr. 36 – Fotodokumentace vrtu J1 presiometrického vějíře PP-3 [23].....	51
Obr. 37 – Průběh presiometrického modulu přetvárnosti v profilu PP-3 [23]	52
Obr. 38 – Ukázka protokolu laboratorních zkoušek hornin z presiometrických vějířů [23]...	53
Obr. 39 – Moduly přetvárnosti z presiometru [23]	57

Seznam tabulek

Tab. 1 – Třídy kvality vzorků zemin pro laboratorní zkoušky a použité kategorie odběru [2] 18	
Tab. 2 – Přehled výsledků laboratorních zkoušek hornin [23]	42
Tab. 3 – Přehled výsledků laboratorních zkoušek ze stanovení abrazivnosti a obrusnosti v ÚGN AV ČR [23]	43

Seznam příloh v elektronické podobě

Příloha 1 – Situace s vyznačením geologických prací

Příloha 2 – Podélný řez průzkumnou štolou s vyznačením geologických prací (1. a 2. díl)

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Seznam použitých literárních a internetových zdrojů

[1] KLEPSATEL, František, KUSÝ, Pavol, MAŘÍK, Libor. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN 80-88905-43-5.

[2] ČSN EN 1997-1 : 2006. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 138 s.

ČSN EN 1997-2 : 2008. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 152 s.

[3] Česká geologická služba: *Inženýrsko-geologické mapování* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_25

[4] Česká geologická služba: *Hydrogeologické mapování* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/vav/podzemni-vody/hydrogeologicke-mapovani>

[5] *Směrnice č. 1 o přípravě, provádění a vyhodnocování prací inženýrsko-geologického a hydrogeologického průzkumu*. Praha: Český geologický úřad, 1975.

[6] JANČOVIČ, Ladislav, DOSTÁL, Petr, FRÝBOVÁ, Pavlína. *Geofyzikální metody měření v geotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-4910-7.

[7] ČSN EN ISO 22475 – 1 : 2006. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Odběry vzorků a měření podzemní vody – Část 1: Zásady provádění*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 120s.

[8] *Technika a technologie hlubinného vrtání* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/TECHHLDOB/hlubinneVrtani/vrtani/vrtnaKolona.html>

[9] Projektová dokumentace: *Stavba č. 9567: Radlická radiála JZM – Smíchov, Podrobný inženýrskogeologický průzkum, Díl I. Průzkum pro tunely Radlice realizovaný z průzkumné štoly*. Praha: 2014

- [10] *Geotechnika: Geotechnický monitoring* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/predmety/geotechnicky-monitoring/studijni-materialy/podklady-pro-prednasky/>
- [11] *Geotechnika: Modelování v geotechnice* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/predmety/modelovani-v-geotechnice/studijni-materialy/podklady-pro-prednasky/>
- [12] *Tunel 3/2011* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_3_11.pdf
- [13] *Inženýrsko-geologický průzkum* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/02-IG-pruzkum_prednaskovy-text.pdf
- [14] *TP 76. Část C: Geotechnický průzkum pro navrhování a provádění tunelů pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, leden 2008
- [15] *Tunel 3/2003* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_3_03.pdf
- [16] *Technologie ražby – průzkumná štola 0079 Špejchar – Pelc - Tyrolka* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://mo.ttnz.cz/wordpress/wp-content/uploads/dokumenty/Technologie_razby_-_Pruzkumna_stola_0079_Spejchar_-_Pelc_-_Tyrolka.pdf
- [17] *Průzkumná štola pro tunel Blanka* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.satra.cz/pruzkumna-stola-pro-tunel-blanka/>
- [18] *Tunel 2/2006* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_2_06.pdf

[19] *Tunel 4/2006* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_4_06.pdf

[20] *Tunel 4/2014* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2014/tunel_4_14.pdf

[21] *Tunely a podzemné stavby, Žilina 2015: Průzkumná štola tunelu Radlice v Praze.*

[22] *Tunel 1/2016* [online]. [cit. 2016-11-21]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2016/160303_tunel_def.pdf

[23] Stavba č.: 9567: *Radlická radiála JMZ – Smíchov Podrobný inženýrskogeologický průzkum, Čtvrtletní etapové zprávy (Průzkumné práce).* PUDIS a.s., Praha 2013 - 2015