

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Radek Onysko

Hoek – Brownova obálka pevnosti a důležitost triaxiálních zkoušek v projektu hlubinného úložiště radioaktivního odpadu

Hoek – Brown failure criterion and importance of triaxial testing in a project of deep geological repository

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Josef Rott

Praha, 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 20. 8. 2018

Bc. Radek Onysko

.....

Poděkování

Děkuji Ing. Josefu Rottovi za odborné vedení diplomové práce a cenné rady. A Mgr. Matěji Petružálkovi, Ph.D. z Geologického ústavu AV ČR, v. v. i., bez kterého by nebylo možné provést laboratorní zkoušky a tato práce by nespátřila světlo světa.

V Praze, 20. 8. 2018

Bc. Radek Onysko

.....

Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí plně definované Hoek – Brownovy obálky pevnosti na vzorcích granodioritu z místa potencionálního úložiště radio. odpadu – Březový potok. Zabývá se provedením a vyhodnocením triaxiálních zkoušek. Stanovením parametrů HB obálky, jak pro intaktní horninu, tak pro horninový masiv, včetně zhodnocení dostupnosti a kvality potřebných dat. Zkoumá alternativní způsoby stanovení parametrů HB obálky, hlavně parametru m ; a GSI. Všechny stanovené parametry jsou porovnány s výsledky ze zahraničních projektů úložišť. Práci zakončuje jednoduchý numerický model úložiště se stanovenými daty.

Abstract

Goal of this paper is defining Hoek – Brown failure criterion for samples of granodiorite from possible site of Czech deep geological repository – Brezovy potok. Paper includes triaxial testing, defining HB failure criterion for intact rock, rock massif and evaluation of available data. Other methods for defining parameters of HB failure criterion (eg. GSI and m_i) are also explored. Comparisons for all parameters and data are given. Paper is concluded with simple numerical model, using results from laboratory testing and literature review.

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Problematika úložišť radioaktivního odpadu	1
2.1.	Úložiště v Evropě	2
2.2.	Francie	3
2.3.	Švédsko	4
2.4.	Finsko	5
2.5.	Belgie.....	6
2.6.	Německo.....	7
2.7.	Švýcarsko	8
2.8.	Projekt úložiště v České republice	9
3.	Lokalita.....	12
3.1.	Důvod výběru	12
3.2.	Základní informace.....	13
3.3.	Geologické poměry	13
3.4.	IG podmínky.....	15
3.5.	Hydrogeologie	16
3.6.	Vrtná prozkoumanost a archivní data.....	16
3.7.	Podoblast – „Průzkumné vrty“	16
3.8.	Podoblast – Srovnávací vrty	17
3.9.	Podoblast – Březový potok.....	18
4.	Laboratorní část – intact rock	19
4.1.	Makroskopický popis horniny a vzorky	20
4.2.	Fyzikálně popisné vlastnosti.....	23
4.3.	Ultrazvukové prozařování a dynamické elastické vlastnosti.....	23
4.4.	Koeficient filtrace.....	24
4.5.	Zkoušky v prostém tlaku	25
4.6.	Triaxiální zkoušky	28
4.7.	Zkoušky v příčném tahu - Brazílské zkoušky	32
4.8.	Hoek – Brownova obálka pro intact rock	33
4.9.	M_i	34
4.10.	Porovnání výsledků	41
4.11.	Finsko	41

4.12.	Švédsko	43
4.13.	Švýcarsko	44
4.14.	Diskuze	46
5.	Horninový masiv	47
5.1.	Parametr D.....	47
5.2.	Geological strength index (GSI).....	48
5.3.	RQD +(JCond ₈₉ , JCond ₇₆ , Jr+Ja).....	49
5.4.	Další metody určení RQD	51
5.5.	Dostupná data	51
5.6.	Parametry m_b , s , a	53
5.7.	Kompletní HB obálka pro masiv	53
5.8.	Pevnostní charakteristika masivu – Rock mass strength	54
5.9.	Porovnání výsledků	55
5.9.1.	Finsko	55
5.9.2.	Švédsko	56
5.10.	Diskuze	57
6.	Napětí	57
6.1.	Tenzor napětí	58
6.2.	Význam napětí v Inženýrské geologii	60
6.3.	Stress to strength ratio	60
6.4.	Určování napjatosti horninového masivu	61
6.5.	Základní princip.....	62
6.6.	Měření ve vrtu – HF a příbuzné metody.....	63
6.7.	Měření ve vrtu – relaxační metody	64
6.8.	Další metody.....	65
6.9.	Dostupná data pro lokalitu Březový potok	65
6.10.	Porovnání výsledků	67
6.11.	Diskuze	68
7.	Numerický model	69
7.1.	Výběr programu pro numerické modelování, základní parametry a konstituční model ...	69
7.2.	Vstupní data.....	69
7.3.	Výpočetní scénáře	70
7.4.	Výsledky a diskuze.....	71
8.	Závěr.....	74
9.	Použitá literatura.....	76

1. Úvod

V posledních letech dochází k velkým pokrokům v projektu vybudování úložiště radioaktivního odpadu v České republice. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) provádí průzkumy na potencionálních lokalitách v ČR a obecný výzkum přidružených technologií je také v plném proudu.

Cílem této práce je obecně představit problematiku ukládání radio. odpadů a zahraniční projekty úložišť. Získat kompletní Hoek – Brownovu obálku pevnosti pro granodiorit vyskytující se na lokalitě Březový potok, na základě už provedených zkoušek Petružálkem (2017). Získat HB obálku, jak pro intaktní horninu, tak i celý granodioritový masiv v nejbližším okolí této lokality. Posoudit, zda jsou všechna potřebná data v tuto chvíli dostupná a v případě, že nejsou, využít alternativních postupů na základě literatury.

Po laboratorních zkouškách je cílem stanovit tenzor napětí a jeho orientaci na lokalitě Březový potok. Zhodnotit, zda jsou pro to dostupná všechna potřebná data a posoudit jejich kvalitu. Všechny výsledky dále konfrontovat s výstupy ze zahraničních projektů HÚ, a tak ověřit, zda jsou výsledky realistické.

Všechny získané informace využít pro konstrukci jednoduchého numerického modelu úložiště. Ukázat, jak velkou roli hrají kvalitně provedené laboratorní zkoušky v projektu stavby úložiště. Zda je nutno definovat kompletní HB obálku pevnosti, nebo zda ji stačí pouze odhadnout, protože jiné faktory mají daleko větší váhu.

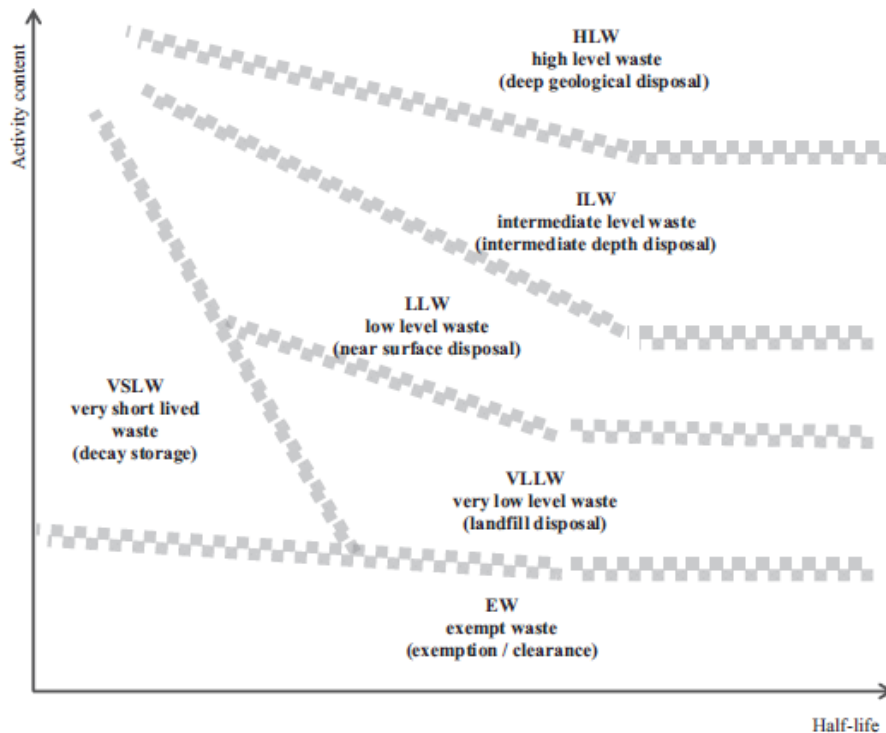
2. Problematika úložišť radioaktivního odpadu

V této kapitole si obecně představíme problematiku ukládání radioaktivního odpadu. Spolu s obecným přehledem zemí, které pracují na vybudování svého hlubinného úložiště, či provádějí průzkum lokalit a testování technologie za tímto účelem.

S rozvojem jaderné energetiky přichází i otázka, co s vyhořelým jaderným palivem. V současné době jsou v ČR v provozu 2 jaderné elektrárny: JE Temelín a JE Dukovany. Obě tyto elektrárny každý rok vymění jednu čtvrtinu svého paliva (palivových tyčí) za palivo nové. Vyhořelé palivo je pak skladováno ve speciálních „bazénech“ v areálu samotných elektráren (*www1.*). Tyto „vymírací“ bazény slouží k prvotnímu uložení radioaktivního odpadu. V bazénech dochází k chlazení vyhořelého paliva až do doby, kdy může dojít ke přemístění do meziskladu. Celková doba, kdy je palivo ve vymíracím bazénu, může dosáhnout až 10 let (*www1.*). V meziskladu je palivo bezpečně uloženo do doby, než je převezeno k trvalému uložení, nebo k potencionálnímu přepracování (*www1.*). Problém s trvalým uložením vyhořelého paliva je v současné době velmi diskutovaným tématem v celé Evropě, neboť všechny státy řeší, co s vyhořelým palivem a projekt evropského, či snad mezinárodního trvalého úložiště není v současné době na obzoru (*SÚRAO 2017*).

Vyhořelé palivo z jaderných elektráren není jediným typem radioaktivního odpadu. Radioaktivní odpad je generován také nemocnicemi a průmyslem. Dle klasifikace Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) z roku 2009 se vyčleňuje 6 typů radioaktivního odpadu: Exempt waste (EW), Very short lived waste (VSLW), Very low level waste (VLLW), Low level waste (LLW), Intermediate level waste (ILW), High level waste (HLW) (*IAEA 2009*). Na Obr. 1 můžeme vidět rozdělení na základě aktivity a

poločasu rozpadu. Toto dělení není používáno, v této podobě, ve všech státech, jedná se spíše o návod na dělení radioaktivního odpadu. Různé státy dělí odpad dle různých kritérií, například podle vyzařovaného tepla – Německo.



Obrázek 1 - Klasifikace radioaktivního odpadu, převzato z IAEA (2009)

Ukládání do podzemních úložišť je prováděno v případě posledních 3 kategorií s tím, že v případě LLW a ILW dochází k uložení v menších hloubkách (desítky až první stovky metrů) (IAEA 2009). Ukládání HLW by mělo být prováděno v hloubkách okolo 400–500 metrů (může to být i méně např. 225 m – Belgie) v tzv. deep geological repository (HÚ). V případě uložení odpadů do hlubinných úložišť je problematických několik věcí. Teplo generované odpadem a jeho působení na okolní horninu. Zabránění přístupu podzemní vody k uloženému odpadu, aby nedošlo k transportu radionuklidů.

2.1. Úložiště v Evropě

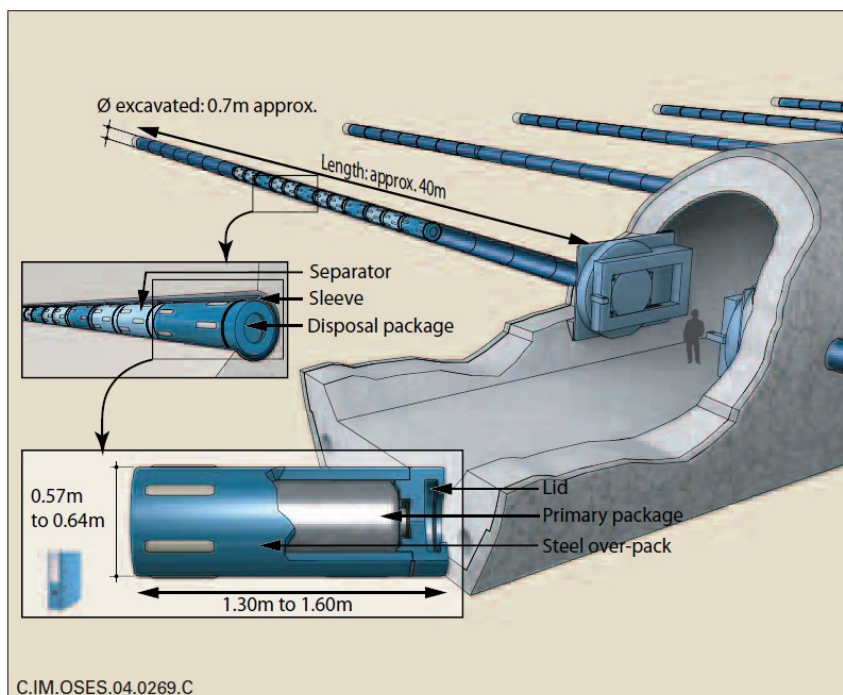
Nejdále ve výzkumu a budování HÚ jsou v Evropě: Francie, Švédsko a Finsko. Na následujících stranách budou programy jednotlivých zemí ve zkratce představeny. Po těchto zemích bude představen program a postup Belgie, Německa a Švýcarska, které nejsou sice tak v pokročilém stádiu, ale rozhodně stojí za zmínku.

2.2. Francie

Základy pro výzkum, vývoj a vybudování HÚ ve Francii byly položeny na podzim roku 1991, kdy byl schválen zákon o patnáctiletém průzkumném projektu týkající se problematiky ukládání radioaktivních odpadů (Farin et al. 2016). Z 30 potenciálních lokalit pro vybudování podzemní testovací laboratoře byly v roce 1993 vybrány celkem 3 lokality: granitoidní masiv v departementu Vienne, 500 km JZ od Paříže; jílová formace v pařížské pánvi na pomezí departementů Meuse a Haute – Marne a jílová formace v Departementu Gard, 720 km J od Paříže (Farin et al. 2016). V roce 1998 byla vybrána druhá lokalita, jako místo pro vybudování podzemní laboratoře (Farin et al. 2016). Důvodem pro zamítnutí dvou zbývajících lokalit byla: velikost masivu v případě první lokality a důvodné obavy ohledně geodynamické stability v dlouhodobém měřítku v případě poslední lokality (Farin et al. 2016). Organizace, která se o výzkum a vše ohledně HÚ stará se nazývá ANDRA.

Od roku 1999 probíhá výzkum na lokalitě Meuse/Haute – Marne a v roce 2005 byla vydána zpráva (tzv. Dossier 2005) o proveditelnosti HÚ v této jílové formaci (Andra 2005a, Farin et al. 2016). Testovací ražba na lokalitě Meuse/Haute – Marne probíhala v „argilitech“, sedimentárních horninách charakteru jílovců. Tyto horniny mají výhodu ve své velice nízké propustnosti (10^{-12} m/s) a relativně dobré pevnosti (Andra 2005a, Farin et al. 2016). Francie také studuje teoretickou proveditelnost HÚ v granitoidních horninách, které jsou pro tento účel velice vhodné, a však kvůli chybějící testovací lokalitě je tento výzkum pouze na teoretické úrovni (Andra 2005b).

V současné době je úložiště plánováno jako reversibilní (uložený odpad bude případně možno znovu vyjmout) a ukládání odpadů by mělo probíhat do horizontálních, vystrojených vrtů o průměru 70 cm (v případě odpadů generujících teplo) (Andra 2005a). Přes velice nízkou propustnost okolních jílovců, bude vyhořelé palivo v ukládacích vrtech odděleno od okolní horniny bobtnavým jílem (Andra 2005a). Schématický model ukládání odpadů do vertikálních vrtů můžeme vidět na Obr. 2.



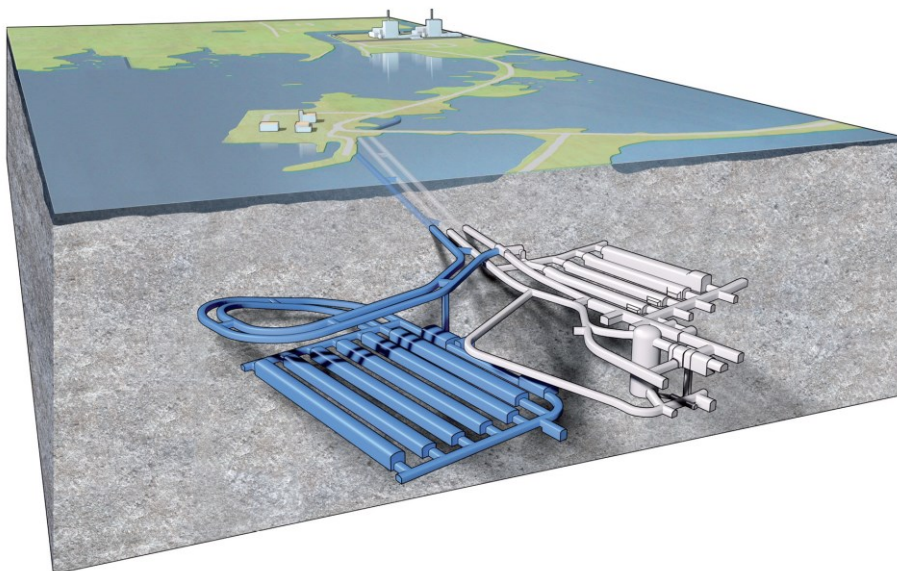
Obrázek 2- Schématický model ukládání do vertikálních vrtů v plánovaném francouzském úložišti, převzato z Andra (2005a)

V roce 2010 bylo zvoleno místo pro vybudování HÚ, finální lokalita se nachází 5 km severně od testovací podzemní laboratoře Meuse/Haute – Marne (*Farin et al. 2016*).

2.3. Švédsko

Ve Švédsku se o výzkum a vybudování stará organizace Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Důležité jsou 2 lokality: Forsmark v okolí stejnojmenného města a lokalitou Laxemar-Simpevarp (*SKB 2009*). Obě lokality leží na granitoidních či metagranitoidních horninách. Na lokalitě Laxemar se nachází in-situ testovací laboratoř The Äspö Hard Rock Laboratory, kde probíhá testování velké části použitých technologií (*SKB 2009*). Lokalita Forsmark (region) je důležitá, neboť už od roku 1988 hostí úložiště pro SFR (švédský ekvivalent SLW – short lived waste, dle dělení IAEA nejspíše LLW) a je také plánovaným místem pro úložiště vyhořelého paliva (*Lundqvist and Hammarström 2016*). Posledním typem odpadu, který bude ve Švédsku ukládán je SFL (švédský ekvivalent LLW – long lived waste, dle dělení IAEA nejspíše HLW), toto úložiště je plánováno jako poslední a v této chvíli je pouze ve fázi konceptu (*Lundqvist and Hammarström 2016*).

Forsmark SFR, nacházející se blízko města Östhammar je jedinečný typ úložiště, kde probíhá ukládání LLW a ILW. Samotné úložiště je v blízkosti JE Forsmark. Jedinečné je kvůli tomu, že je vybudováno pode dnem moře (ode dna je odděleno 50-60 metry granitu) (*Lundqvist and Hammarström 2016*). Do budoucna je plánováno rozšíření tohoto úložiště, model úložiště s konceptuálním rozšířením můžeme vidět na Obr. 3. Žádost o udělení licence pro rozšíření SFR byla podána v roce 2014.



Obrázek 3- Model úložiště Forsmark SFR, šedá barva – aktuální stav, modrá barva – konceptuální rozšíření, převzato z *Lundqvist and Hammarström (2016)*

Úložiště pro vyhořelé palivo se bude nacházet také na lokalitě Forsmark, jižně od stejnojmenné JE (*Lundqvist and Hammarström 2016*). Na Obr. 4 můžeme vidět vzájemnou polohu JE Forsmark, Forsmark SFR a budoucího úložiště vyhořelého paliva (v případě úložišť jejich nadzemní části).



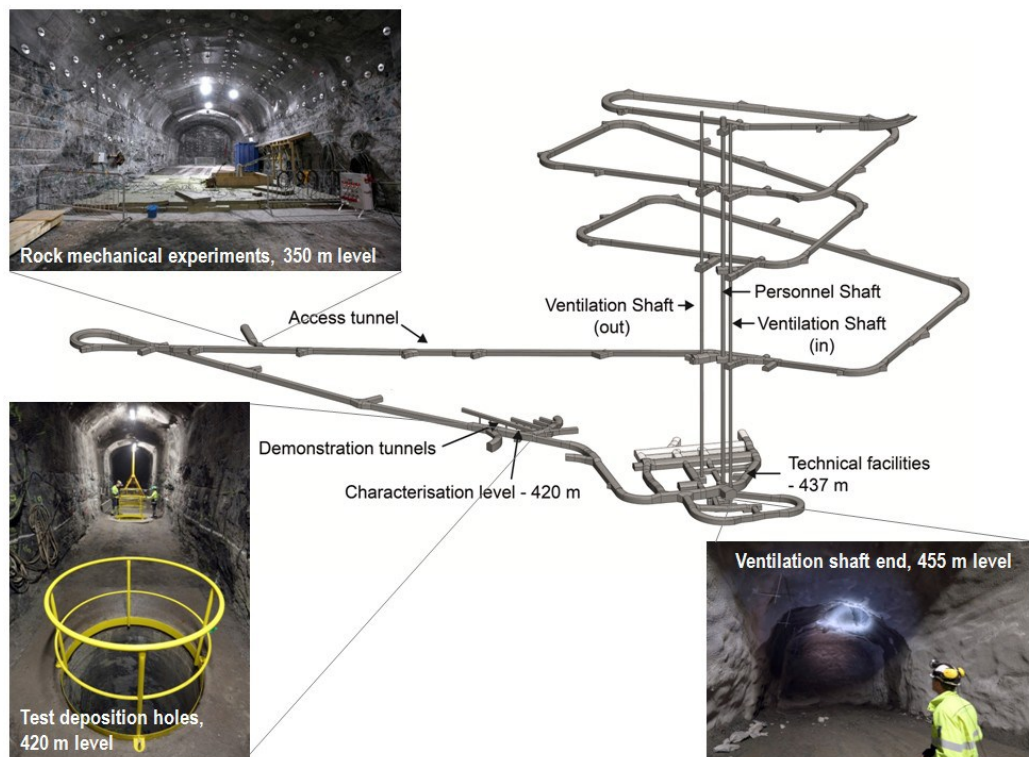
Obrázek 4- lokalita Forsmark a její části; JE Forsmark – jaderná elektrárna; Forsmark SFR – fungující úložiště LLW a ILW; earth.google.com/web/. – upraveno

Ukládání vyhořelého paliva bude prováděno metodou KBS-3, která se vyznačuje zavařením vyhořelého paliva do měděného „kontejneru“, který je následně uložen do vertikálních ukládacích vrtů a zatěsněn speciálním bentonitem (*Lundqvist and Hammarström 2016*). Po zaplnění konkrétní části úložiště bude proveden back-fill přístupových tunelů bentonitovou směsí s drcenou horninou. Ukládání je plánováno v hloubce zhruba 470 metrů a převažující horninové typy na lokalitě jsou šedé až červené stejnozrné metagranitoidy (*Lundqvist and Hammarström 2016*). Žádost o udělení licence byla podána v roce 2011.

2.4. Finsko

Ve Finsku má veškerou agendu na starosti organizace POSIVA OY. V roce 2001 finský parlament schválil metodiku a místo, kde bude provedeno uložení vyhořelého paliva z finského jaderného programu. Tímto místem je lokalita Olkiluoto na západním pobřeží Finska (*Lahti 2016*). Součástí schválené metodiky bylo rozhodnutí, že uložení bude prováděnou švédskou metodou KBS-3 (*Lahti 2016*). Hloubení podzemní testovací laboratoře ONKALO bylo zahájeno v 2004 ([www2.](http://www2.onkalo.fi)). Samotná podzemní laboratoř bude součástí podzemních prostor pro finální úložiště a na Obr. 5 můžeme vidět současný plán podzemních prostor lokality ONKALO. Součástí podzemní laboratoře jsou 4

demonstrativní tunely s deseti experimentálními ukládacími vrty v hloubce 420 m (na Obr 5. tzv. „characterisation level“), které byly vyraženy způsobem, kterým bude prováděno finální ukládání (Lahti 2016).



Obrázek 5- Současný plán podzemních prostor na lokalitě Onkalo, převzato z Lahti (2016)

Tunely lokality ONKALO byly vyraženy metodou drill and blast, šachty byly vyraženy metodou „raise boring“ (Lahti 2016). Z hlediska geologie jsou na lokalitě ONKALO převládajícími horninovými typy pegmatitický granit a rula (veined gneiss) (Hakala a Valli 2016).

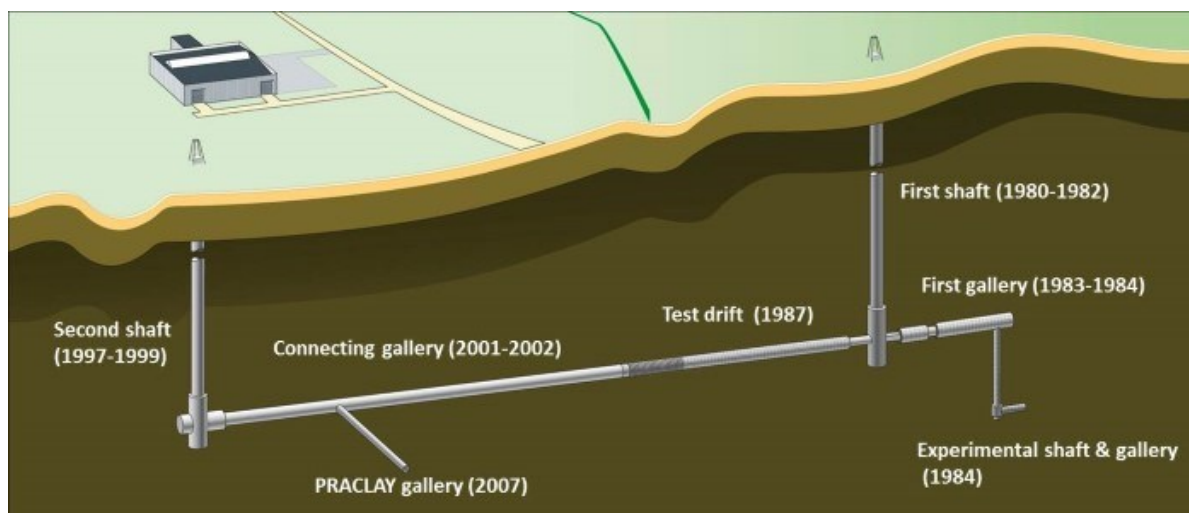
Na podzim roku 2015 byla udělena licence pro finální výstavbu úložiště na lokalitě Olkiluoto. Podzemní prostory ONKALO budou využity jako přístupová část finálního úložiště (www2., Lahti 2016).

2.5. Belgie

Program belgického úložiště je zajímavý, neboť je plánováno do malé hloubky (méně než 300 m) a je projektováno v jílech (Boom Clay Formation), ne v krystalických nebo sedimentárních horninách (Finsko, Švédsko atd.) (www3.). V Belgii má na starost výzkum organizace SCK.CEN s testovací lokalitou HADES underground laboratory, která se nachází u města Mol v Belgii. Testovací lokalita HADES byla první podzemní laboratoří, jež zkoumala proveditelnost hlubinného ukládání rad. odpadů v Evropě. Je v provozu od roku 1980, kdy byla vyražena první šachta a od té doby došlo k mnoha rozšířením (www3.) viz Obr. 6.

Belgie v současné době nemá vybranou žádnou přesnou lokalitu pro finální úložiště, pouze se počítá s tím, že HÚ bude vybudováno v jílech shodných s těmi na testovací lokalitě HADES (www4.).

Metodika ukládání počítá s ukládáním do vertikálních vrtů s inženýrskou multi-bariérovou ochranou (back-fill atd.) (www4.).



Obrázek 6- Lokalita HADES a její rozšiřování během let, převzato z www3.

2.6. Německo

Německo má značné zkušenosti s ukládáním radioaktivního odpadu, a ne všechny jsou pozitivní. V souvislosti s radioaktivním odpadem je nutno zmínit 4 lokality: Asse II., Morsleben, Konrad a lokalitu Gorleben.

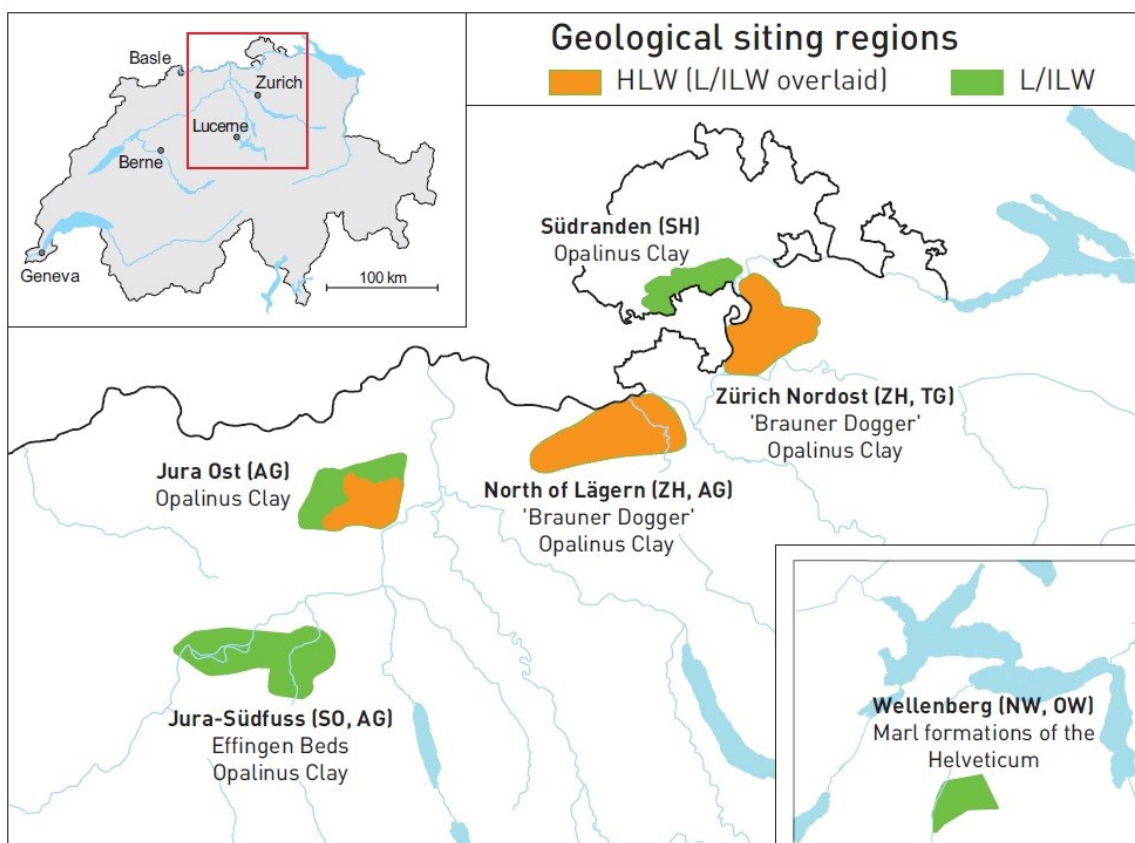
Asse II. a Morsleben jsou bývalé doly na kamennou sůl a potaš. Na těchto lokalitách došlo v minulosti k testovacímu uložení radioaktivních odpadů tříd LLW, ILW (www5., www6.). Na lokalitě Asse II. docházelo k experimentálnímu ukládání mezi léty 1967–1978, v hloubkách 511, 725 a 750 metrů (www5.). Tato lokalita je problematická z důvodů průsaku vody do lokality bývalého dolu a celkové nestability způsobené tíhou nadloží a blízkosti jednotlivých vydobytých komor (www5.). V roce 2009 bylo rozhodnuto, že tato lokalita má být sanována a poté uzavřena (www5.). Morsleben je taktéž bývalý důl na kamennou sůl a potaš. Mezi léty 1971–1991 zde byl ukládán radioaktivní odpad tříd LLW a ILW (www6.). Na rozdíl od předchozí lokality, je však důl Morsleben stabilní, s deformacemi do 1 mm/rok a bez problémů s vodou (www6.). Bylo rozhodnuto, že důl má být do budoucna uzavřen a zabezpečen (back-fill 75 % dolu speciálním betonem) (www6.).

Lokalita Konrad je v této době pořád ve fázi výstavby. Na rozdíl od dvou předchozích lokalit se jedná o bývalý důl na železnou rudu s příznivými geologickými podmínkami (www7.). Na této lokalitě by mělo dojít k ukládání radioaktivních odpadů, které negenerují zbytkové teplo (www7.). Tato lokalita je prvním úložištěm v Německu, jež bylo schváleno dle nových bezpečnostních pravidel spolkové vlády (www7.).

Poslední lokalita, lokalita Gorleben, je průzkumný důl v solném pni, jež je od 80 let zkoumán jako místo pro potenciální úložiště radioaktivních odpadů. Od roku 2014 je průzkum na této lokalitě pozastaven a důl je veden v režimu minimálního provozu (www8.).

2.7. Švýcarsko

Švýcarský projekt na výstavbu úložiště radioaktivního odpadu má na starost organizace NAGRA. Národní projekt počítá s vybudováním 2 samostatných úložišť: úložiště pro radioaktivní odpad tříd LLW/ILW a úložiště pro HLW (Claudel et al. 2016). V současné době se na výzkumu proveditelnosti podílí 2 testovací, podzemní laboratoře: Grimsel Test Site a Mont Teri (Claudel et al. 2016). Grimsel Test Site je situováno v granitoidních horninách a Mont Teri v tzv. Opalinus clay, což jsou jílovce s velice nízkou propustností. Dle posledního vývoje by úložiště pro HLW mělo být vybudováno právě v těchto jílovcích a úložiště pro LLW/ILW tento typ horniny také preferuje (Claudel et al. 2016). Samotný výběr lokalit pro potenciální vybudování HÚ je vícestupňový a velice složitý, což je dáno tím, že nejsou vybírány přímo jednotlivé lokality, ale spíše vhodné oblasti v rámci jednotlivých kantonů pro každé z úložišť viz Obr. 7.



Obrázek 7- Zkoumané regiony v rámci Švýcarska pro jednotlivá úložiště včetně horniny, kantony jsou uvedeny v závorce, převzato z Claudel et al. (2016)

2.8. Projekt úložiště v České republice

Rozvoj projektu úložiště radioaktivního odpadu v ČR sahá do roku 1997, kdy bylo vytvořeno SÚRAO (Správa úložišť radioaktivního odpadu), státem zřízená organizace, která má tuto problematiku na starosti (Slovák 2016). Dle v současné době platného plánu jsou důležitými roky (Slovák 2016, www9.).

2018 – výběr 4 lokalit

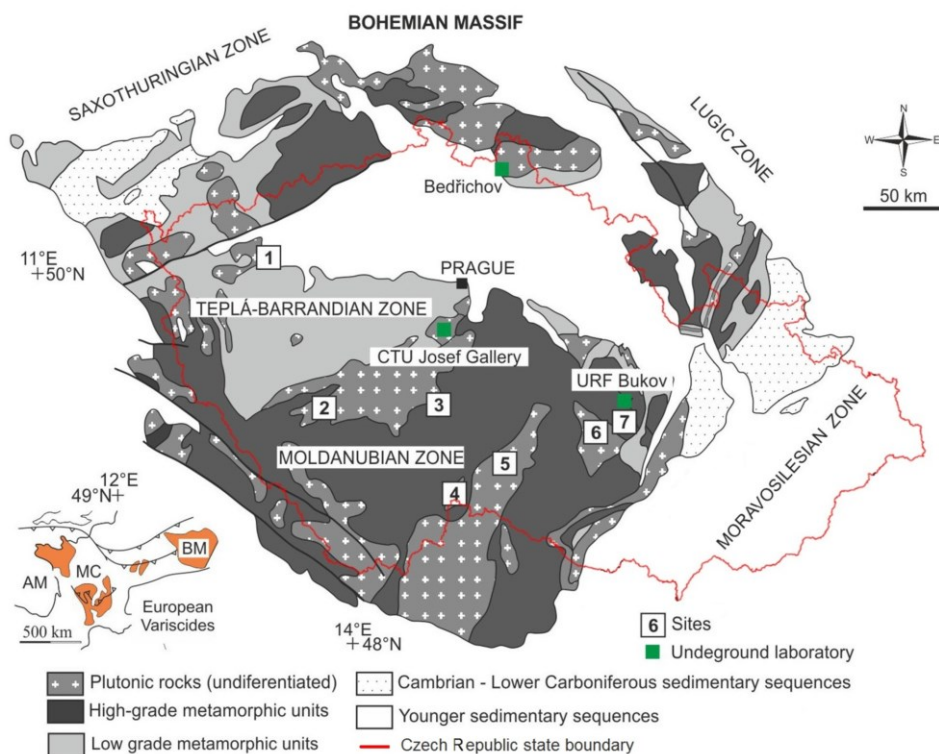
2020 – výběr 2 lokalit (finální a záložní)

2025 – výběr konečné lokality

2050 – zahájení výstavby hlubinného úložiště

2065 – zahájení ukládání

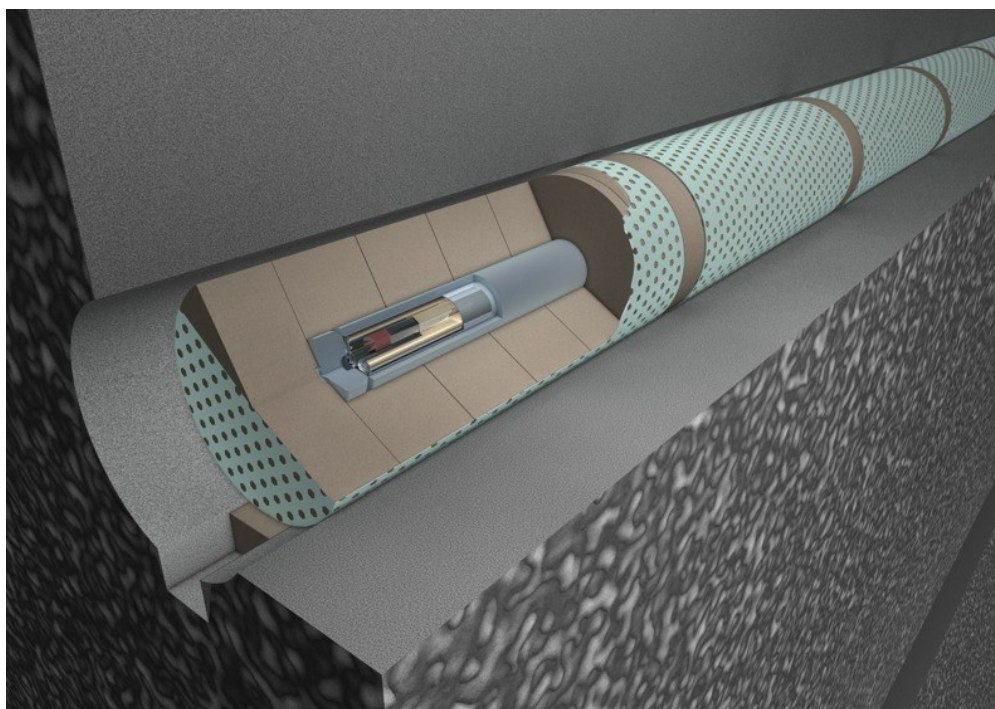
V současné době je zkoumáno celkem 9 potenciálních lokalit (SÚRAO 2017). Jedná se lokality: Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora a Magdaléna (www10.) Poslední 2 lokality by se měly nacházet v blízkosti stávajících jaderných elektráren (Dukovany, Temelín). Na všech lokalitách probíhá intenzivní průzkum. V roce 2017 probíhalo například inženýrsko-geologické mapování na lokalitě Hrádek. Všech sedm vyjmenovaných lokalit, spolu s podzemními laboratořemi můžeme vidět na Obr. 8



Obrázek 8- Český masiv a poloha jednotlivých lokalit; 1 – Čertovka, 2 – Březový potok, 3 – Magdaléna, 4 – Čihadlo, 5 – Hrádek, 6 – Horka, 7 – Kraví hora; převzato ze Slovák (2016).

V České republice se na výzkumu souvisejícího s výstavbou HÚ podílejí celkem 3 podzemní laboratoře. Bedřichov, štola Josef a podzemní laboratoř Bukov (SÚRAO 2017, Slovák 2016). Podzemní laboratoř Bedřichov se nachází blízko Krušných hor, v Krkonošsko – Jizerském plutonu. Laboratoř byla vyražena z části za použití TBM a z části pomocí metody drill and blast. Výzkum tak zahrnuje zkoumání deformací a vliv metody ražby na okolní horninu v čase (Slovák 2016). Štola Josef, bývalý průzkumný důl na zlato, dnes ve spravovaný ČVUT (České vysoké učení technické) je od roku 2007 využíván jako testovací podzemní laboratoř. Laboratoř je umístěna v místě s pestrou geologií zahrnující: slabě přeměněné vulkano-sedimentární horniny (tuf, tufit, ryolit, basalt) a intruzi mladších granitoidních hornin (Slovák 2016). Výzkum je zaměřen na chování materiálů souvisejících s projektem HÚ (např. bentonit) a probíhá často ve spolupráci se zahraničními laboratořemi např. Mont Terri či přímo organizací SÚRAO. Nejnovější podzemní laboratoř (PVP) Bukov, byla vybudována částečně v prostorách (likvidovaného) uranového dolu Rožná v blízkosti Žďáru nad Sázavou. Nachází se v hloubce 550 metrů a zkoumá chování horninového masivu za podmínek, které budou panovat v samotném HÚ (tlak atd.) (SÚRAO 2017). Podzemní prostory byly vyraženy metodou drill and blast s hladkým výlomem (SÚRAO 2016). V současné době je (PVP) v experimentálním provozu, který by měl trvat až do roku 2025. Během této doby jsou hlavními cíli: získávání dat z referenční hloubky úložiště, testování technických řešení, úprava metodik pro HÚ a získání know-how (SÚRAO 2016).

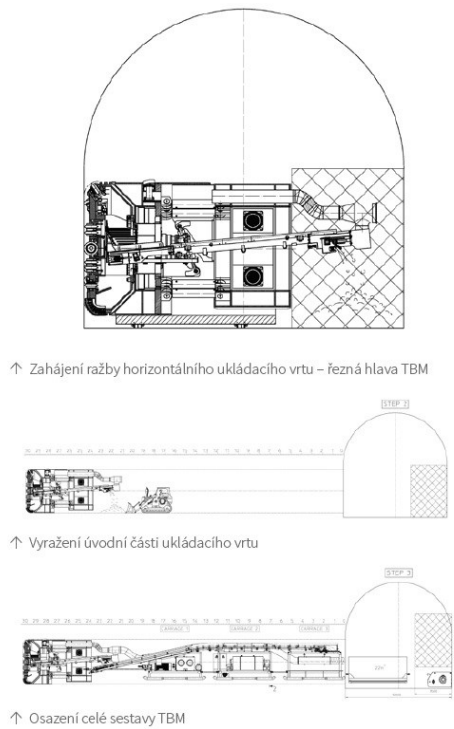
Projekt HÚ v České republice v současné době počítá s multi-bariérovým systémem ukládání do horizontálních úložných vrtů s těsněním tvořeným lisovaným bentonitem a radioaktivním odpadem uzavřeným do ocelového „super-kontejneru“ (Slovák 2016) viz Obr 9.



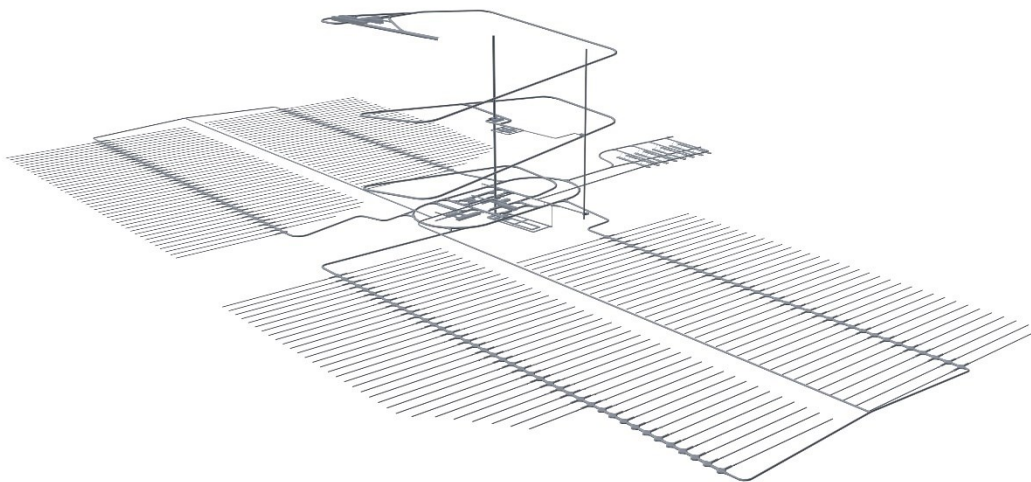
Obrázek 9- Vizualizace uložení super-kontejneru a bentonitového těsnění v ukládacím vrtu, převzato z www10.

Ze dvou metod technologií ražby (drill and blast, použití TBM), je současné době preferováno využití razících štítů (ukládací chodby a studny), neboť tato technologie ražby zajišťuje minimální porušení masivu v okolí výrubu (porušená zóna dosahuje při použití TBM do vzdálenosti cca 10 % šířky výrubu

(SÚRAO 2017). Pro menší průměry výrubu dosahuje hodnot do 100 mm (SÚRAO 2017). Jisté části podzemních prostor budou raženy metodou drill and blast, neboť počáteční nároky na prostor jsou v případě použití TBM vysoké. Navrhovanou metodiku ražby ukládacích tunelů a obecnou vizualizace podzemních prostor můžeme vidět na Obr. 10 a Obr. 11.



Obrázek 10- Navrhovaná metodika ražby ukládacích vrtů, převzato z SÚRAO (2017)



Obrázek 11- Obecná vizualizace podzemních prostor úložiště, převzato z www10.

Doprava ukládaného materiálu v rámci podzemních prostor až k úložnému vrtu bude, dle současných plánů probíhat pomocí speciálních kolejových vozidel (Slovák 2016).

3. Lokalita

3.1. Důvod výběru

Jak už bylo nastíněno v minulé kapitole, v České republice přichází v úvahu 9 potenciálních míst (SÚRAO 2017), kde může být hlubinné uložení radioaktivního odpadu (HÚ) vybudováno. Jedná se o lokality: Březový potok (granodiorit), Čertovka (granit), Čihadlo (granit), Horka (Durbachit), Hrádek (granit), Kraví hora (granulit, migmatit) a Magdaléna (syenit) (www10.). Zbývající 2 lokality, by se měli nacházet v okolí stávajících jaderných elektráren Temelín a Dukovany, v této práci se jimi nebudu zabývat. Všechny tyto lokality se nacházejí z hlediska regionální geologie v „krystaliniku“ (komplex metamorfovaných či vyvřelých hornin, hlavně granitoidů, jež tvoří podklad mladším uloženinám – sedimentům či platformním uloženinám), horninám značného staří jejichž vlastnosti by se neměly do budoucna nijak výrazně měnit. Tyto horniny jsou díky své chemické, a hlavně mechanické stálosti ideální pro dlouhodobé uložení nebezpečných odpadů.

Konečný výběr místa pro HÚ, bude záležet na mnoha faktorech mimo vlastní technické parametry horniny. Jedná se zvláště o: přijatelnost lokality veřejností, technická možnost vybudování povrchového areálu HÚ a dopravní obslužnost (www10.).

V této práci byla lokalita vybrána dle jiných parametrů. Výběr byl prováděn vylučovací metodou. Lokalitu Kraví hora jsme vyřadili z důvodu výrazné anizotropie mechanických vlastností metamorfovaných hornin s vyvinutou foliací (Hakala a Valli 2016; Petružálek 2017). Tato anizotropie by v důsledku znamenala výrazně vyšší nejistotu zjištěných dat v závislosti na orientaci vzorku vůči foliaci. Ze zbývajících pěti lokalit byla nakonec vybrány ty, kde bylo k dispozici nejvíce hlubokých archivních vrtů a zároveň byly k dispozici vrty v širším okolí, jež potvrzovaly homogenitu masivu. Tyto dvě lokality byly Březový potok a Hrádek. Z těchto dvou byla nakonec dána přednost lokalitě Březový potok, neboť na lokalitě Hrádek se vyskytují 2 rozdílné typy granitu, které se liší svojí texturou a pravděpodobně tedy i svými pevnostními charakteristikami.

3.2. Základní informace

Lokalita Březový potok leží blízko vesnice Defurovy Lažany spadající pod obec Chanovice, která leží 3,5 km východním směrem. Obec leží v okrese Klatovy v Západočeském kraji. Z hlediska počtu obyvatel se jedná o velice malou vesnici se 62 obyvateli k roku 2012 ([www11.](#)). Na území obce a jejím okolí se nachází historicky zajímavé lokality například zámek a zámecký areál v Chánovicích, zámek v Blatné, či zámek a muzeum v nedalekých Horažďovicích ([www12.](#)).

Vzorek horniny z této lokality pocházel z přilehlého lomu, kde probíhala těžba kamene pro dekorační účely. Z důvodu dochovaných archivních vrtů, které budou použity dále v práci, byla vybrána právě tato lokalita. Bývalý lom, odkud vzorek pochází, je situován západně od obce v zalesněném svahu a v současné době je zatopený viz Obr. 12.

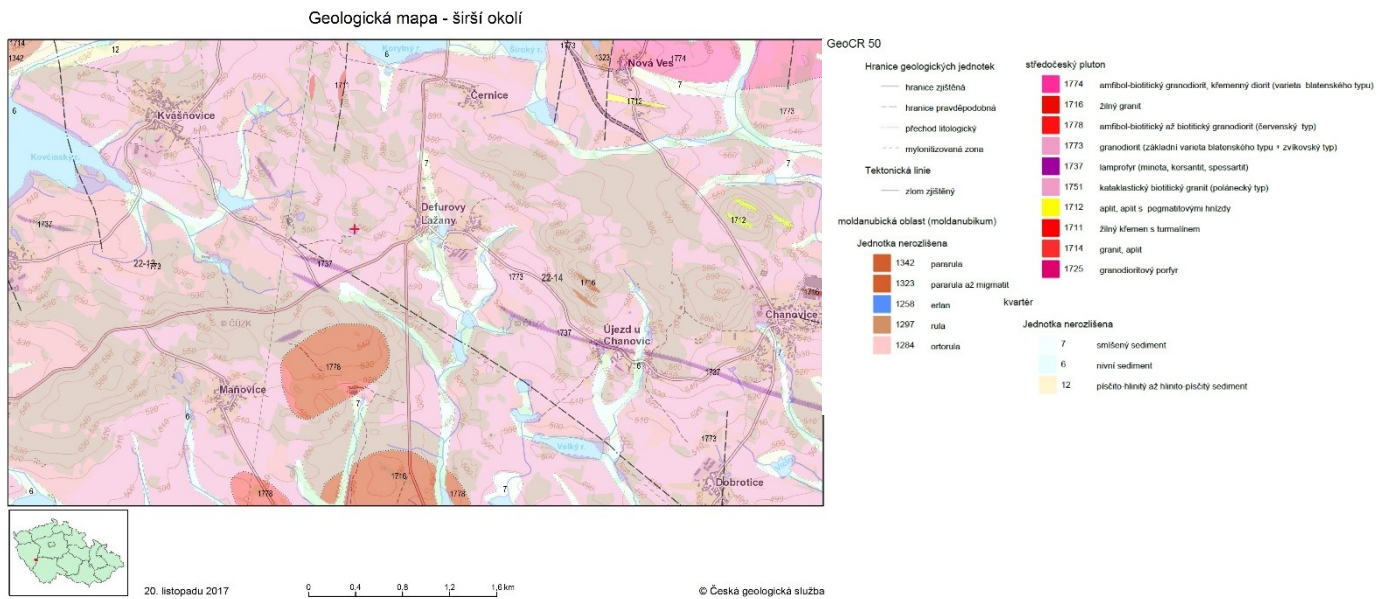
Defurovy Lažany - základní mapa



Obrázek 12- Základní topografická mapa zájmové lokality 1:10 000; červený kříž označuje místo bývalého lomu; Základní mapa České republiky 1:10000, [geportal.cuzk.cz](#)

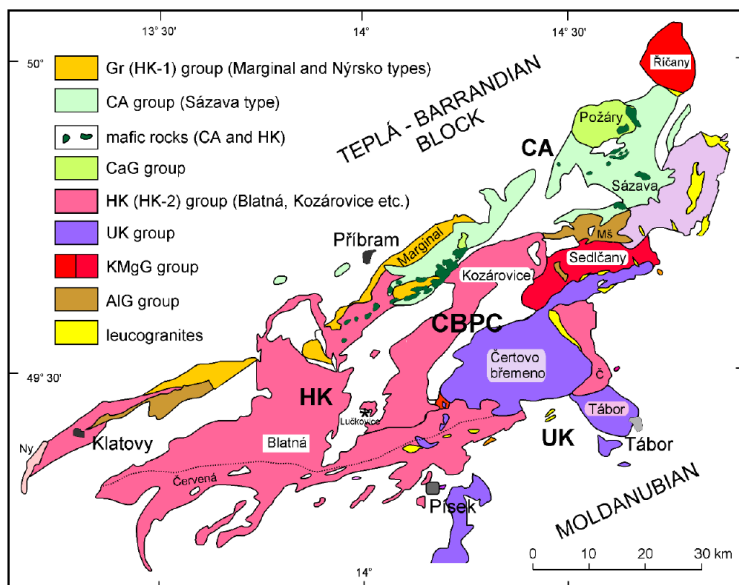
3.3. Geologické poměry

Z geologické mapy 1:50 000 (Obr.13) můžeme vyčíst, že těleso granodioritu je v okruhu minimálně 1,5 km od Defurových Lažan homogenním celkem (tuto skutečnost potvrzovaly horniny naražené archivními vrty v oblasti), který je pouze v omezené míře protkнут na povrch vystupujícími žilami lamprofyřů a tělesem žilného granitu. Homogenita plutonu až do hloubky předpokládaného uložení (cca 500 metrů pod povrchem) v této chvíli není potvrzena (autor nemá k dispozici jiné než archivní vrty).



Obrázek 13- Základní topografická mapa zájmové lokality 1:10 000; červený kříž označuje místo bývalého lomu, Geologická mapa 1:50000, geology.cz

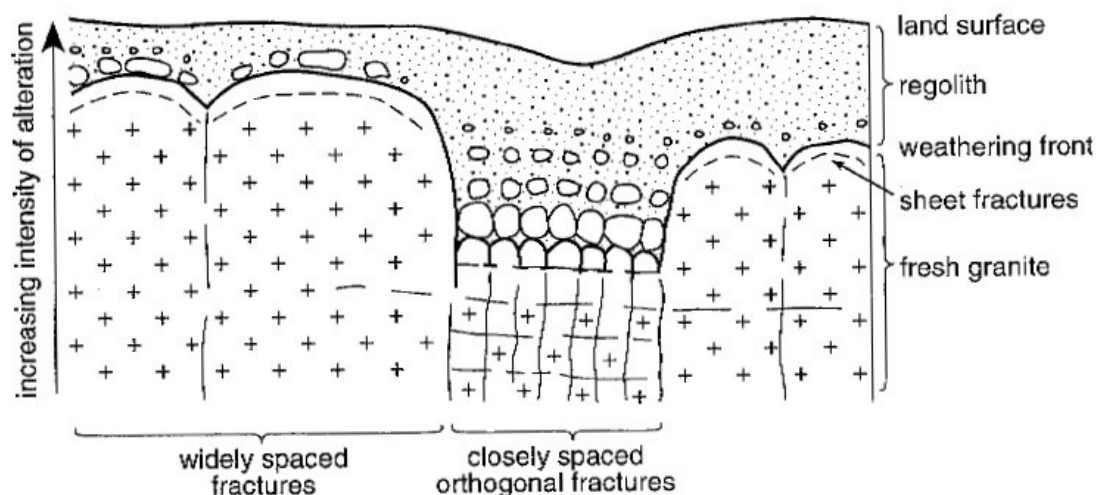
Z hlediska regionální geologie se pohybujeme ve středočeském plutonickém komplexu (SPK) Českého masivu. SPK je svou stavbou a petrologií velice složitým celkem, který vznikl při Variské orogenezi. Studovaná hornina, granodiorit blatenského typu, spadá pod druhou nejstarší skupinu hornin tvořící SPK. Jedná se o skupinu amfibol – biotitických granodioritů. Tyto granodiority jsou draslíkem bohaté vápenato-alkalické granitoidy, místy až draslíkem bohaté monzonity (Holub 1991; Janoušek et al 1995 in Kubínová 2010). Stáří těchto hornin je odhadováno na 346 ± 2 Ma (Janoušek et al. 2010) a jejich vznik je vázán na exhumaci SPK. Tato skupina hornin tvoří JZ část SPK viz Obr. 14 – skupina HK (HK2).



Obrázek 14- Zastoupení různých geochemických skupin v rámci středočeského plutonického komplexu; námi zkoumaná hornina je zde označena jako HK (HK2), převzato z Kubínová (2010)

3.4. IG podmínky

Inženýrsko – geologické podmínky výstavby jsou v granitoidních plutonech zvláště nevyzpytatelné. Tento fakt vychází ze skutečnosti, že v těchto masivech funguje velice specifický režim zvětrávání. Dochází zde ke spolupůsobení chemického a mechanického zvětrávání (Campbell 1997). Chemické zvětrávání se vyznačuje rozpadem horniny, otvíráním starých a vytvářením nových puklin. Množství diskontinuit je pak závislé na míře zvětrání. Toto vede k výskytu pevných bloků horniny, které „plavou“ v rozloženém materiálu (viz Obr. 15). Rozložený materiál je majoritně tvořen křemenem a živcovými zrny v různém stupni přeměny na jílové minerály a odpovídá klasickému zvětrávacímu procesu, jak ho popsal Goldich (1938) ve svém zvětrávacím schématu. Mechanické zvětrávání je zastoupeno exfoliací v blízkosti bazální plochy (plocha přechodu mezi zvětralou a zdravou horninou). Zvětrávání může dosahovat značných hloubek, v případě mechanického rozpadu až do hloubek 65 m (Daerman 1978 in Novotný 2009), či až 70 m v případě zvětrávání chemického (Zhao et al. 1994). Hlavní příčinou zvětrávání je výskyt vody. Voda zde využívá existujících diskontinuit, a proto je pluton silněji zvětrán na místech s přirozeným výskytem vyššího počtu diskontinuit (viz Obr. 15). Roli zde hraje také nehomogenita masivu z hlediska minerálního složení (opět platí Goldichovo zvětrávací schéma). Toto všechno má za důsledek nestejnou hloubkovou a laterální zvětrávání (jeho intenzitu) granitoidních plutonů (Hunt 2007 in Novotný 2009; Kettner 1943 in Novotný 2009), kdy tzv. bazální plocha (weathering front) může značně kolísat (hloubkově) v závislosti na výše zmíněných faktorech.



Obrázek 15- Diagram znázorňující režim zvětrávání granitoid. plutonů, kde dochází k preferenčnímu zvětrávání podél existujících diskontinuit, převzato z Campbell (1997)

3.5. Hydrogeologie

V případě stavby HU máme zájem na tom, aby se uložený materiál nedostal do styku s podzemní vodou. Nebereme-li v potaz sekundární těsnící prostředky (bentonitová bariéra), nosná hornina musí mít co nejmenší koeficient filtrace a nesmí být kolektorem podzemní vody.

Granitoidní plutony jsou obecně na vodu chudé. Podzemní voda je v nich puklinového charakteru a běžně obsahují dva typy zvodní: přípovrchovou – vázanou na kvartérní pokryv a silně rozpukanou, svrchní část horninového tělesa a zvodně hlubokou – vázanou na systém diskontinuit. Přípovrchová zvodně nás tedy nebude příliš zajímat, za to hluboká – vázaná na diskontinuity může být případně velký problém.

3.6. Vrtná prozkoumanost a archivní data

V dané oblasti máme k dispozici velké množství archivních vrtů. Na Obr. 16, můžeme vidět vyznačené 3 zóny /podoblasti, na kterých probíhaly v minulosti vrtné práce. Pro tuto práci jsou zvláště důležité kvalitní popisy vrtů (informace o výnosu jádra, diskontinuity atd.) a případné další informace vhodné pro popis masivu jako celku.

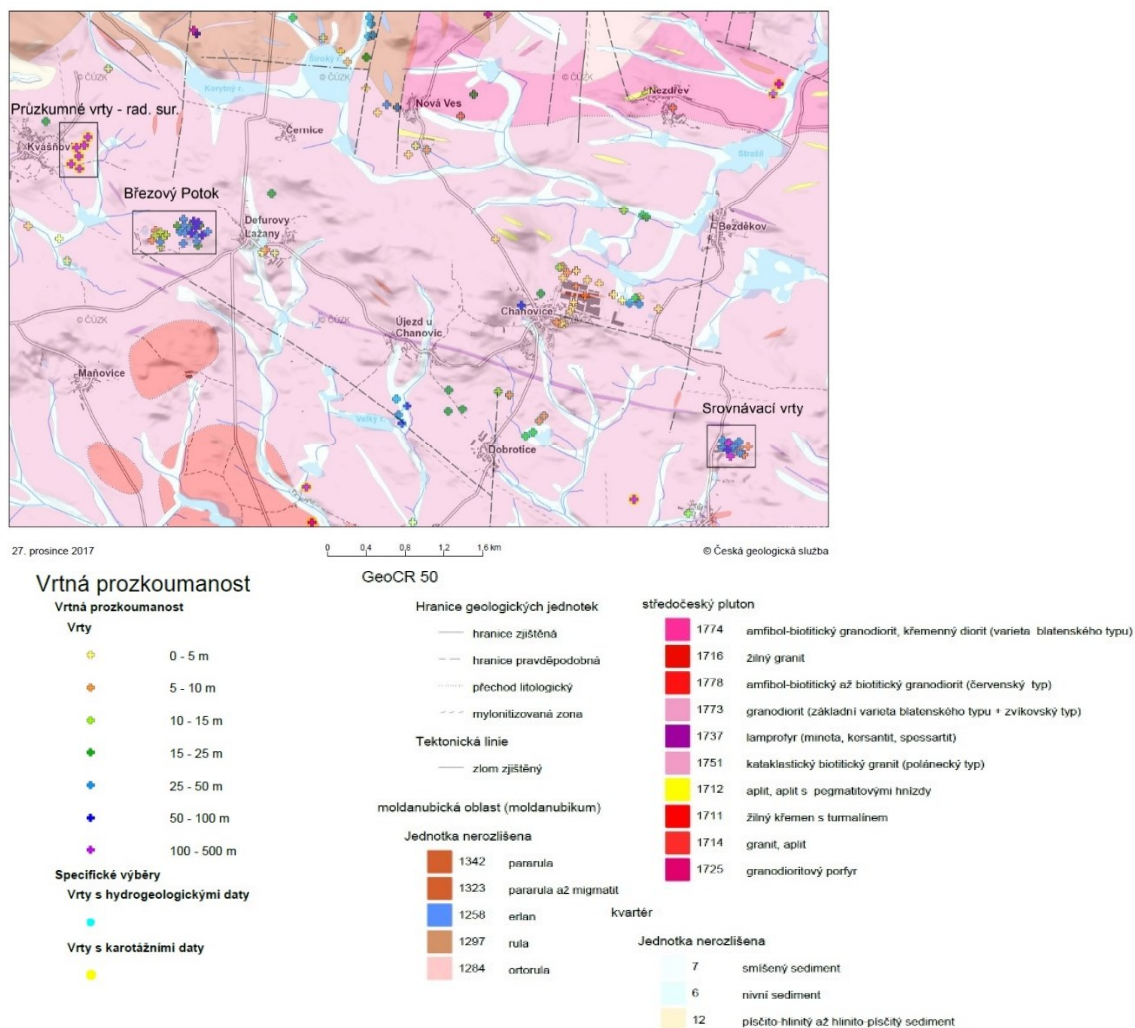
3.7. Podoblast – „Průzkumné vrty“

První podoblast, „Průzkumné vrty – rad. sur“, byla zkoumána kolem let 1986 kvůli radioaktivní anomálii. Jednalo se o 6 karotovaných vrtů s výplachem. Popis vrtů neobsahoval informace o výnosu jádra (Krištiak a Sobota 1986) a ani použitá karotážní metoda nám neposkytla žádné užitečné informace. Vrty nám však potvrdily petrografickou homogenitu masivu minimálně do hloubky 207 metrů (Krištiak

a Sobota 1986). Vrt byl naražen granodiorit blatenského typu, pouze ojediněle přerušeny žilou dioritového porfyritu.

3.8. Podoblast – Srovnávací vrty

Druhá podoblast: „Srovnávací vrty“, byla zkoumána kolem let 1986 a jednalo se o podrobnou etapu průzkumu pro těžbu dekoračního kamene. Na rozdíl od předchozí podoblasti a úkolu, ve zprávě (Bárta et al. 1986), nalezneme velice podrobně popsané vrty (výnos jádra, puklinatost atd.) Z nichž byly použity dále 3 vrty, každý s délkou nad 50m.



Obrázek 16- Vrtná prozkoumanost, Mapa vrtné prozkoumanosti; mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/

Jeden z těchto vrtů má délku 150 metrů a druhý 115 metrů. Tyto vrty jsou důležité zvláště protože obsahují podrobné informace o výnosu jádra a popisu diskontinuit. Vrty narazily pouze granodiorit blatenského typu, na rozdíl od předchozí oblasti. Zpráva dále uvádí, že ložisko je tektonicky porušeno a pukliny jsou zvodnělé (Bárta et al. 1986). Podzemní voda je mírně kyselá a středně mineralizovaná (Bárta et al. 1986). Granodiorit má puklinovou propustnost a koeficient filtrace zvodnělých horizontů byl stanoven na $8,9 \cdot 10^{-8}$ m/s (Bárta et al. 1986).

3.9. Podoblast – Březový potok

Poslední podoblastí je samotná lokalita Březový potok. Zde byly prováděny historicky 2 průzkumy, jeden v roce 1960 (Čermáková et al. 1960), tato zpráva nebyla použita, protože vrtná práce nepřesáhly hloubku 50 metrů. Druhou a použitou zprávou je Bašta et al. (1976), výhoda této zprávy je, že odběr zkoumaných vzorků byl proveden z lomu, pro který byla zpráva (Bašta et al. 1976) podkladem. Délka vrtů a kvalita jejich popisu, ale není tak dobrá jako v případě podrobného průzkumu v předchozí podoblasti. Popisy vrtů obsahují informaci o výnosu jádra. Popis diskontinuit není tak kvalitní a někde úplně chybí. Celkový počet použitelných vrtů je 6 (delších 50m).

4. Laboratorní část – intact rock

V této části se budeme zabývat vlastnostmi zkoumané horniny v laboratoři. Od jejího popisu, parametrů, po pevnostní zkoušky. Použitá měřidla s informacemi o kalibraci atd. jsou uvedena v Tab. 1. Použité normy s odpovídajícím vybavením jsou uvedeny Tab. 2.

Tabulka 1- Použitá měřidla, převzato z Petružálek (2017) - upraveno

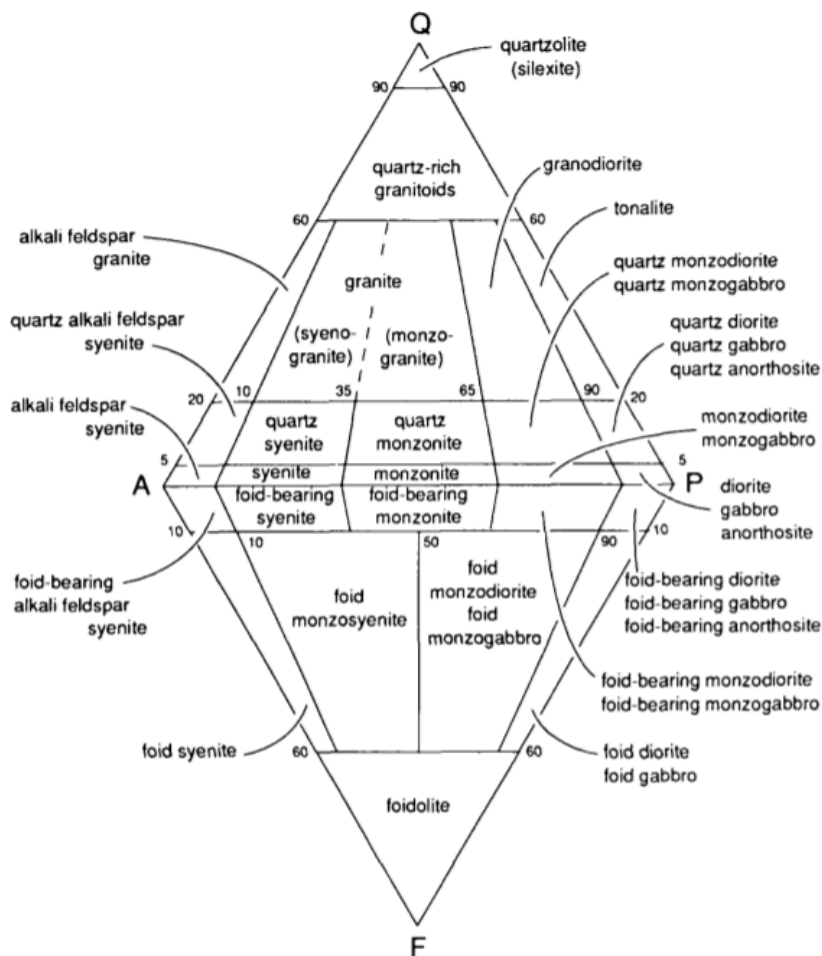
Číslo měřidla	Měřidlo	Značka	Rozsah	Dílek	Datum kalibrace	Perioda kalibrace	Provedl	Č. kalib. listu.
1	Servohydraulický zatěžovací rám MTS 815 se snímačem	Snímač síly MTS 661,98	1000 kN	0,01 kN	14.6 2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4225 - 1 - 16
2	Měřidlo relativní podélné deformace	Extenzometr MTS 632,11F - 90	10 mm	0,0001 mm	14.6 2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4228 - 16
3	Měřidlo obvodové deformace	Extenzometr MTS 632,12F - 20	20 mm	0,0001 mm	14.6 2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4229 - 16
4	Měřidlo podélné deformace	LVDT GT 2500	5 mm	0,0001 mm	4.2 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
5	Měřidlo příčné deformace	Cantilever ergotech	6 mm	0,0001 mm	4.2 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
6	Triaxiální buňka Ergotech, snímač komorového tlaku	ADZ Nagano SMX	200 MPa	0,1 MPa	14.1 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
7	Elektronické posuvné měřítko	Proma	150 mm	0,01 mm	5.10 2016	měsíčně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
8	Elektronická váha	Mettler Toledo PB 3002 - S/FACT	3200 g	0,01 g	3.6 2016	ročně	LABO - MS, spol. s.r.o.	K - 16 - 613 - 2
9	Elektronická váha	Precisa 240A	240 g	0,0001 g	03.06.2016	ročně	LABO - MS, spol. s.r.o.	K - 16 - 613 - 1
10	Ultrazvukové snímače podélného vlnění	PANAMETRICS V150	-	0,01 μ s	10.3 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
11	Ultrazvukové snímače příčného vlnění	PANAMETRICS V153	-	0,01 μ s	10.3 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-
12	Permeameter	Quizix 5000	9 ml, 70 MPa	0,1 μ l, 0,1 MPa	20.4 2016	ročně	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.	-

Tabulka 2- Využití normy a zkušební postupy, spolu s využitými měřidly, převzato z Petružálek (2017) – upraveno

Zkouška	Norma	Zkušební postup	Použitá měřidla
Stanovení pevnosti v prostém tlaku	ČSN EN 1926 (2007) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v prostém tlaku	Odpovídá uvedné normě	1
Stanovení pevnosti v příčném tahu	Není platná norma, používá se norma na testování betonů	ČSN EN 12390-6 (2010) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles	1
Stanovení pevnosti při daném komorovém tlaku	Není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 15. Triaxiální zkoušky v Zavoral J. et al. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha.	1,6
Stanovení statických elastických modulů při jednoosé zkoušce	Není platná norma, využívá se postup dle normy, platící do roku 2006	ČSN EN 721165 (1984) Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku přírodního stavebního kamene (platná do roku 2006)	1,2,3
Stanovení statických elastických modulů při triaxiální zkoušce	Není platná norma, využívá se postup dle normy, platící do roku 2006	ČSN EN 721165 (1984) Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku přírodního stavebního kamene (platná do roku 2006)	1,4,5,6
Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic	Není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892 - 3 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru	8
Stanovení objemové hmotnosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	Odpovídá uvedné normě	7,8
Stanovení pórovitosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	Odpovídá uvedné normě	7,8,9
Stanovení rychlosti šíření seismických vln	Není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	7,10,11
Stanovení dynamických elastických modulů	Není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	7,8,10,11
Stanovení koeficientu hydraulické vodivosti	Není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892 - 3 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu	7,12

4.1. Makroskopický popis horniny a vzorky

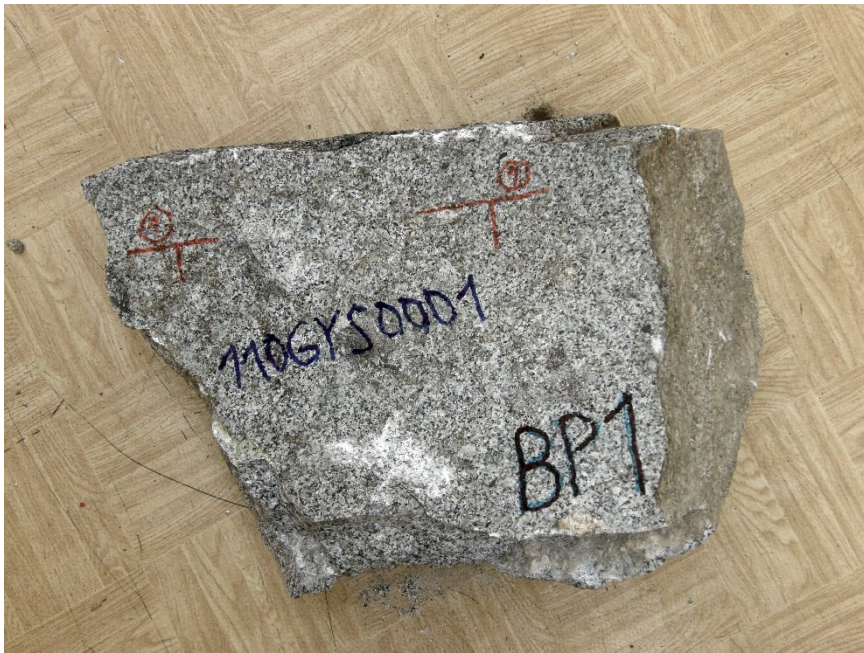
Zkoumaná hornina je tmavě šedý, na zvětřalém povrchu se slabě zelenomodrým nádechem, hlubině vyvěřelý magmatit stejnoměrně zrnitý, granitické struktury. Kompaktní textury. Hlavními horninotvornými minerály jsou: plagioklas (oligoklas – andezin), křemen, biotit a draselný živec (ortoklas, mikroklin), tvořící vyrostlice. Plagioklas zde tvoří odhadem více než 65 hmot. %, křemen více než 20 hmot. %, biotit je zastoupen v množství menším než 10 hmot. %. Dle Streckeisena (QAPF) diagramu (viz Obr. 17) by se pak jednalo o granodiorit. Přesnější identifikace akcesorických minerálů nebyla stanovena.



Obrázek 17- Klasifikační diagram QAPF pro hlubinné magmatity s M (mafické minerály) $< 90\%$, Q – křemen, A – alkalický živec, F – foidy, P – plagioklas ($An > 5$) podle Streckeisen (1976) in Le Maitre ed. (2002)

Táto práce z části přebírá výsledky práce Petružálka (2017), který prováděl zkoušky na 20 vzorcích totožné horniny. Autor této práce pak připravil dalších 7 vzorků (zkušebních tělísek), na kterých provedl 6 zkoušek v triaxiálním přístroji. Popis jednotlivých vzorků z práce Petružálka (2017) zde nebude uváděn. Seznam vzorků, výsledky, příslušná data a vzorky budou uvedeny v jednotlivých kapitolách.

Zkušební tělíska byla připravena z bloku číslo 1 viz Obr. 18 a byla odvrtna kolmo na vyznačenou orientaci. Po odvrtní byla tělíska zaříznuta a bylo provedeno zabroušení podstav tak, aby byla zajištěna co největší rovnoběžnost.



Obrázek 18- Blok 1, orientace plochy 113/72

Po zabroušení byla tělíska vysušena v peci (105 °C po dobu alespoň 24h), byla zvážena a změřena. Připravená tělíska můžeme vidět na Obr. 19. a míry připravených tělísek v Tab. 3. Vzorek číslo BP3* zůstal v záloze.



Obrázek 19- Připravená tělíska

Tabulka 3- Míry nově připravených tělísek; l – délka, d – průměr

Vzorek	M_{dry} [g]	l [mm]	d [mm]
BP1*	543,60	102,90	50,46
BP2*	536,80	101,10	50,46
BP3*	546,02	101,08	50,42
BP4*	539,31	101,74	50,40
BP5*	539,20	101,59	50,39
BP6*	543,20	102,21	50,45
BP7*	533,78	101,28	50,37

4.2. Fyzikálně popisné vlastnosti

Zjišťované fyzikálně popisné vlastnosti byly: suchá objemová hmotnost (ρ_{dry}), nasycená objemová hmotnost (ρ_{sat}), specifická objemová hmotnost (ρ_{spec}), celková pórovitost a efektivní pórovitost. Fyzikálně popisné vlastnosti byly převzaty z práce Petružálka (2017). Suchá objemová hmotnost byla vypočtena zprůměrováním 10 měření pravidelných tělísek pro triaxiální a uniaxiální zkoušku, dle normy: „ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti“ (viz Tab. 2). Nasycená objemová hmotnost byla zjištěna výpočtem, po nasycení vzorků pro zkoušky propustnosti a byla provedena podle výše zmíněné normy. Směrodatné odchylky pro suchou a nasycenou objemovou hmotnost byly menší než $0,02 \text{ g/cm}^3$. Specifická objemová hmotnost byla vypočtena průměrem ze 3 pyknometrických měření, směrodatná odchylka nepřesahovala $0,005 \text{ g/cm}^3$ (Petružálek 2017). Zjištění bylo provedeno dle postupu uvedeném v: „ČSN CEN ISO/TS 17892 - 3 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru“ (viz Tab. 2). Celková a efektivní pórovitost byly vypočteny z průměrných objemových hmotností dle normy: „ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti“ (viz Tab. 2). Fyzikálně popisné vlastnosti pro zkoumanou horninu jsou uvedeny v Tab. 4.

Tabulka 4- Fyzikálně popisné vlastnosti (Petružálek 2017 – upraveno)

Lokalita	Typ horniny	ρ_{sat} [g/cm ³]	ρ_{dry} [g/cm ³]	ρ_{spec} [g/cm ³]	n_c [%]	n_{ef} [%]
Březový potok	Granodiorit	2,66	2,658	2,711	1,97	0,27
			2,658 ± 0,003			

4.3. Ultrazvukové prozařování a dynamické elastické vlastnosti

Pro zjištění dynamických elastických parametrů bylo Petružálkem (2017) provedeno ultrazvukové prozařování. Pro prozařování byla použita tělíska vytvořená pro triaxiální a uniaxiální zkoušky, která byla vysušena. Prozařování bylo provedeno v podélném směru dle metodiky uvedené v: „kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha“ (viz.

Tab. 2). Spolu se snímači (viz Tab. 1) byl použit zesilovač Sedlak PA31, pulzní zdroj Olympus 5072PR a osciloskop Agilent Technologies DSO1024A (Petružálek 2017). Naměřené rychlosti šíření seismických vln byly určeny jako průměr 10 měření (5 na vzorcích pro triax. zkoušky, 5 pro uniax. zkoušky) (Petružálek 2017). Z těchto dat byly vypočteny dynamické elastické parametry dle vztahů 1-4, kde E_d – Youngův dynamický modul, ρ_{dry} – suchá objemová hmotnost, v_s – rychlost šíření příčné vlny, v_p – rychlost šíření podélné vlny, ν_d – poissonův poměr, μ_d – dynamický smykový modul, K_d – dynamický objemový modul. Rychlosti šíření seismických vln a vypočtené dynamické parametry jsou uvedeny v Tab.5.

$$E_d = \frac{\rho_{dry} * v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (1)$$

$$\nu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (2)$$

$$\mu_d = \rho_{dry} * v_s^2 \quad (3)$$

$$K_d = \rho_{dry} (v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2) \quad (4)$$

Tabulka 5- Dynamické moduly a rychlosti seismických vln, pod dvojitou čarou průměr a směrodatná odchylka (Petružálek 2017)

Lokalita	Číslo vzorku	L [mm]	d [mm]	m [g]	t_p [ms]	t_s [ms]	v_p [km/s]	v_s [km/s]	ρ_{dry} [g/cm ³]	E_d [GPa]	μ_d [GPa]	ν_d [-]	K_d [GPa]
Březový potok	BP1	99,79	49,49	509,24	21,20	34,80	4,707	2,868	2,653	52,60	21,80	0,205	29,70
	BP2	100,65	49,69	518,95	20,80	33,00	4,839	3,050	2,659	57,90	24,70	0,170	29,30
	BP5	99,73	49,72	514,06	19,80	34,20	5,037	2,916	2,655	56,30	22,60	0,248	37,30
	BP6	100,74	49,69	519,39	19,40	32,00	5,193	3,148	2,659	63,70	26,30	0,209	36,60
	BP9	100,65	49,66	518,90	19,60	33,00	5,135	3,050	2,662	60,80	24,80	0,227	37,20
	BP3	100,36	49,71	517,15	19,90	34,30	5,043	2,926	2,655	56,70	22,70	0,246	37,20
	BP4	100,19	49,71	516,66	20,60	35,40	4,864	2,830	2,657	53,00	21,30	0,244	34,50
	BP8	100,22	49,68	516,52	19,20	32,10	5,220	3,122	2,659	63,30	25,90	0,221	37,90
	BP10	100,22	49,65	516,29	19,40	31,70	5,166	3,162	2,661	63,90	26,60	0,201	35,50
	BP11	99,80	49,65	513,70	19,00	30,60	5,253	3,261	2,659	67,10	28,30	0,186	35,60
								<u>5,046 ± 0,175</u>	<u>3,033 ± 0,136</u>		<u>59,5 ± 4,7</u>	<u>24,5 ± 2,2</u>	<u>0,22 ± 0,02</u>

4.4. Koeficient filtrace

Jak bylo zmíněno v přechozích kapitolách, zabránění přístupu podzemní vody do ukládacích vrtů je jedním z klíčových cílů. Stanovení koeficientu filtrace horniny je tedy velmi důležité pro úspěšný návrh HÚ. Koeficient filtrace byl stanoven Petružálkem (2017) za pomoci permeameru Quizix 5000 (viz Tab. 1) dle zkušební postupu uvedeném v: „ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu“. Zkouška byla provedena na vodou nasycených, zkušebních tělících tvaru válečků s výškou 50 mm a průměrem 50 mm, při komorovém i osovém tlaku 13 MPa a tlakovou diferencí 1 a 2 MPa (Petružálek 2017). Celkem bylo provedeno 6 zkoušek (3 při každé tlakové diferencí), podle vztahu (5) (Petružálek 2017) viz Tab. 6.

$$K = V * \frac{L}{A} * H * T \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

V – objem proteklé vody za čas T, L – výška vzorku před zkouškou, A – plocha vzorku, H – rozdíl tlakových výšek hladin, T – časový interval

Tabulka 6- Koefficient filtrace, K_{10} – přepočten na teplotu vody 10 °C, průměr a směrodatná odchylka pod dvojitou čarou – vždy ze 6 měření; podle Petružálek (2017) – upraveno

Hornina	Označení vzorku	Blok - plocha	K [m/s]		K_{10} [m/s]	
			1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Granodiorit	BP1	1-113/72	9,39E-14	8,64E-14	7,61E-14	6,99E-14
	BP2	2-113/72	8,89E-14	9,12E-14	7,2E-14	7,38E-14
	BP3	3-84/79	1,51E-13	1,27E-13	1,22E-13	1,03E-13
			1,06E-13 ± 2,65E-14		8,61E-14 ± 2,14E-14	

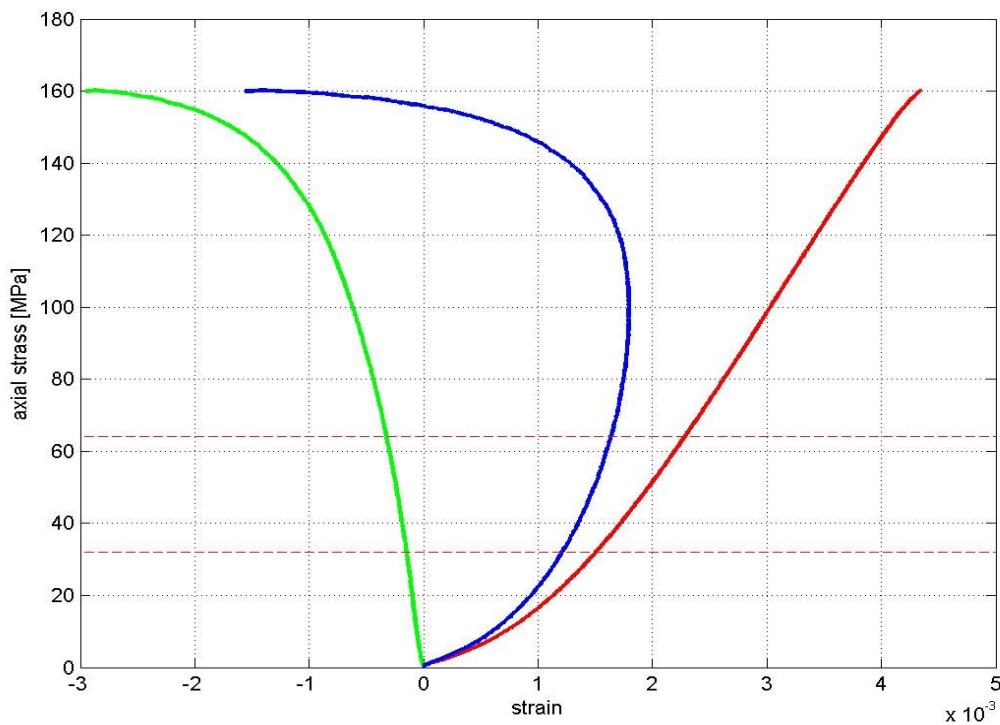
4.5. Zkoušky v prostém tlaku

Zkouška v prostém tlaku je nejzákladnější pevnostní zkouškou, důležitou pro veškeré geomechanické výpočty. Zkouška spočívá v postupném zatěžování zkušební tělíska (100 mm vysokého, 50 mm širokého – viz Obr. 22) až do jeho porušení. V případě zkoušek prováděných Petružálkem (2017), byla vysušená zkušební tělíska vložena do zatěžovacího rámu MTS 815 a postupovalo se dle normy: „ČSN EN 1926 (2007) Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku“, tak, že k porušení vzorku došlo do 15 minut od začátku zatěžování. Zatěžování bylo řízeno pravidelným přírůstkem deformací. Zaznamenávanými parametry jsou: osová síla, relativní podélná deformace a radiální deformace (obvodová). Konfiguraci zatěžovacího rámu a osazení vzorku snímači můžeme vidět na Obr. 20.



Obrázek 20- Osazení zkušebního vzorku při zkoušce v prostém tlaku, na obrázku můžeme vidět vzorek osazený 3 extenzometry (2 pro podélnou deformaci a jeden pro deformaci příčnou), převzato z Petružálek (2017)

Vyhodnocením zkoušky zjistíme pevnost vzorku v prostém tlaku, určíme youngův elastický modul E (statický) a poissonovo poměr či další moduly (objemový, smykový) (vztahy 6 – 9). Toto vyhodnocení se provádí na tzv. „Pracovním diagramu“, který znázorňuje závislost napětí a přetvoření. Pracovní diagram pro zkoušku v prostém tlaku můžeme vidět na Obr. 21.



Obrázek 21- Pracovní diagram, vzorek BP1, červeně – relativní osová deformace, zeleně – relativní příčná deformace, modře – relativní objemová deformace, červená přerušovaná čára vymezuje rozmezí 20–40 % pevnosti v prostém tlaku; převzato z Petružálek (2017)

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_a} \quad (6) \qquad \nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (8)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (7) \qquad \mu = \frac{E}{2(1+2\nu)} \quad (9)$$

ε_a – podélná relativní deformace, ε_r – příčná relativní deformace, σ_1 – axiální napětí

Youngův modul a poissonovo poměr jsou závislé na úrovni napětí a je proto tedy důležité, je určovat v rozmezí, kde platí lineární závislost. V našem případě je toto rozmezí 20–40 % pevnosti v prostém tlaku. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7.



Obrázek 22- Zkušební tělíska pro zkoušky v prostém tlaku

Tabulka 7- Naměřené pevnosti a statické moduly – zkoušky v prostém tlaku, průměrné hodnoty a směrodatná odchylka jsou uvedeny tučným písmem; převzato z Petružálek (2017) - upraveno

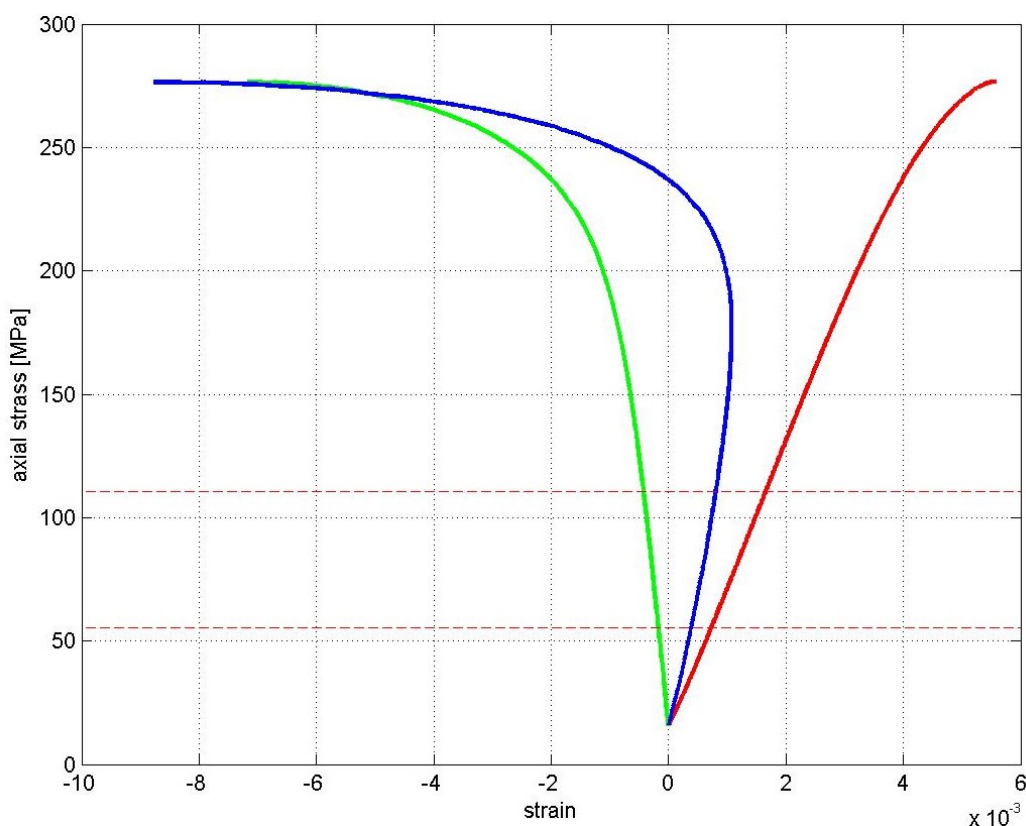
Lokalita	Číslo vzorku	Blok - plocha	Primární trhlina [°]	L - výška vz. [mm]	D - šířka vz. [mm]	E [GPa]	ν [-]	K [GPa]	μ [GPa]	Interval [MPa]		Pevnost [MPa]
Březový potok	BP1	1-113/72	15	99,79	49,49	41,33	0,22	24,98	16,88	32,1	64,2	160,3
	BP2	1-113/72	15	100,65	49,69	49,28	0,20	27,38	20,53	31,6	63,2	158,1
	BP5	2-113/72	-	99,73	49,72	52,21	0,19	28,39	21,88	30,7	61,3	153,4
	BP6	2-113/72	-	100,74	49,69	56,54	0,24	36,76	22,73	31,7	63,4	158,8
	BP9	3-84/79	-	100,65	49,66	57,53	0,21	33,58	23,69	31,5	63,1	157,6
						51,4±5,8	0,21±0,02	30,2±4,3	21,1±2,4			157,6±2,3

4.6. Triaxiální zkoušky

Trojosé (triaxiální) zkoušky, jsou typem zkoušek, kde je zkušební váleček podroben nejen osovému zatížení σ_1 , ale také plášťovému napětí, tedy $\sigma_2 = \sigma_3$. Plášťové napětí zde simuluje vliv horizontálního napětí na danou horninu v hloubce, či obecněji tenzor napětí. Zkoušky byly provedeny na vysušených, zkušebních válečcích s rozměry 100 mm x 50 mm (viz Obr. 24), dle postupu uvedeném v: „kapitola 15. Triaxiální zkoušky v Zavoral J. et al. (1987): Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha." Použité přístroje viz Tab. 1. Měřenými veličinami jsou: osová síla, plášťový tlak, relativní podélná deformace a radiální deformace (obvodová)

Zatěžování probíhalo v triaxiální komoře Ergotech, o kterou byl zatěžovací rám doplněn. Deformace byly měřeny v příčném směru LVDT snímači a ve směru podélném dvěma cantilevery, na sebe kolmými. Do určeného plášťového tlaku, docházelo k rovnoměrnému zatěžování (osové a plášťové se rovnalo), po dosažení cílového plášťového tlaku docházelo k nárůstu pouze zatížení osového, až do porušení vzorku (Petružálek 2017). Zatěžování bylo řízeno pravidelným přírůstkem deformace tak, aby k porušení vzorku došlo do 15 minut od začátku zkoušky (Petružálek 2017).

Výpočet statických elastických modulů probíhal analogicky jako u zkoušek v prostém tlaku (vztahy 6-9). Jediným rozdílem je, že oblast lineární závislosti mezi napětím a deformací je v tom případě 20-40 % triaxiální pevnosti, ne pevnosti v prostém tlaku. Pracovní diagram trojosé zkoušky můžeme vidět na Obr. 23, zde stojí za pozornost trend objemové deformace těsně před porušením.



Obrázek 23- Pracovní diagram, vzorek BP3, červeně – relativní osová deformace, zeleně – relativní příčná deformace, modře – relativní objemová deformace, červená přerušovaná čára vymezuje rozmezí 20–40 % pevnosti v trojosé zkoušce; převzato z Petružálek (2017)

Část triaxiálních zkoušek byla převzata z práce Petružálka (2017), jeho výsledky byly následně doplněny provedením dalších triaxiálních zkoušek za jiných plášťových tlaků. Petružálek (2017) prováděl trojosé zkoušky za plášťového tlaku 13 MPa, což odpovídá geostatickému napětí v hloubce cca 500 metrů. Tyto zkoušky byly doplněny o 6 experimentů za plášťových tlaků: 6,3 (2x); 33,5 (2x) a 81,4 (2x) MPa. Výsledky převzatých i nově provedených zkoušek můžeme vidět v Tab. 8–9. Porušené vzorky lze vidět na Obr. 25. Jak bude vidět v dalších částech, doplnění dat o další triaxiální zkoušky se ukázalo jako velice důležité, neboť to velice zpřesnilo odhad jednoho z velice důležitých parametrů HB obálky.

Při posledních 2 zkouškách za vysokého plášťového tlaku se ukázalo, že bude potřeba modifikovat měřicí systém použitého zatěžovacího rámu. Měřič síly měl výrobní maximum 1000 kN, proto byl pro tyto zkoušky vyvinut nový systém zapojení, který dovoluje měřit daleko vyšší tlaky. Toto nové zapojení spočívalo v řízení zkoušky pomocí tlaku hydraulické kapaliny lisu.



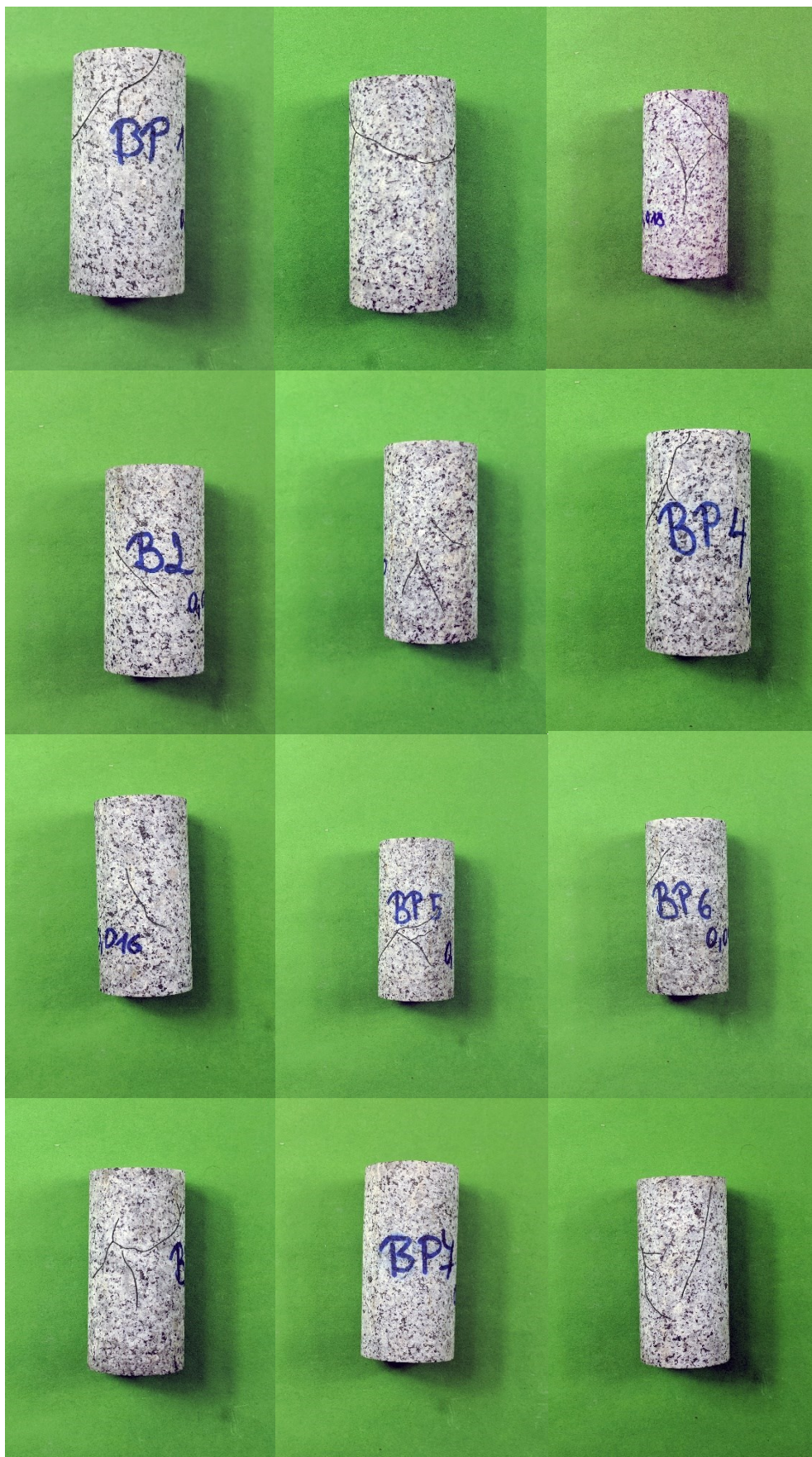
Obrázek 24- Vzorčky pro triax. zkoušky, převzato z Petružálek (2017)

Tabulka 8- Naměřené pevnosti a vypočtené statické moduly pro plášťový tlak 13 MPa, Petružálek (2017) - upraveno

Lokalita	Číslo vzorku	Blok - plocha	Primární trhliny [°]	L - výška vz. [mm]	D - šířka vz. [mm]	E [GPa]	ν [-]	K [GPa]	μ [GPa]	Interval [MPa]		Pevnost [MPa]
Březový potok	BP3	1-113/72	15	100,36	49,71	59,73	0,27	43,46	23,50	55,3	110,6	276,6
	BP4	1-113/72	15	100,19	49,71	57,42	0,33	55,46	21,63	52,8	105,4	263,9
	BP8	2-113/72	-	100,22	49,68	61,18	0,25	41,21	24,42	56,4	113,0	282,5
	BP10	2-113/72	-	100,22	49,65	56,68	0,23	35,48	22,97	30,0	60,0	150,0
	BP11	3-84/79	-	99,80	49,65	60,53	0,33	58,67	22,79	55,1	110,3	272,5
						59,1±1,8	0,28±0,04	46,9±8,8	23,1±0,9			249,7±50,2

Tabulka 9- Naměřené pevnosti při různých plášťových tlacích

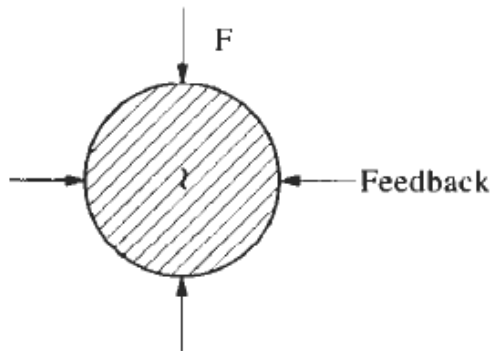
Lokalita	Číslo vzorku	Blok - plocha	Primární trhliny [°]	L - výška vz. [mm]	D - šířka vz. [mm]	Plášťový tlak [MPa]	Pevnost [MPa]	
Březový potok	BP6*	1-113/72	-	102,21	50,45	6,30	230,32	224,6±5,7
	BP7*	1-113/72	-	101,28	50,37	6,30	218,95	
	BP1*	1-113/72	-	102,90	50,46	33,50	433,13	432,5±0,6
	BP5*	1-113/72	-	101,59	50,39	33,50	431,85	
	BP2*	1-113/72	-	101,10	50,46	81,40	645,31	659,81±14,5
	BP4*	1-113/72	-	101,74	50,40	81,40	674,30	



Obrázek 25- Porušené vzorky z doplňujících zkoušek, praskliny na vzorcích jsou zvýrazněny.

4.7. Zkoušky v příčném tahu - Brazilské zkoušky

Zkouška v příčném tahu, tzv. Brazilská zkouška je nepřímou metodou testování tahové pevnosti hornin, či dalších geomateriálů (beton). Zkouška je velice jednoduchá a rychlá. Spočívá v zatěžování vysušeného válce / disku v příčném směru viz Obr. 26 a 27. K porušení dojde rozvojem trhliny, která vzorek „rozpůlí“. Zkoušky v příčném tahu byly provedeny na válcových zkušebních tělískách s rozměry 30 x 50 mm, dle zkušebního postupu uvedeného v: „ČSN EN 12390-6 (2010) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles“. Použitá měřidla jsou uvedena v Tab. 1.



Obrázek 26- Schéma brazilské zkoušky, převzato z Hudson and Harrison (2000)



Obrázek 27- Porušené vzorky, brazilská zkouška, převzato z Petružálek (2017)

Zkouška byla provedena v zatěžovacím rámu MTS s konstantním posunutím lisu tak, aby došlo k porušení vzorku do 5 minut od začátku zkoušky (Petružálek 2017).

Z maximální naměřené osové síly F_{max} a průřezu zkušebního vzorku (A), byla dle vztahu (10) spočítána pevnost v příčném tahu (BTS). Pro potřebu této práce byla hodnota BTS použita k odhadu hodnoty DTS (pevnost v prostém tahu) za pomoci vztahu (11), dle práce Read and Richards (2015).

$$BTS = 0,637 * \frac{F_{max}}{A} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

$$DTS = BTS * 0,9 \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Výslednou pevnost v příčném a prostém tahu můžeme vidět v Tab.10.

Tabulka 10- Zkoušky v příčném tahu (BTS) a odvozená pevnost v prostém tahu (DTS); Petružálek (2017) - upraveno

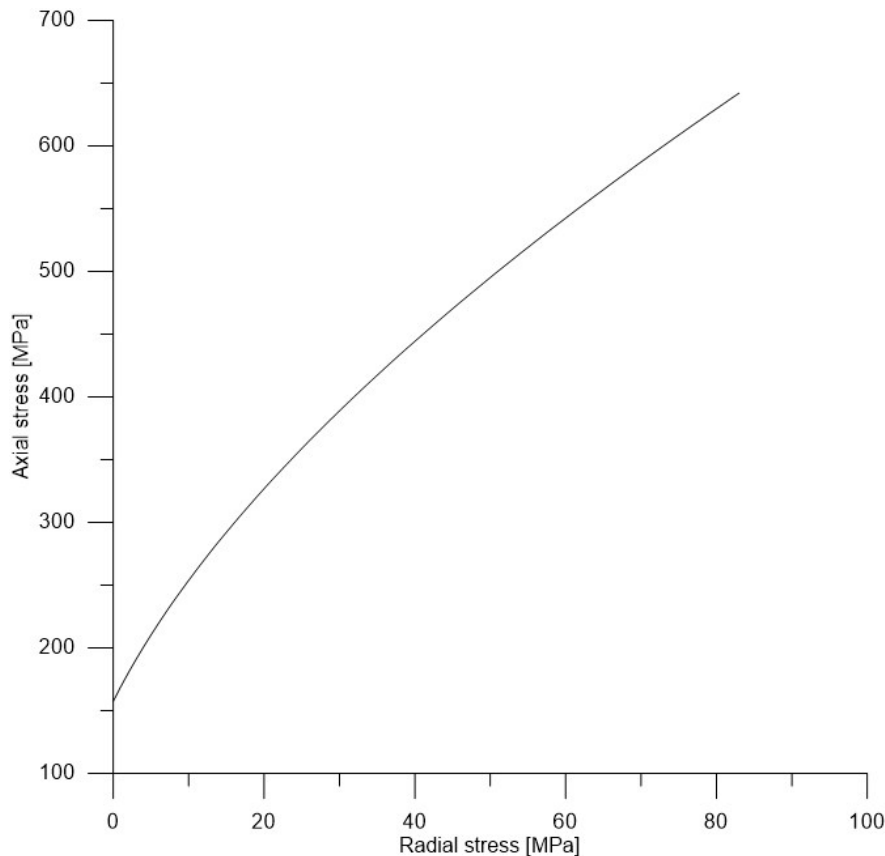
Lokalita	Číslo vzorku	Blok - plocha	Primární trhliny [°]	Průměr [mm]	Výška [mm]	F _{max} [mm]	BTS [MPa]	BTS [MPa]	DTS [MPa]
Březový potok	BP1	1-113/72	-	49,62	29,47	17,4	7,6	8,3 ± 0,8	7,5 ± 0,7
	BP2	1-113/72	-	49,45	28,65	20,4	9,2		
	BP4	2-113/72	-	49,65	26,62	16,5	8,0		
	BP5	2-113/72	-	49,63	30,75	18,0	7,5		
	BP6	3-84/79	-	49,63	31,02	22,7	9,4		

4.8. Hoek – Brownova obálka pro intact rock

Hoek – Brownova obálka je rozsah všech přípustných stavů v prostoru hlavních napětí, které může daná hornina vydržet bez porušení. Dostane – li se hornina nad tuto hypotetickou obálku přípustných stavů, dojde k porušení. Rovnice HB obálky (12) ve svém původním tvaru (Hoek et al. 2002) obsahuje kromě hlavních efektivních normálových napětí (σ_1' , σ_3') také pevnost v prostém tlaku σ_{ci} a materiálový parametr m_i . Větší hlavní, efektivní normálové napětí σ_1 je zde závislým parametrem a σ_3 , σ_{ci} a m_i jsou parametry nezávislémi.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (12)$$

Vzorovou HB obálku můžeme vidět na Obr. 28. Důležitou vlastností HB obálky je, že se jedná o nelineární obálku (na rozdíl od často používané Mohr – Coulombovy obálky) a může tak lépe simulovat reálné chování hornin.



Obrázek 28- Vzorová HB obálka pro $m_i = 22$ a $\sigma_{ci} = 157,6$

4.9. M_i

Parametr m_i je velice důležitý pro konstrukci HB obálky a jeho přesné stanovení je kritické. Obecně existují 2 postupy, jak tento parametr stanovit. Za prvé statistickou regresí z laboratorních dat, nebo odhadem (Wang and Shen 2017). Práce Zuo et al. (2008, 2015) prokázala, že m_i není bezrozměrná veličina, ale má fyzikální základ v mechanice mikro-porušení a propagace trhlin. Stejně tak m_i závisí na: minerálním složení, cementaci a zrnitosti horniny (Wang and Shen 2017).

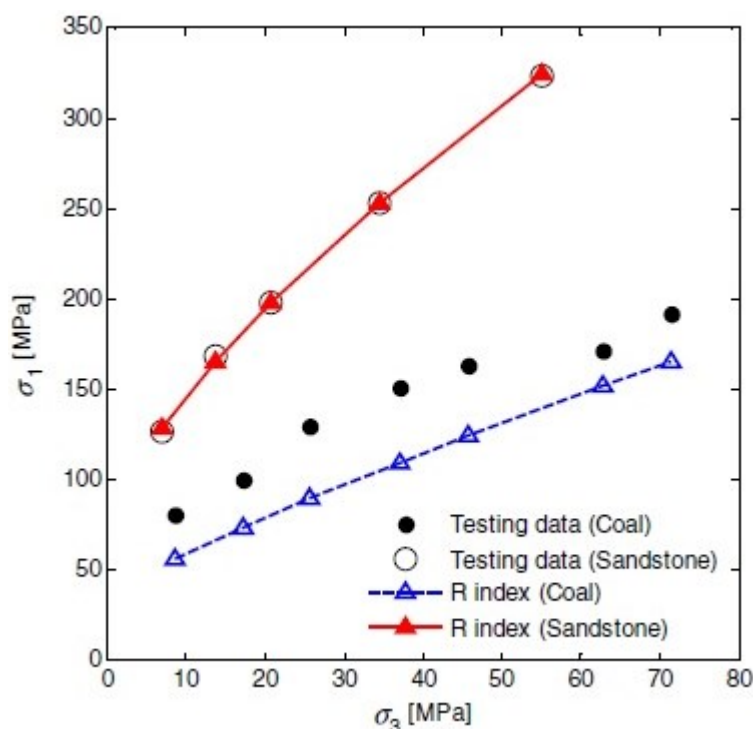
První způsob, statistická regrese, nám samozřejmě poskytuje nejpřesnější výsledky. Tento postup však předpokládá, že budou na vzorcích provedeny zkoušky tahové (DTS – prostý tah nebo BTS – brazilská zkouška) a dále zkoušky triaxiální s σ_3 (plášťový tlak) v rozmezí ideálně 0 – UCS/2 (UCS – pevnost v prostém tlaku), jak také Hoek požaduje (Hoek and Brown 1997). Práce Singh et al. (2011) a Shen and Karakus (2014) zkoumaly vliv plášťového tlaku na přesnost předpovědi HB obálky a shledaly ji za kritickou. Při nízkých hodnotách plášťového tlaku dochází k výraznému nárůstu pevnosti, na rozdíl od vysokých plášťových tlaků, kde se tento efekt snižuje, až do dosažení kritického stavu, kdy zůstává pevnost konstantní (Singh et al. 2011). Na metodě fitování velmi záleží, jak si můžeme ukázat na návodu dle Hudson and Harrison (2000), kteří navrhují postup fitování pomocí lineární regrese dle vztahu (13), kde σ_c značí pevnost v prostém tlaku. Výsledné řešení je omezeno tak, aby procházelo počátkem.

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right) - 1 = m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \quad (13)$$

Fitovat lze také pomocí programů. V této práci jsem využil program RocLab, který doporučuje Hoek ve své práci (Hoek et al. 2002), fitování je v tomto programu prováděno dle fitovacího algoritmu Levenberg – Marquardt. Vzorový příklad na porovnání postupů bude uveden na konci kapitoly.

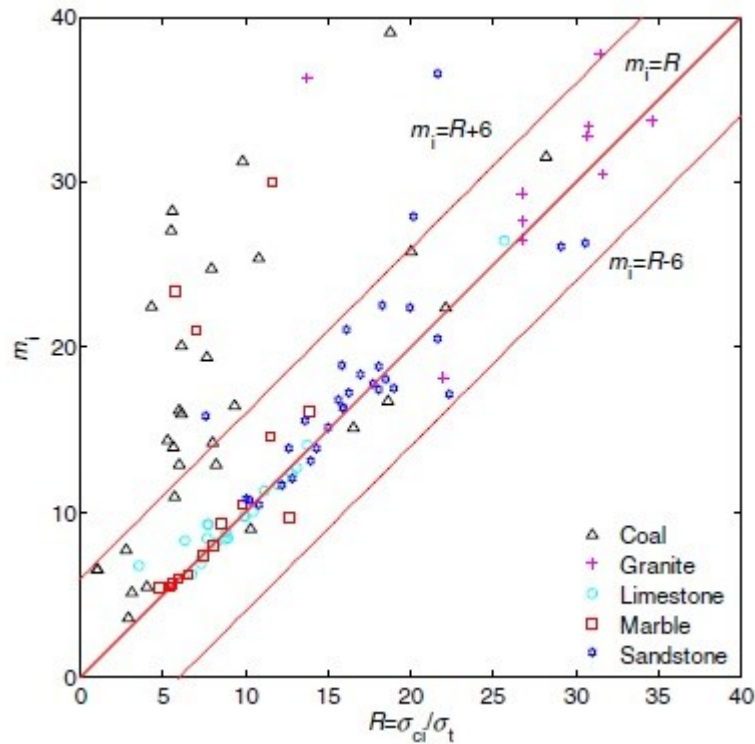
Druhým způsobem je hodnotu m_i odhadnout (v případě neexistence triax. zkoušek). Zde existuje několik hlavních metod. Metoda tzv. R indexu podle Cai (2010) a dalších (Hoek and Brown 1980, Mostyn and Douglas 2000, Sari 2010, Read and Richards 2011 a Read and Richards 2014) kteří tento parametr odhadují pomocí poměru UCS a BTS /DTS (14, 15). Takto odhadnutá hodnota m_i není stejně přesná pro všechny typy hornin, jak dokázal Wang and Shen (2017) na laboratorních datech různých typů hornin viz Obr. 29, kde vidíme, že pro pískovec byla předpověď přesná a pro uhlí nikoli.

$$m_i \approx \frac{UCS}{BTS \cdot 0,9} = R \quad (14) \quad m_i \approx \frac{UCS}{DTS} = R \quad (15)$$



Obrázek 29- R index a jeho schopnost predikce, převzato z Wang Shen (2017)

Statistickou analýzou 57 datasetů různých hornin došli Shen and Karakus (2014) k závěru, že za použití R indexu k odhadu hodnoty m_i , se pouze 4 datasety z 57 lišily více než o $R \pm 6$. Což nám ukazuje, že R index je velice vhodnou metodou pro odhad hodnoty m_i , viz Obr. 30, kde vidíme, že problémy jsou hlavně s uhlím.



Obrázek 30- Přesnost predikce, R index, převzato z Shen and Karakus (2014)

Další možnou predikční metodou pro odhad m_i , je tzv. „UCS – based model“, jež byl navržen autory Shen and Karakus (2014). Výhoda této metody je, že pro její aplikaci jsou potřeba pouze zkoušky na pevnost v prostém tlaku. Dle vztahu (16), kde σ_{ci} zde značí pevnost v prostém tlaku, pak akorát dohledáme příslušné konstanty „a“ a „b“ pro daný horninový typ viz Tab 11. (Shen and Karakus 2014).

$$m_i = a\sigma_{ci}^{b+1} \quad (16)$$

Tabulka 11- Konstanty pro UCS model, dle horninových typů, převzato z Shen and Karakus (2014)

Rock types	a	b
Coal	120	- 1.70
Granite	100	- 1.20
Limestone	22	- 1.15
Marble	100	- 1.55
Sandstone	50	- 1.26
Monzonite	120	- 1.40
Monzogranite	87	- 1.14
Hybrid rocks	387	- 1.67

Tuto metodu ověřili a potvrdili autoři Vásárhelyi et al. (2016), kteří zpětně analyzovali výsledky triaxiálních zkoušek granitoidních hornin z úložiště radioaktivního odpadu v Maďarsku (úložiště pro

slabě radioaktivní materiál). Jednalo se jmenovitě o monzonity, monzogranity a hybridní (kontaminované monzonity a monzogranity) horniny.

Metodu k odhadu m_i , podle pevnosti v prostém tahu navrhli autoři Wang and Sheng (2017), jedná o metodu analogickou k té zmíněné výše. Do vztahu (17), kde σ_i značí pevnost v prostém tahu, doplníme konstanty dle horninového typu viz Tab. 12.

$$m_i = A\sigma_t^B \quad (17)$$

Tabulka 12- Konstanty pro TS model; AAREP – absolutní průměrná relativní chyba v %, R^2 – koeficient determinace, M_d – maximální diskrepance (Wang and Sheng 2017)

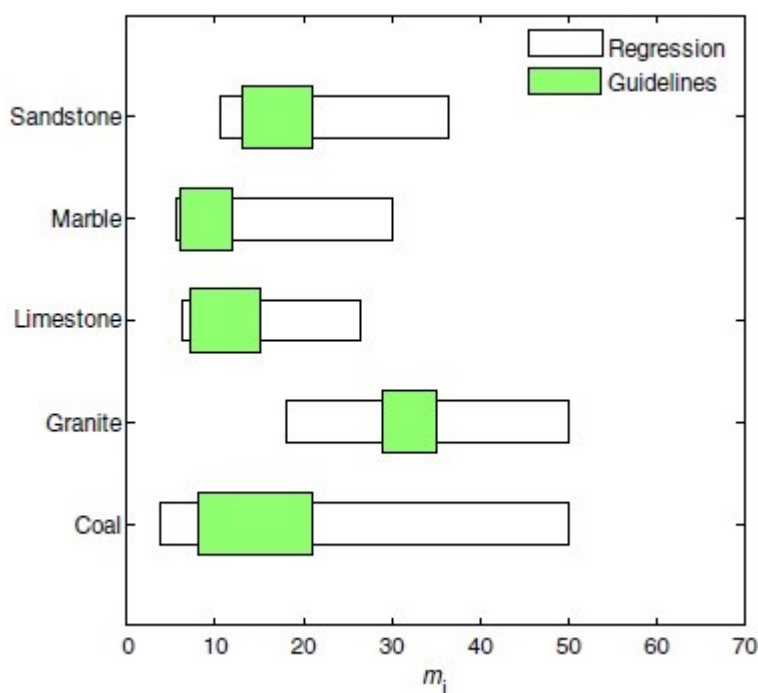
Rock types	A	B	AAREP (%)	R^2	M_d (%)
Coal	22	-0.48	11.65	0.94	27.97
Granite	75	-0.46	7.17	0.98	25.17
Limestone	23	-0.28	8.93	0.93	26.76
Marble	40	-0.66	8.18	0.98	22.12
Sandstone	25	-0.27	7.06	0.96	20.23

K odhadu hodnoty m_i , existují ještě 3 další metody. Dvě z těchto metod jsou ovšem založeny na nestandardních laboratorních zkouškách, metoda odhadu podle napětí, při kterém dochází k otevírání trhlin a vrcholové pevnosti (nutné zkoušky akustické emise) podle Cai (2010). A metoda 3D modelu trhliny podle Zuo et al. (2015).

Poslední možností, jak hodnotu m_i odhadnout, je použít tabulku dle Hoeka (2001) viz Tab. 13. V této tabulce nalezneme rozsah hodnot pro jednotlivé horninové typy. Tato metoda se hodí pouze za předpokladu, že nebyly provedeny žádné laboratorní zkoušky, neboť jak ukazuje práce Wang and Sheng (2017) při porovnání tabulovaných hodnot navržených Hoekem a hodnot získaných regresí vidíme, že 50 % všech hodnot je mimo rozpětí navržené Hoekem (Obr. 31).

Tabulka 13- Tabulka hodnot m_i , převzato z Hoek (2001) – upraveno

Rock type	Class	Group	Texture			
Sedimentary	Clastic		Coarse Conglomerates 21 ± 3 Breccias 19 ± 5	Medium Sandstones 17 ± 4	Fine Siltstones 7 ± 2 Greywackes 18 ± 3	Very fine Claystones 4 ± 2 Shales 6 ± 2 Marls 7 ± 2
		Non-Clastic	Evaporites Carbonates	Crystalline Limestones 12 ± 3	Gypsum 8 ± 2 Sparitic Limestones 10 ± 2	Anhydrite 12 ± 2 Micritic Limestones 9 ± 2 Coal* 8–21
		Organic		Hornfels 19 ± 4 Metasandstone 19 ± 3	Quartzites 20 ± 3	
	Metamorphic	Non foliated		Marble 9 ± 3		
	Slightly foliated		Migmatite 29 ± 3	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites 7 ± 3	Slates 7 ± 4
Igneous	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3 Granodiorite 29 ± 3 Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Porphyries 20 ± 5	Dolerite 16 ± 5		
	Hypabyssal				Diabase 15 ± 5	Peridotite 25 ± 5
	Volcanic	Lava		Rhyolite 25 ± 5 Andesite 25 ± 5 Breccia 19 ± 5	Dacite 25 ± 3 Basalt 25 ± 5	Obsidian 19 ± 3
		Pyroclastic	Agglomerate 19 ± 3		Tuff 13 ± 5	



Obrázek 31- m_i získaná regresí vs. Hoekovo tabulka, převzato z Wang and Shen (2017)

Vliv výběru metody na zjištění hodnoty m_i demonstrujeme na příkladu laboratorních dat získaných z databáze RocProp programu RocLab. Byl vybrán jemnozrnný karbonský pískovec z lokality Muscatine v USA. Provedené zkoušky vyhovovaly Hoekovo podmínce o dodržení maximální hodnoty plášťového tlaku. Jak můžeme vidět v Tab. 14, různé metody nám daly velice rozdílné hodnoty m_i , kde největší rozdíl tvoří až 15 %.

Tabulka 14- Vstupní data a hodnoty m_i v závislosti na použité metodě

Hodnota parametru		Vstupní data	
		σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
Dle Hudsona - regresí	15,96		
Dle RocLab - regresí	16,88	-5,6	0,0
R index	17,63	0,0	99,6
UCS based model	15,11	10,0	172,0
TS based model	15,66	20,0	220,0
Dle Hoeka - tabulárně	17±4	50,0	350,0

Na Obr. 32 pak můžeme vidět, jak se různé hodnoty projeví na přesnosti predikce modelu. Křížky byly vyznačeny laboratorní data a různě barevnými křivkami jednotlivé, předpovězené HB obálky. Za všimnutí stojí zvláště 2 části grafu, zápornou část a část, kde křivky protínají osu Y.

Záporná část představuje pevnost v prostém tahu, tu dokázaly velice přesně určit pouze modely „RocLab – regresí“ a „TCS – model“, u ostatních modelů došlo k nadhodnocení pevnosti v prostém tahu.

V druhé části můžeme vidět, že u všech modelů, kromě „RocLab – regresí“, došlo k zanedbatelnému nadhodnocení. U modelu „RocLab – regresí“ dochází naopak k citelnému podhodnocení (pevnost v prostém tlaku).

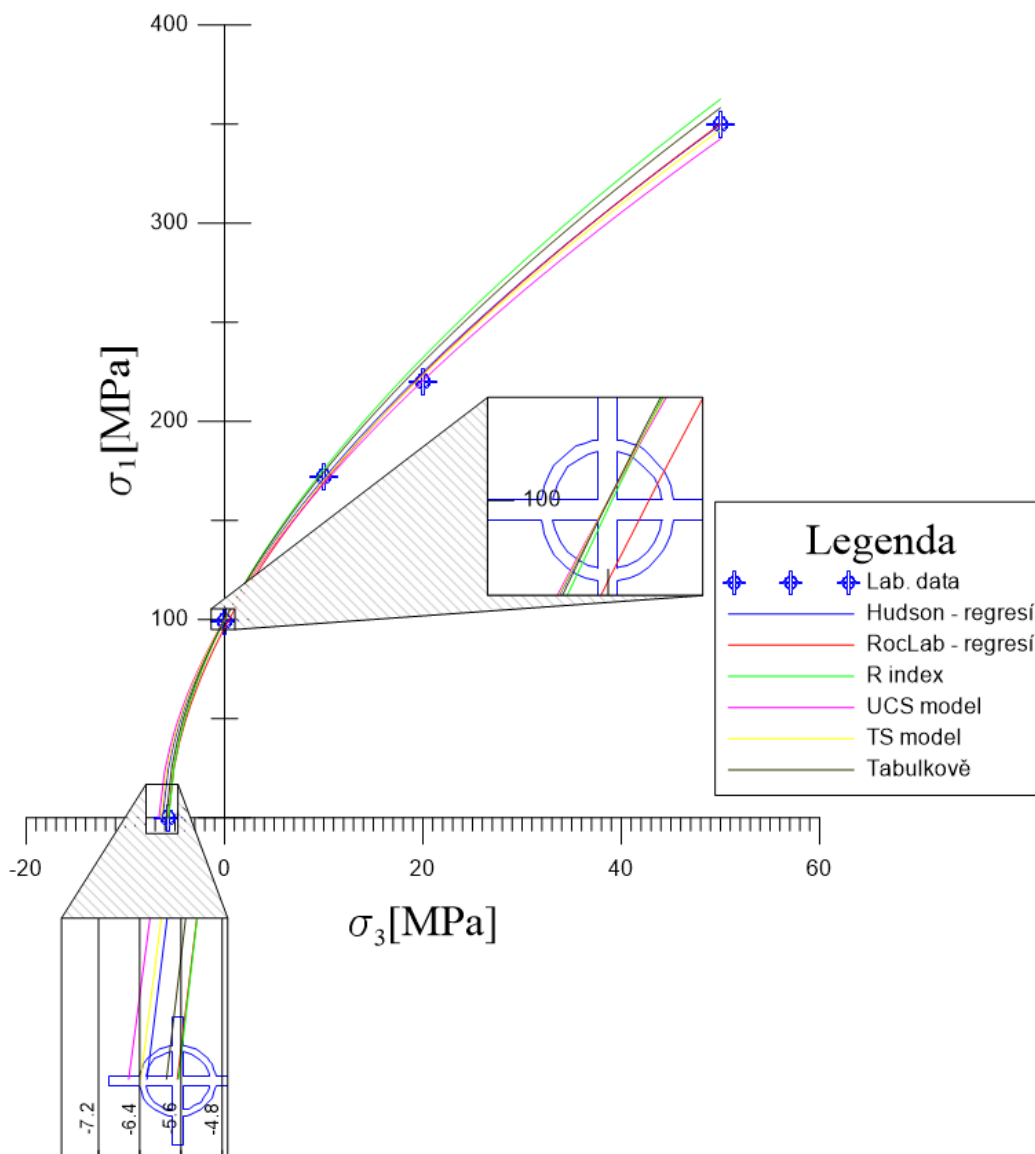
Po průtnutí osy Y, se jednotlivé modely začínají rozcházet od laboratorních dat, nejpřesnější předpověď si zachovávají modely „RocLab – regresí“, „Hudson – regresí“ a „TCS – model“.

Pro stanovení hodnoty m_i na zkoumané lokalitě jsme měli k dispozici data ze 6 zkoušek, proto jsme využili všech metod pro stanovení m_i , tak jak byly popsány a demonstrovány výše. Hoekova podmínka, týkající se plášťového tlaku, byla splněna. V tabulce (Tab. 15) můžeme vidět navržené hodnoty m_i a přehled dostupných laboratorních dat. Predikce modelů je na obrázku (Obr. 33.). Jak můžeme dle stanovených m_i vidět, metoda UCS, TL a Tab. dle Hoeka odhadují hodnotu parametru nereálně vysokou. Nereálně vysoké hodnoty stanoveného parametru v případě metod UCS a TL mohou být způsobeny použitím tabulovaných konstant (a,b,A,B) pro granit místo granodioritu. Konstanty pro granodiorit chybí. Metoda R indexu stanovuje hodnotu blízkou ostatním, přesnějším metodám (Hudson, RocLab).

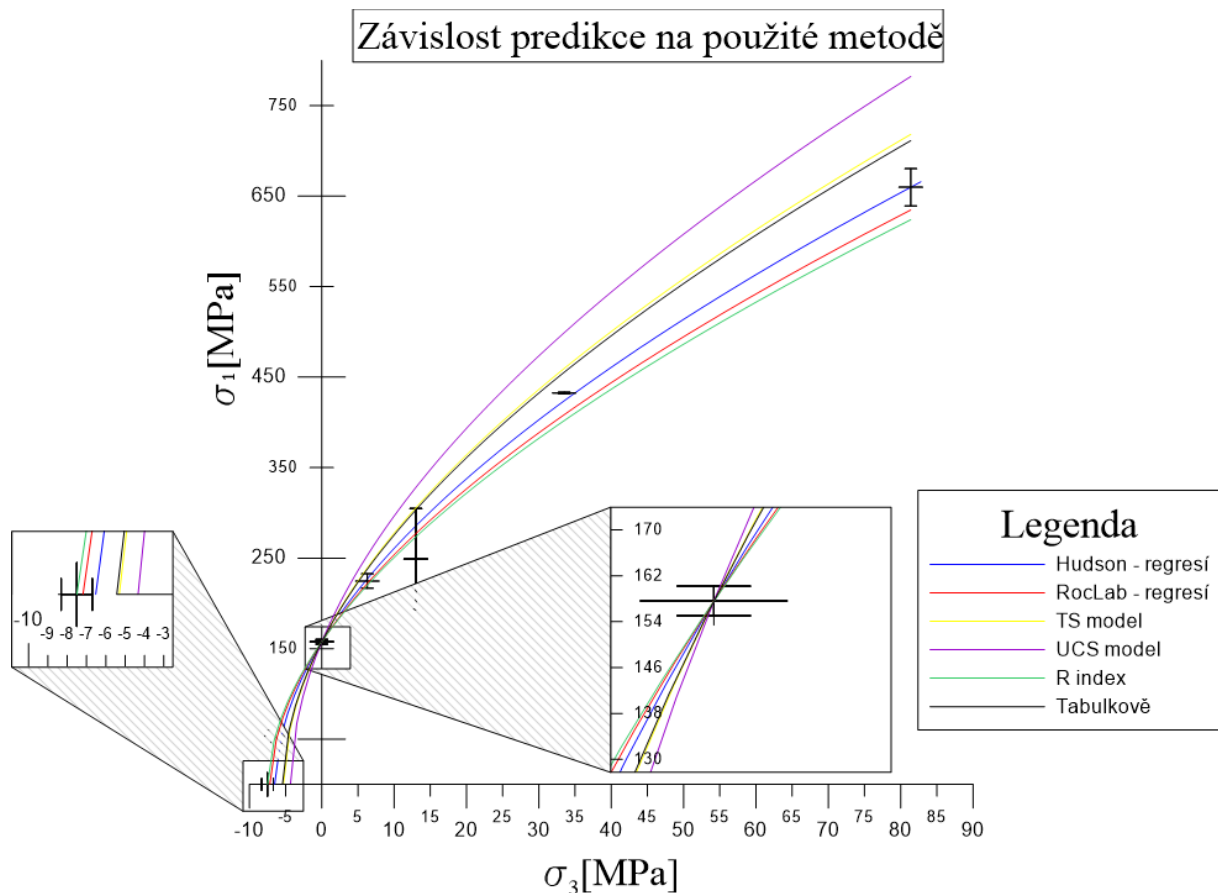
Tabulka 15- Navržené hodnoty a vstupní data

Porovnání metod		Vstupní data	
Zvolená metoda	Hodnota parametru	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]
Hudson - reg.	24,14	-7,50	0,00
Roclab - reg.	21,93	0,00	157,60
R index	21,01	6,30	224,60
UCS model	36,35	13,00	249,70
TS model	29,68	33,50	432,50
Tab. dle Hoeka	29±3	81,40	659,81

Závislost predikce na stanovení m_i



Obrázek 32- Závislost predikce na použité metodě stanovení m_i – vzorová data , HB obálky vygenerovány programem RockLab



Obrázek 33- Predikce modelů podle použité metody stanovení m_i – reálná data, laboratorní měření jsou zobrazena se směrodatnou odchylkou, HB obálky vygenerovány programem RockLab

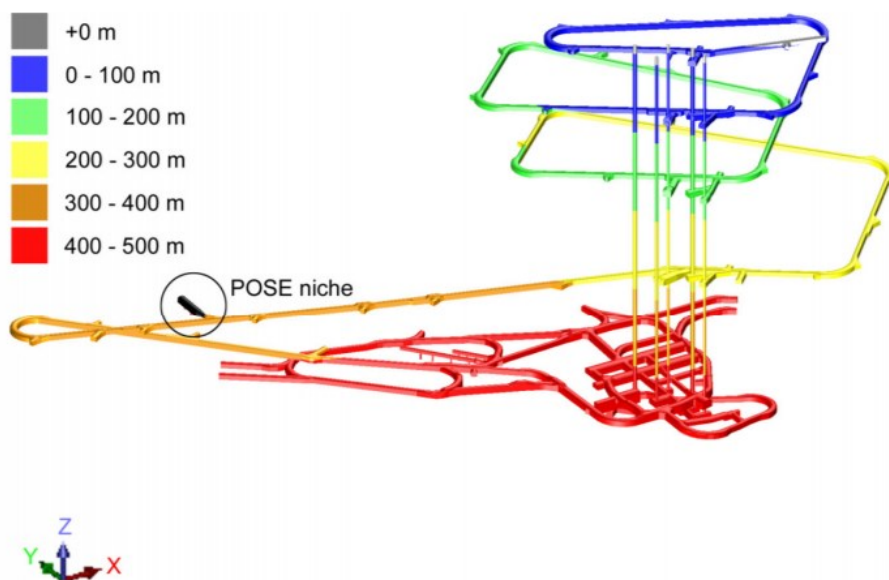
4.10. Porovnání výsledků

V této kapitole bude provedeno porovnání výsledků zjištěných Petružálkem (2017) a autorem této práce, s výsledky zahraničních projektů na stavbu HÚ, či jiných dostupných dat. Porovnání bude s finským (Onkalo), švédským a švýcarským programem. Ačkoli je jasné, že rozdíly v geologii atd. mezi jednotlivými porovnávanými lokalitami jsou enormní, porovnání výsledků nám dává určitý vhled do možných situací, které by mohly při stavbě HÚ v ČR nastat. Porovnáním výsledků můžeme dále zjistit, zda jsou námi stanovené parametry (m_i) reálné.

4.11. Finsko

V případě finské testovací lokality Onkalo pocházejí porovnávané výsledky z tzv. POSE Niche, jedná se chodbu, kde byly prováděny různé typy zkoušek (Hakala et al. 2015). Dle práce Hakaly et al. (2015) však tyto zkoušky neovlivňují samotné výsledky, neboť vzorky nebyly odebrány ze zkouškami

porušených míst. Z hlediska horninových typů se v POSE Niche nachází žilný migmatit (VG – veigned gneiss) a pegmatitický granit (PGR). Chodba byla vyražena v hloubce 345 metrů a její relativní polohu v rámci lokality Onkalo můžeme vidět na Obr. 34.



Obrázek 34- POSE Niche, lokalita Onkalo, převzato z Hakala et al. (2015)

Protože geologie (množství pegmatitického granitu) POSE Niche neodpovídá geologii celé lokality Onkalo, byly k této práci přidány výsledky z práce OMTF (2013): Site description 2011. Výsledky pro porovnání můžeme vidět v Tab. 16. Youngův modul obou hornin se může a nemusí příliš lišit od našich výsledků, a to kvůli velké směrodatné odchylce oboru hodnot. Na první pohled si můžeme všimnout, že pevnost v prostém tlaku je u obou hornin nižší než u našeho granodioritu. V případě v pevnosti v příčném tahu (BTS) či pevnosti v prostém tahu (DTS) jsou pevnosti našeho granodioritu nižší.

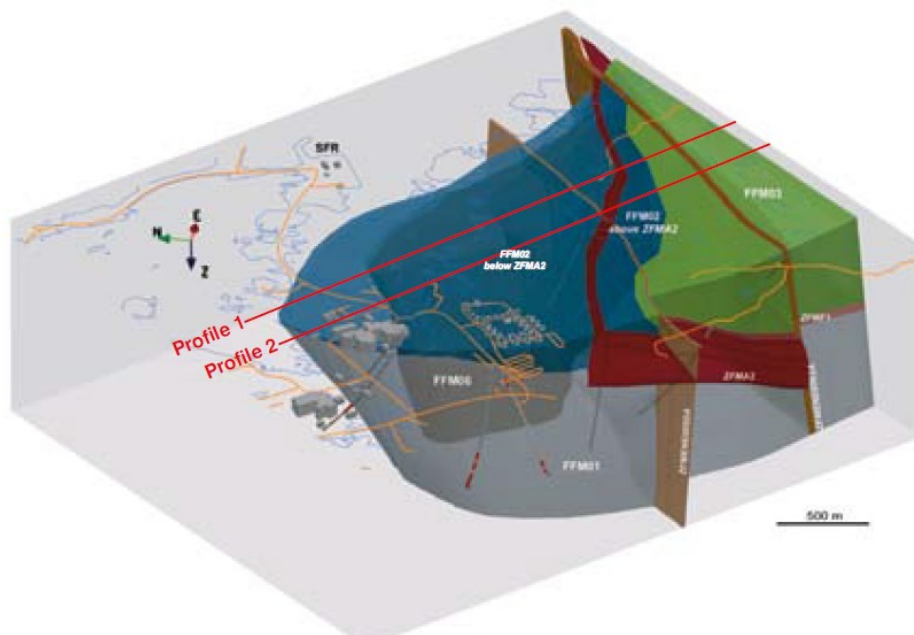
Tabulka 16- Výsledky pro porovnání, lokalita Onkalo; Hakala et al. (2016), OMTF (2013) - upraveno

	Hornina	Hakala et al. 2016 - ONKALO POSE EXP.		Posiva 2013 - site description 2011	
		Průměrná hodnota ± směrodatná odchylka	Počet vzorků	Průměrná hodnota ± směrodatná odchylka	Počet vzorků
Youngův modul [GPa]	VG	60±10	109	55±8	21
	PGR	60±8	13	60±4	8
Poissono poměr [-]	VG	0,25±0,04	109	0,29±0,03	21
	PGR	0,29±0,06	13	0,26±0,07	8
UCS [MPa]	VG	108±26	94	93,3±24	21
	PGR	102±27	13	102,5±16	8
BTS [MPa]	VG	12,1±2,9	98	9,9±3	26
	PGR	8,9±2,1	51	6,5±2	18
DTS [MPa]	VG	7,6±1,5	18	7,3±4	8
	PGR	-	0	3,3±2	6

Parametr m_i nebyl autory určen. Vzhledem k nedostatku triaxiálních dat, nebyl proveden odhad m_i ani autorem této práce.

4.12. Švédsko

Data ze švédské lokality Forsmark pocházejí ze sady průzkumných vrtů v blízkosti stejnojmenné JE. Na Obr. 35 je model oblasti přiléhající jižně od JE Forsmark. Na linii vyznačený profilů byly provedeny výše zmíněné vrty, které identifikovaly dále zkoumané horninové domény.



Obrázek 35- Model lokality Forsmark, převzato z SKB (2009)

V Tab. 17 můžeme vidět výsledky zkoušek ze dvou horninových domén, naražených vrty podle profilu. První z horninových domén (FFM01) se vyznačuje přechodem mezi metamorfovanými, středně-zrnnými granity a granodiority, do pegmatitů a granitizovaných pegmatitů (*Glamheden et al. 2008*). Druhá horninová doména (FFM06) se vyznačuje přechodem mezi metamorfovanými, středně-zrnnými granity a granodiority, do albitizovaných meta-granitů (*Glamheden et al. 2008*).

Youngův modul všech hornin je velmi vysoký (více než v případě našich dat a finského úložiště) dosahující až hodnot 83 GPa v případě albitizovaných meta-granitů. V případě pevnosti v prostém tlaku, dosahuje největší pevnosti meta – granit / meta – granodiorit v doméně FFM06 s hodnotou 373 MPa. Nejmenší pevnosti v prostém tlaku dosahuje tatáž hornina v doméně FFM01 s hodnotou 225 MPa. Pevnost příčném tahu (BTS) také převyšuje finské, či naše výsledky. V doméně FFM01 bylo autorem (*Glamheden et al. 2008*) určen horninový parametr m_i . Jeho hodnota je v rozmezí 28 – 18, nejvyšší hodnota odpovídá té pro granit / granodiorit dle Hoeka (2001) a jeho tabulky. Námi stanovená hodnota 21,93 (RocLab) – 24,14 (Hudson) je tedy reálná.

Tabulka 17- Výsledky pro porovnání, lokalita Forsmark; SKB (2009) - upraveno

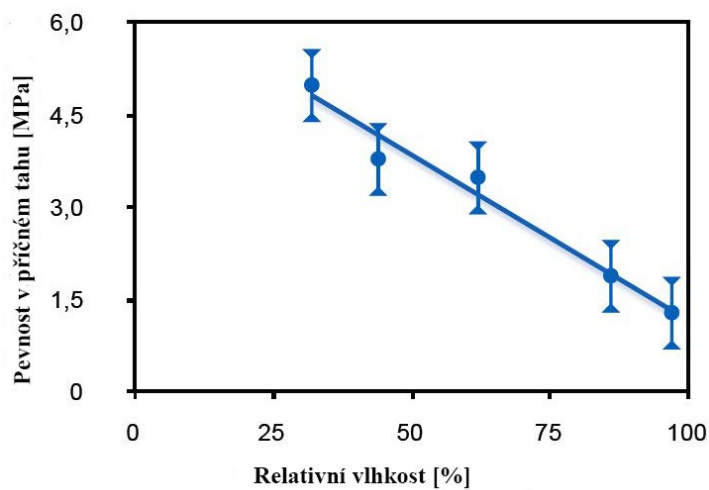
	Horninová doména	Hornina	Průměrná hodnota ± směrodatná odchylka	Počet vzorků
Youngův modul [GPa]	FFM01	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	76±3	47
		Pegmatit, pegmat. granit	74±4	13
	FFM06	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	80±1	10
		Metagranit - albitizovaný	83±3	5
Poissonův poměr [-]	FFM01	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	0,23±0,04	47
		Pegmatit, pegmat. granit	0,30±0,03	13
	FFM06	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	0,29±0,02	10
		Metagranit - albitizovaný	0,27±0,03	5
UCS [MPa]	FFM01	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	226±29	47
		Pegmatit, pegmat. granit	241±33	13
	FFM06	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	373±20	10
		Metagranit - albitizovaný	310±58	5
BTS [MPa]	FFM01	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	13±2	82
		Pegmatit, pegmat. granit	12±3	12
	FFM06	Granit - granodiorit metamorfovaný, střed. zrn.	15±1	10
		Metagranit - albitizovaný	-	-
Parametr m_i [-]	FFM01	Granit - granodiorit	28	47
		Pegmatit, pegmat. granit	18	13

4.13. Švýcarsko

Vzhledem k předchozím výsledkům z finské a švédské části je švýcarský program vysoce atypický. Opalinus clay má charakter třetihorní břidlice s vysokým obsahem jílových minerálů (mineralogické složení viz Tab. 18). Minerální složení má velký vliv na mechanické vlastnosti. Z důvodu vysokého obsahu jílové složky (40-75 hmot. %) má Opalinus clay silný sací efekt. Tahová pevnost (pevnost v příčném tahu) materiálu je tedy přímo ovlivněna vlhkostí vzorku, viz Obr. 36. Vzhledem k břidličnatému charakteru můžeme pozorovat různou pevnost v prostém tlaku v závislosti na orientaci vzorku (vůči břidličnatosti). Obecně můžeme říci, že průměrná pevnost vzorku bude vyšší v případě orientace hlavního napětí paralelně s plochou břidličnatosti (orientace „S“ viz Obr. 37), jak můžeme vidět v Tab. 19, s výsledky z laboratoře Mont Terri a BEN teorii vyhovují. Vzorky SLA – 1 jsou v tomto případě anomální. Pevnost v prostém tlaku Opalinus Clay je minimální, vzhledem k ostatním porovnávaným lokalitám.

Tabulka 18- Minerální složení Opalinus Clay podle Traber and Blaser (2013) in Giger and Marschal (2014)

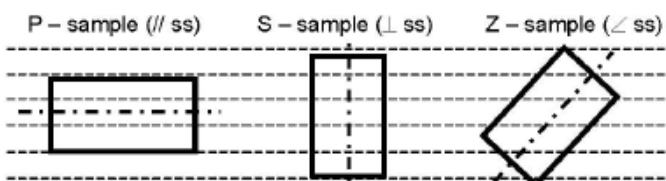
	Reference value	Lower bound	Upper bound
Bulk mineralogy [wt.-%]			
Clay minerals	60	40	75
Quartz	20	10	30
Calcite	13	5	35
Orthoclase	2	0	5
Plagioclase	0.9	0	2
Dolomite + ankerite	0.4	0	2
Siderite	4	0	15
Anhydrite	0	0	0
Gypsum	0	0	0
Pyrite	1	0.3	3
Sum	101.3		
Clay mineralogy [wt.-%]			
Illite	24	15	35
Ill/Sm alternating layers	9	4	25
Smectite	0	0	0
Kaolinite	18	10	30
Chlorite	9	2	15
Chl-Sm alternating layers	0	0	0
Sum	60	-	-



Obrázek 36- Pevnost v příčném tahu Opalinus clay v závislosti na relativní vlhkosti, Backers (2010) in Giger and Marschal (2014) - upraveno

Tabulka 19- Pevnost v prostém tlaku Opalinus Clay v závislosti na orientaci vzorku, data podle více autorů, převzato z Giger and Marschal (2014)

	URL MT	BEN	SLA-1
P-orientation			
Median (MPa)	17	29	40
Range (MPa)	12-31	22-36	38-42
Number	9	5	4
S-orientation			
Median (MPa)	18	30	31
Range (MPa)	12-24	17-36	31-34
Number	6	8	3
X-/Z-orientation			
Median (MPa)	8	7	18
Range (MPa)	4-13	2-8	6-22
Number	8	4	4
Sources	Rummel & Weber (2004), Jahns (2010)	Mathier et al. (1999), Klee & Rummel (2000)	Jahns (2013)



Obrázek 37- Orientace vzorku vůči ploše břidličnatosti

4.14. Diskuze

Provedené zkoušky na neporušených vzorcích nám dávají dobrou představu o chování vzorků za laboratorních podmínek. Vzhledem k množství provedených triaxiálních zkoušek a dodržení rozsahu plášťových tlaků je stanovená HB velmi kvalitní. Ze dvou preferovaných metod stanovení parametru m_i je přesnější použití regresní metody RocLab díky způsobu, jakým tento program prokládá stanovovanou obálku laboratorními daty. Výsledné hodnoty se lišily o cca 9 % (viz Tab. 15) a následná konstrukce obálky (Obr. 33) ukazuje, že v případě použití metody dle Hudsona, dochází k nerespektování pevnosti v tahu. V oblasti vyšších napětí tato křivka pak dobře odpovídá naměřeným datům. V případě použití nižší hodnoty m_i (stanoveno pomocí programu RocLab) dochází k lepšímu fitu v tahové části grafu, a však pevnost při vyšších napětích je značně podhodnocena. Tento fakt bude nejspíše způsoben metodou fitování programu RocLab. Ukázalo se, že při fitování není pevně dodržována pevnost v prostém tlaku (na rozdíl od metody dle Hudsona). Výsledné m_i pak odpovídá vyšší pevnosti v prostém tlaku. Po dosažení laboratorní pevnosti v prostém tlaku a nižšího m_i dochází k této nepřesnosti. Z ostatních metod stanovení m_i byla nejbližší metodika stanovení pomocí R indexu.

Dále je nutno zmínit, že pevnost granodioritu pro plášťový tlak 13 MPa (zhruba předpokládané napětí v hloubce úložiště – vertikální složka napětí) má velkou směrodatnou odchylku a bylo by tedy dobré do budoucna tyto zkoušky zopakovat. Co se týče zkoušek při jiných plášťových tlacích (autorem dodělané zkoušky), směrodatná odchylka těchto měření byla velice malá (dáno malým počtem provedených zkoušek).

5. Horninový masiv

Tato kapitola plynule navazuje na laboratorní část, kde jsme se zabývali neporušenou horninou. Pro popis vlastností masivu (se všemi svými součástmi – diskontinuity atd.) budeme používat obecnou formulaci Hoek – Brownovy obálky, tak jak byla formulována E. Hoekem a E. T. Brownem při práci na publikaci „Underground Excavation in Rocks“, vydanou v roce 1980 (Hoek and Marinos 2007). Původní rovnice nebyla novinkou, byla používána už kolem roku 1936 pro porušení betonu (Hoek and Marinos 2007). Hoek s Brownem však jako první tuto rovnici svázali s geologií hornin skrze parametry rovnice. První klasifikací hornin používanou pro HB obálku pevnosti byla RMR od Bieniawského (Bieniawski 1974 in Hoek and Marinos 2007). Během let se HB obálka měnila a vylepšovala, jak zavedením vlastní klasifikace hornin, jež nahradila RMR, tak postupným svázáním modulů intaktních hornin s moduly masivu (Hoek and Marinos 2007).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}'} + s \right)^a \quad (18) \quad m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (20)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (19) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (21)$$

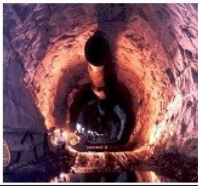




Rovnice popisující HB obálku a její parametry jsou uvedeny ve vztazích (18-21), kde σ_1 a σ_3 jsou maximální a minimální hlavní napětí, σ_{ci} je pevnost v prostém tlaku a “ m_b , s , a , D “ jsou parametry a GSI odpovídá klasifikaci vytvořené pro HB obálku pevnosti (Hoek et al. 2002). Při aplikaci HB obálky jsou hlavní parametry: m_b , GSI a D a jejich určení je kriticky důležité pro správnou aplikaci. Jednotlivé parametry, jejich smysl a postup stanovení bude probrán dále.

5.1. Parametr D

Jako první si probereme parametr D (disturbance), jež podle Hoeka (Hoek et al. 2002) odpovídá rozvolnění horniny při výrubu /výkopu. D nabývá hodnot 0 pro neporušený masiv až 1 pro velice porušený masiv (např. špatným odstřelem). Jeho odhad je z vyjmenovaných parametrů nejjednodušší a provádí podle tabulky viz Obr. 38.

Parametr D je roven 0 v případě, kdy je výrub prováděn precizním odstřelem či pomocí TBM. V případě strojové, či ruční ražby v nekvalitních horninách (mimo TBM a odstřel) nabývá D hodnot 0 – 0,5. Hodnota 0,5 odpovídá tunelům, kde hrozí silná extruze dna a nejsou přijata žádná opatření viz Obr. 38. Hodnota 0,8 odpovídá velice špatnému (kvalitou) odstřelu v pevných horninách, kdy porušení masivu dosahuje do vzdálenosti až 3 m od stěny tunelu. Poslední 2 situace nejsou pro tuto práci relevantní (úložiště bude mít charakter tunelu, ne otevřené stěny / lomu).

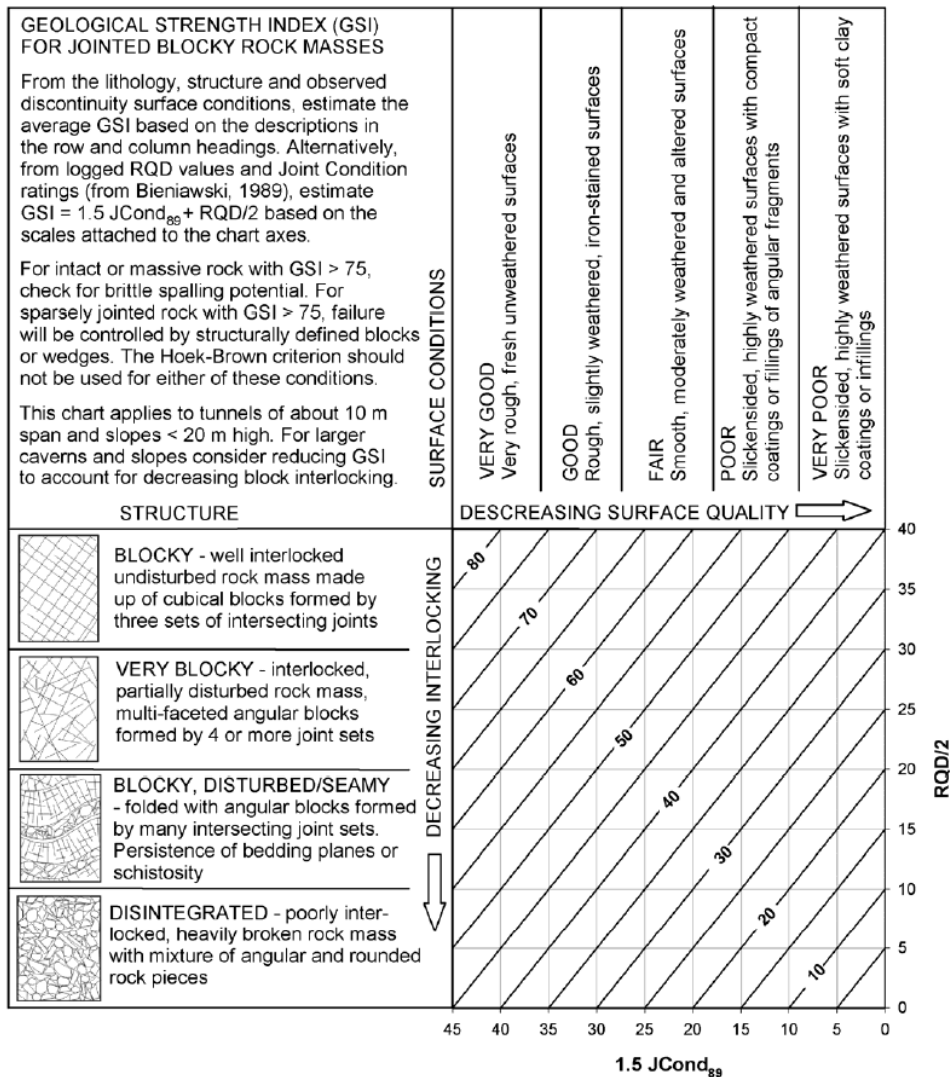
Dle Obr. 38. byla hodnota D pro další výpočty stanovena jako 0, neboť lze očekávat, že při ražbě tunelů pro hlubinné uložení bude použito nejlepších metod a postupů, tak aby došlo, co k nejmenšímu rozvolnění okolního masivu. Tato skutečnost byla zmíněna a citována v kapitole zabývající se projektem uložení v České republice.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Obrázek 38- Návod k odhadu parametru D , převzato z Hoek et al. (2002)

5.2. Geological strength index (GSI)

Geological strength index, zkráceně GSI, je klasifikační schéma pro horninový masiv, které popisuje veškeré nutné náležitosti ovlivňující mechanické vlastnosti daného masivu (diskontinuity, blokovitost, zvodnění atd.) GSI bylo vytvořeno speciálně pro potřeby HB obálky. V jiných státech může být preferováno jiné klasifikační schéma např. Q index – Skandinávie. Pro přepočítání různých klasifikačních schémat mezi sebou lze dohledat příslušné vzorce (Ceballos, Olla and Jiménez 2014). Pro stanovení GSI je více postupů, jednak pomocí jednoduchého odečtu z tabulky dle Hoeka (Hoek et al. 2002) viz Obr. 39. Nebo pomocí dalších veličin, jež můžeme měřit v terénu či na odebraných jádrech: RQD, JCond89, JCond76, Jr, Ja (Hoek, Carter and Diederichs 2013).

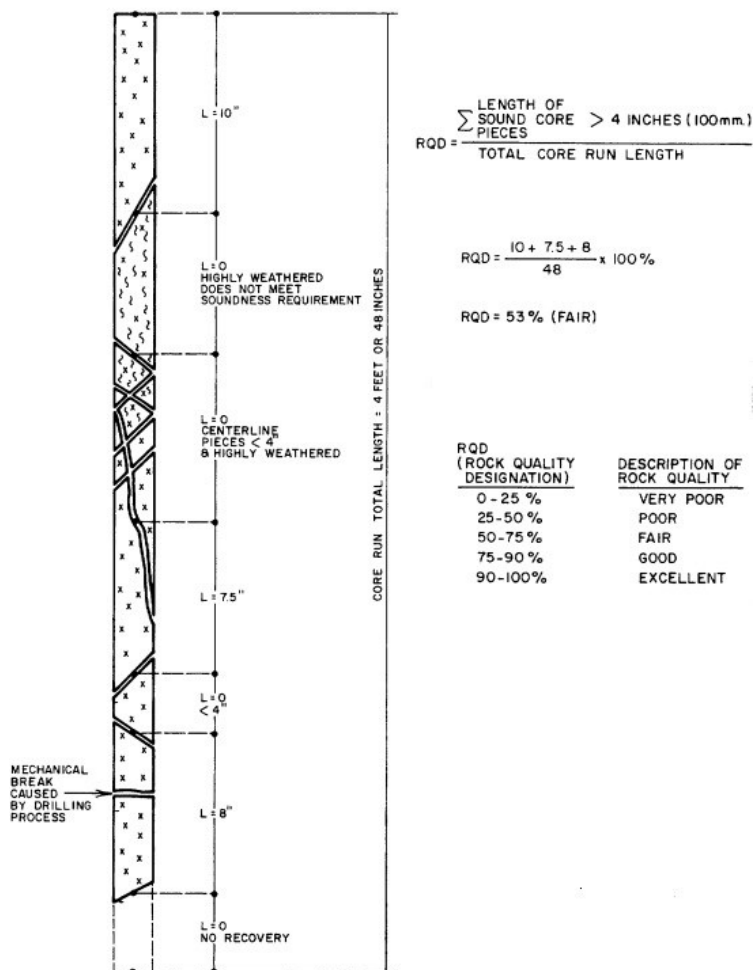


Obrázek 39- Tabulka pro odhad GSI dle blokovitosti stavu na povrchu horniny v návaznosti na RQD a JCond89, převzato z Hoek, Carter, Diederichs (2013)

5.3. RQD +(JCond₈₉, JCond₇₆, Jr+Ja)

Za předpokladu, že mapování v terénu a odhad GSI dle výše zmíněného schématu nemůže být provedeno, lze GSI určit za pomoci RQD – Rock Quality Designation dle Deer et al. (1967) (*Deer et al. 1967 in Deer 1988*) a další proměnné, která nám popíše stav horniny (masivu) na diskontinuitách. Takovou proměnnou může být: JCond₈₉, JCond₇₆, Jr + Ja (*Hoek, Carter, Diederichs 2013*).

Stanovení RQD je velice jednoduché a jedná se v praxi o běžně zaznamenávanou informaci. RQD je vypočteno jako délkový podíl úlomků horniny delších ≥ 10 cm, ku celkové délce návrtnu viz Obr. 40.



Obrázek 40- Stanovení RQD na vrtném jádru, převzato z Deere (1988)

Pro získání dalšího parametru ($JCond_{89}$ atd.) je potřeba mít k dispozici popis diskontinuit nalezených na vrtném jádře, nejlépe provedený zkušeným geologem. Tento popis zahrnuje popis drsnosti puklin, jejich průběžnost, navětrání, zvodnění atd. Výpočet GSI je poté proveden dle jednoho z následujících vztahů (22-24) (Hoek, Carter, Diederichs 2013)

$$GSI = 1,5JCond_{89} + \frac{RQD}{2} \quad (22)$$

$$GSI = \frac{52 \frac{Jr}{Ja}}{(1 + \frac{Jr}{Ja})} + \frac{RQD}{2} \quad (24)$$

$$GSI = 2JCond_{76} + \frac{RQD}{2} \quad (23)$$

Z důvodu minimálního počtu použitelných dat zde bude uvedena pouze tabulka (návod) na určení parametru $JCond_{76}$ podle Bieniawski (1976) viz Obr. 41. Pro návod na určení parametru $JCond_{89}$ podle Bieniawski (1989) a $Jr+Ja$ podle Barton et al. (1974) odkazují čtenáře na původní literaturu obou autorů.

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Hard joint wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Hard joint wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Soft joint wall rock	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Joints open 1 – 5 mm Continuous joints	Soft gouge > 5 mm thick or Joints open > 5 mm Continuous joints
Rating	25	20	12	6	0

Obrázek 41- Návod na určení JCond76, Bieniawski (1976)

5.4. Další metody určení RQD

V případě, že nelze použít metod zmíněných výše, lze RQD odvodit z digitálního skenování stěny tunelu, stěny jámy nebo svahu. Celkem se jedná o 3 metody. První metoda zahrnuje ruční měření na ploše tunelu atd. s metodikou odpovídající určování RQD na jádře (lze využít i digitální fotografie či LIDAR. Tato metodika byla popsána v práci Hutchinson and Diederichs (1996) (Hoek, Carter, Diederichs 2013).

Druhou metodou je určení RQD podle vzdálenosti diskontinuit podle Priest and Hudson (1976) dle vztahu (25), kde λ značí průměrný počet diskontinuit na metr.

$$RQD = 100e^{(-0,1\lambda)}(0,1\lambda + 1) \quad (25)$$

Poslední metodou je určení RQD pomocí indexu blokovitosti a puklinatosti J_v , metodiku rozpracoval Palmström (1982, 2005) a RQD se vypočítá dle vztahu (26) (Hoek, Carter, Diederichs 2013).

$$RQD = 110 - 2,5J_v \quad (26)$$

5.5. Dostupná data

Studiem literatury bylo vybráno celkem 10 vhodných vrtů, ze kterých by bylo možno odvodit GSI pro naši zkoumanou lokalitu. Sedm vrtů se nacházelo v hlavní podoblasti – Březový potok a tři vrty v podoblasti – Srovnávací vrty.

RQD bylo určeno z posledních 20 metrů, průměrem z RQD jednotlivých návrťů. Důvodem pro použití vrtů hlubších než 50 m, je fakt, že úložiště je projektováno do hloubky cca 500 m pod povrchem a použití příliš mělkých vrtů by výsledné RQD mohlo značně podhodnotit.

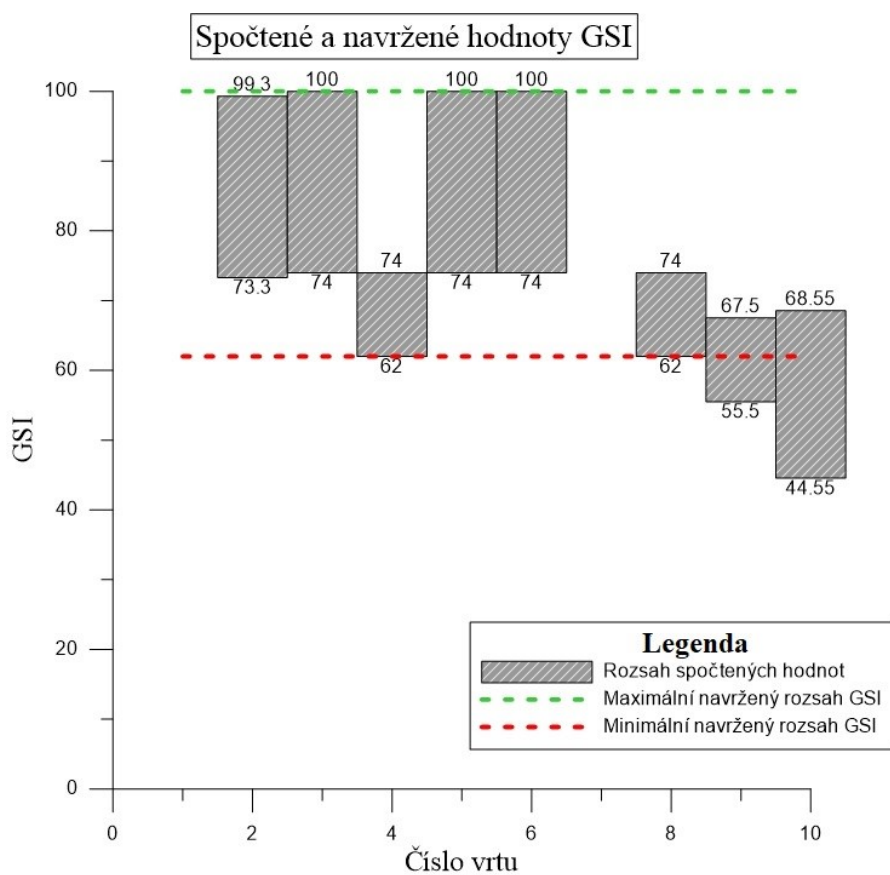
JCond₇₆ bylo určeno u vyhovujících vrtů z posledních 20 metrů vrtného jádra, jak ho popsal geolog přítomný u vrtné soupravy. Autor si je vědom subjektivnosti, jaké popis vrtného jádra podléhá a však, vhodnější způsob pro určení GSI, vzhledem k dostupným datům neexistuje. Zvláště 3 vrty v podoblasti – Srovnávací vrty se ukázali velmi problematickými, neboť se všechny 3 ve svých posledních 20 metrech narazily tektonicky porušenou zónu. Vzhledem k tomu, že podobná situace určitě při stavbě HÚ nenastane, nebyla tato data použita.

Celkem bylo v lokalitě 8 vhodných vrtů. Z každého vrtu bylo podle metodiky popsané výše spočítáno maximální a minimální GSI, které vrtnému jádru odpovídá (vliv subjektivity popisu zmíněn výše). Data

byla vynesena do grafu viz Obr. 42., Tab. 20. a byly navrženy hodnoty pro celou lokalitu. Na příliš nízké hodnoty nebyl brán zřetel, neboť tyto hodnoty odpovídaly poruchovým zónám, ve kterých by úložiště nikdy nebylo vybudováno (samotné ukládací vrty).

Tabulka 20- Data a navržené hodnoty GSI

Podoblast	Číslo vrtu	Označení vrtu	Délka vrtu [m]	RQD [%]	Interval pro JCond ₇₆ [m]	JCond ₇₆	GSI - min.	GSI - max
Březový potok	1	V6	50,4	100,0	-	-	-	-
	2	V10	50,5	98,6	50,5 - 30,6	25 - 12	73,3	99,3
	3	V11	55,3	100,0	55,3 - 30,6	25 - 12	74	100
	4	V12	50,0	100,0	50,0 - 30,2	12 - 6	62	74
	5	V13	50,0	100,0	50,0 - 28,3	25 - 12	74	100
	6	V14	55,0	100,0	55,0 - 35,0	25 - 12	74	100
	7	V18	50,5	98,6	-	-	-	-
Srovnávací lokalita	8	HV1	150,2	100,0	150,2 - 130,6	12 - 6	62	74
	9	HV2	115,5	86,9	115,5 - 93,6	12 - 6	55,5	67,5
	10	HV3	70,0	89,1	70,0 - 48,9	12 - 0	44,55	68,55



Obrázek 42- Spočtené a navržené hodnoty rozsahu GSI

5.6. Parametry m_b , s , a

Parametr m_b je obdoba m_i pro horninový masiv. Stanovuje se dle vztahu (20) a vstupují do něj GSI a D. Přes tyto 2 parametry dochází k redukci m_i na stav, jenž panuje v masivu. HB obálka, kde je použito m_b , nám pak říká, jaké skutečné vlastnosti bychom měly u reálné horniny v terénu očekávat.

Parametry s a a , se pro intaktní horninu stanovují na 1 (s) a 0,5 (a). V případě výpočtu HB obálky pro horninový masiv se využívají vztahy (19) a (21). Znovu vidíme, že do těchto vztahů vstupuje GSI, v případě vztahu pro s , D. Do vztahu pro výpočet a , s .

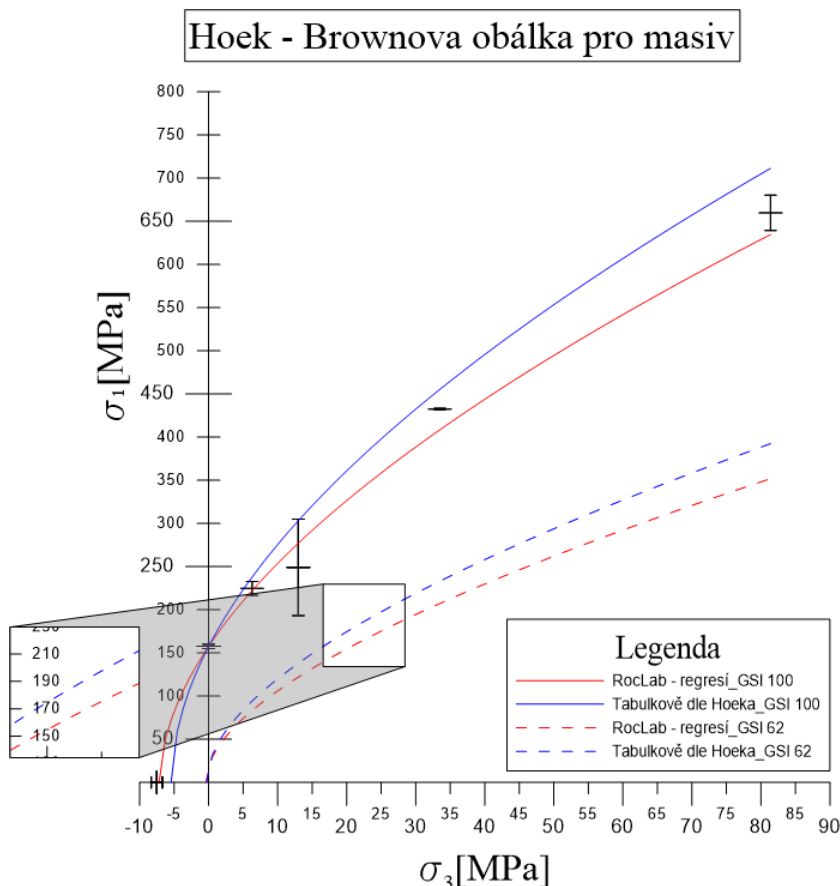
Vypočtené hodnoty výše zmíněných parametrů můžeme vidět v Tab. 21. Porovnání právě těchto dvou metod určení m_i má ukázat rozdíl hodnot pro nejlepší a nejhorší obálku pevnosti (HB).

Tabulka 21- Parametry: m_b , s , a (pro hodnotu GSI – 62)

Metoda určení parametru m_i	m_i	m_b	s	a
RocLab	21,93	5,645	0,0147	0,502
Tab. dle Hoeka	29	7,464	0,0147	0,502

5.7. Kompletní HB obálka pro masiv

Po určení všech nezbytných parametrů byla vytvořena HB obálka pro masiv pro výše zmíněné metody. Tuto obálku včetně intervalu, pro jaké GSI je uvažována, můžeme vidět na Obr. 43.



Obrázek 43- Hoek – Brownova obálka pro masiv, lokalita Březový potok

Předpověď obálky podle Hoeka (Tab. dle Hoeka) je relativně přesná za nízkých plášťových tlaků. Při stoupajícím plášťovém tlaku se však stává méně a méně přesnou, bod zlomu vidíme cca kolem 20 – 25 MPa, kde rozdíl činí více než 15 MPa.

5.8. Pevnostní charakteristika masivu – Rock mass strength

Pevnost horninového masivu získáme upravením vztahu (18), kdy menší hlavní napětí σ_3 dáme rovno 0. Upravením této rovnice pak získáme vztah (27), pevnost horninového masivu v prostém tlaku (σ_c) (Hoek et al. 2002). Při překročení tohoto tlaku dojde k porušení horninového masivu (například na stěně tunelu) a propagaci trhliny až do místa, kde bude napětí na danou horninu menší než pevnost v prostém tlaku horninového masivu. Pevnost horninového masivu v tahu (σ_t) získáme podle vztahu (28) (Hoek et al. 2002).

$$\sigma_c' = \sigma_{ci}' s^a \quad (27)$$

$$\sigma_t' = \frac{s\sigma_{ci}'}{m_b} \quad (28)$$

Globální pevnost masivu σ_{cm} (Global „rock mass strength“) je pojem zavedený Hoekem (1997), který slouží k obecnějšímu vystižení pevnosti horninového masivu pro prvky typu – pilíř, kdy je důležitější znát obecné chování horninového masivu (pevnost) než to, jak daleko dojde k propagaci trhliny v daném pilíři (Hoek et al. 2002). Tuto globální pevnost vypočteme dle vztahu (29).

$$\sigma_{cm}' = \sigma_{ci}' \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4+s}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (29)$$

Youngův modul horninového masivu lze určit dvěma způsoby, starším způsobem pomocí tzv. Modulus Ratio (MR) jak ho navrhnul Deere (1968) a později upravili další autoři (Hoek and Diederichs 2006). Tato starší metoda zde nebude dále probírána. Druhou možností, jak youngův modul masivu určit je vztah (30) podle Hoek and Diederichs (2006). E_i zde značí youngův modul neporušené horniny.

$$E_{rm} = E_i \left(0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left[\frac{(60 + 25D - GSI)}{11} \right]}} \right) \quad (30)$$

Určené pevnostní charakteristiky masivu pro naši lokalitu můžeme vidět v Tab. 22. Čtenáři by si však měli být vědomi toho, že nejnižší navržené GSI (62) je extrémně nízkou hodnotou, a neměli by tedy být znepokojeni velice nízkou hodnotou pevnosti σ_c' .

Tabulka 22- Pevnostní charakteristiky horninového masivu, lokalita Březový potok

	RocLab		Tab. dle Hoeka	
GSI [-]	100,00	62,00	100,00	62,00
σ_c' [MPa]	157,60	18,89	157,60	18,89
σ_t' [MPa]	-7,18	-0,41	-5,43	-0,31
σ_{cm}' [MPa]	156,70	51,40	164,61	58,64
E_{rm} [GPa]	58,70	33,40	58,70	33,40

5.9. Porovnání výsledků

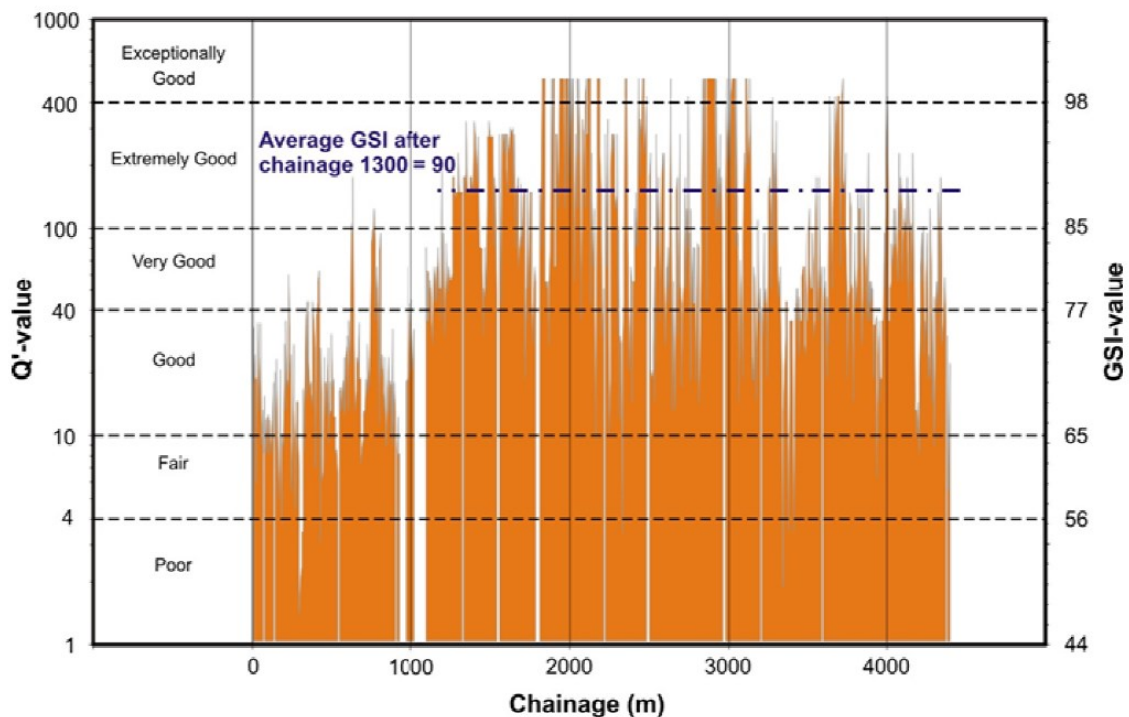
Porovnání výsledků, bude v případě této kapitoly, provedeno s finským a švédským program, kde byla data pro popis horninového masivu (RQD, GSI atd.) zjišťována. V případě švýcarského programu nejsou k dispozici relevantní data (nebyla vybrána finální lokalita, kde by mohl být proveden podrobný průzkum).

5.9.1. Finsko

Parametry horninového masivu byly v případě lokality Onkalo, zjištěny přímým mapováním stěny tunelu a jejím popisem (OMTF 2013). Horninový masiv byl zatřídován pomocí Q indexu (Barton et al. 1974) a následně přepočten na GSI dle vztahu (31). Index Q' je zde modifikovaným Q indexem, kdy není zohledňován efekt vody a stress reduction factor (OMTF 2013).

$$GSI = 9 * \ln Q' + 44 \quad (31)$$

Takto bylo vymapováno celkem 4390 metrů tunelu (OMTF 2013). Na Obr. 44 můžeme vidět graf vymapovaných hodnot Q' a určených hodnot GSI pro celkovou vymapovanou metráž tunelu, bez poruchových zón. Můžeme vidět, že většina tunelu vykazovala velice vysoké GSI (cca 70 a více).



Obrázek 44- Vymapované hodnoty Q' a určené hodnoty GSI, bez poruchových zón; převzato z Posiva (2013)

Pro dobrou charakterizaci horninového masivu byly zvoleny tři hodnoty GSI (71, 81 a 92), pro které bylo vypočteny charakteristiky pro masiv (Hoek – Brown pro masiv) (OMTF 2013). Výsledky můžeme

vidět v Tab. 23 (tahová pevnost a globální pevnost dle Hoeka nebyla určována). Tento postup pro určení GSI je velice přesný, neboť je mapován charakter masivu in – situ a v zájmové hloubce.

Tabulka 23- Parametry horninového masivu (jako hornina je předpokládán migmatit) a HB obálky, stanovené pro 3 hodnoty GSI, hodnoty σ_c' a σ_{cm}' byly dopočteny autorem, lokalita Onkalo, převzato z OMTF (2013) - upraveno

GSI, odpovídající hodnota Q indexu	71 Good	81 Very good	92 Extremely good	
σ_c' [MPa]	23,00	40,00	74,00	
σ_t' [MPa]	1,29	2,69	6,22	
σ_{cm}' [MPa]	31,58	50,52	104,38	
E_m [GPa]	47,00	56,00	61,00	
Parametry HB obálky	m_b	3,36	4,81	7,12
	s	0,04	0,12	0,41
	a	0,50	0,50	0,50

5.9.2. Švédsko

Vlastnosti horninového masivu byly na lokalitě Forsmark určovány popisem vrtných jader v zájmové lokalitě (Glamheden et al. 2008). V jednotlivých doménách byl stanoven Q index (bez zanedbání vlivu vody a stress reduction factor – na rozdíl od lokality Onkalo) a RMR (Glamheden et al. 2008). Pro potřeby této práce bylo stanovené RMR přepočteno na GSI dle vztahu (32) podle Bieniawski (1989). Rock mass rating (RMR) bylo použito místo Q indexu z důvodů přesnějšího přepočtu na GSI (pro správný přepočet by Q index musel zanedbat vliv vody a stress reduction factor).

$$GSI = RMR - 5; \text{ pro } RMR > 23 \text{ (32)}$$

Pro přehlednost byly vybrány parametry pro masiv pouze z horninových domén FFM01 a FFM06. Stanovenými parametry byly: přepočtené GSI, pevnost masivu v prostém tlaku, pevnost masivu v tahu a youngův modul pro masiv a dopočtená globální pevnost masivu. Výsledky můžeme vidět v Tab. 24. Stanovená GSI pro horninové domény byla velice vysoká 82 a 84 a z toho plynou vysoké očekávané hodnoty pevností.

Tabulka 24 -Parametry pro horninové domény FFM01 a FFM06, GSI přepočteno z RMR indexu pomocí vztahu (32), hodnoty σ_{cm}' přepočteny dle návodu v Hoek et al. (2002); převzato z Glamheden et al. (2008) - upraveno

	Horninová doména	Průměr ± směrodatná odchylka
GSI	FFM01	84,0
	FFM06	82,0
σ_c' [MPa]	FFM01	92,0 ± 27
	FFM06	95,0 ± 32,0
σ_t' [MPa]	FFM01	2,4 ± 1,0
	FFM06	2,3 ± 1,0
σ_{cm}' [MPa]	FFM01	149,8 ± 23,0
	FFM06	149,8 ± 23,0
E_{rm} [GPa]	FFM01	72,0 ± 8
	FFM06	70,0 ± 12,0

5.10. Diskuze

Námi určené vlastnosti pro masiv jsou, jak už bylo několikrát řečeno, zatíženy velkou chybou. Vzhledem k absenci kvalitních vrtných dat s dostatečnou hloubkou (ideálně až do hloubky předpokládaného úložiště) a skoro úplnou absencí popisu diskontinuit v dostupných vrtech, je určené GSI – a z něj vycházející parametry, opravdu pouze prvním odhadem. Obecně by se dalo říci, že stanovené GSI je stejné nebo daleko nižší, než které lze reálně očekávat (jak nám ukazují i hodnoty ze zahraničních projektů). Porušení granodioritového masivu v hloubce 500 metrů by teoreticky nemělo být vysoké vzhledem k jeho homogenitě.

Parametr D můžeme považovat za přesný, vzhledem k současným plánům na využití TBM v co nejvyšší míře. Stanovené hodnoty parametrů masivu jsou obecně daleko nižší, než v případě finského či švédského úložiště, v případě finského úložiště je tomu hlavně kvůli daleko vyššímu GSI i když celková pevnost v prostém tlaku je u daných hornin nižší. V případě švédského úložiště je tomu tak kvůli vyššímu GSI a několikanásobně vyšší pevnosti v prostém tlaku obou horninových domén.

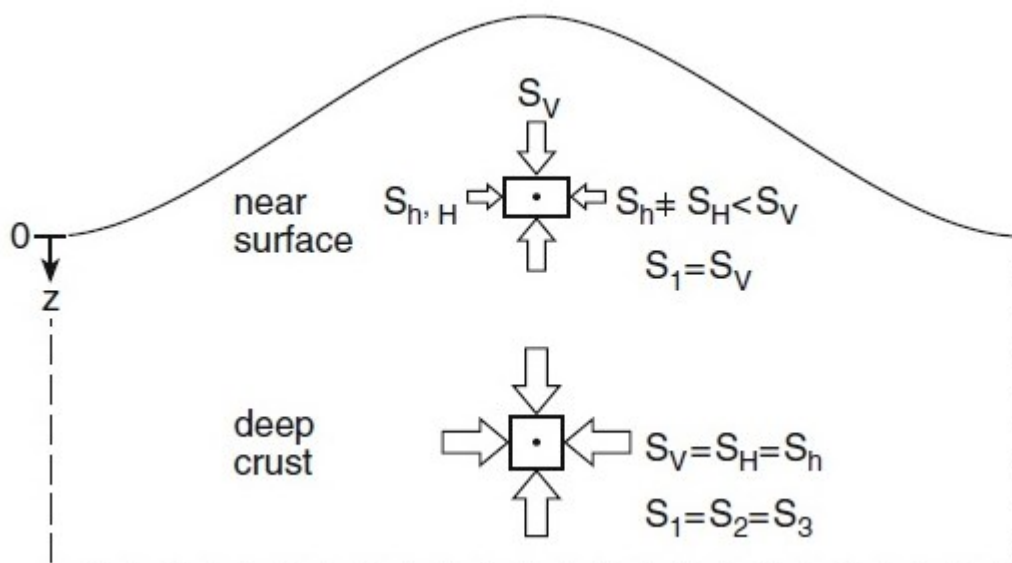
6. Napětí

Pro další část této práce si budeme muset definovat co je napětí v zemské kůře, jeho význam a jak ho změříme - odvodíme. Obecně řečeno, napětí je mechanický stav, který vzniká působením vnějších sil na těleso. V případě zemské kůry se napětí definuje pomocí tzv. hlavních napětí (viz kapitola Tenzor napětí), jež má 3 složky a jednou ze složek je napětí vyvolané působením gravitace (S_v). Dvě zbývající složky jsou maximální horizontální napětí S_H a minimální horizontální napětí S_h . Vždy platí že tyto 3 složky jsou na sebe kolmé.

Celá tato kapitola povede k odhadnutí teoretického tenzoru napětí, který byl mohl popisovat naši lokalitu Březový potok. Tato data potom spolu s určenou pevností budou použita pro konstrukci jednoduchého modelu tunelu a výpočet deformací. Samotný model bude vytvořen v programu Plaxis.

Nejjednodušším stavem, kdy $S_v=S_H=S_h$, je tzv. lithostatické napětí. Existence tohoto stavu je popisována Heimovo pravidlem (Heim, 1878 in Zang and Stephansson 2010), které říká, že s vzrůstající hloubkou

a konstantním zatížením dochází uvnitř horniny pomocí creepu (ploužení) k přerozdělení a vyrovnání vnitřních napětí. Tzn. dojde k přechodu ze stavu $S_V \neq S_H \neq S_h$, kde S_V je největší, do stavu $S_V = S_H = S_h$ (viz



Obr 45).

Obrázek 45- Heimovo pravidlo demonstrující přechod nestejně zatížené horniny při povrchu do lithostatického stavu v hloubce, $S_1 = S_V$, $S_2 = S_H$, $S_3 = S_h$, z vyjadřuje hloubku, převzato ze Zang and Stephansson (2010)

V rámci aplikované geologie a podzemních staveb je lithostatické napětí nepoužitelné, a to nejen z důvodu malé hloubky, ale také kvůli tektonickému režimu. Tektonický režim panující na dané lokalitě ovlivňuje nejen horizontální napětí S_H a S_h , ale také může ovlivnit velikost vertikálního napětí S_V . Běžný způsob odhadu hlavního vertikálního napětí S_V se provádí dle vztahu (34), kde γ značí objemovou hmotnost dané horniny a D značí námi požadovanou hloubku. Takto odhadnutá velikost vertikálního napětí se nazývá v angličtině overburden neboli tíha nadloží. Martin and Chandler (1993) však konstatují, že velikost naměřeného vertikálního napětí se od tíhy nadloží může lišit v rozmezí 1–3 násobku. Tato variace je běžně způsobena nerovnostmi – výběžky na blízkých zlomech, které lokálně ovlivňují rozložení napětí. Variace je běžně největší při povrchu a do hloubky klesá (Martin et al. 2003). Toto ovlivnění může dosáhnout až do vzdálenosti 150 metrů od zlomu (Martin and Chandler 1993).

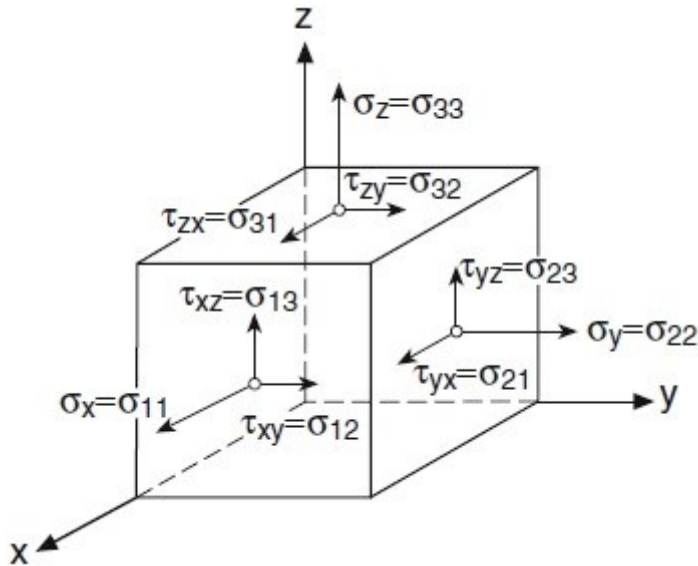
$$S_V = \gamma D \quad (34)$$

Martin et al. (2003) dále říkají, že v oblasti Skandinávského štítu, je koeficient variace pro lineární vztah (34) cca 20 % pro hloubky 500 a hlouběji a může překračovat až 100 % v případě menších hloubek.

6.1. Tenzor napětí

Mechanické napětí, jako fyzikální veličina, je tenzor druhého řádu, který má v trojrozměrném prostoru 3x3, tedy celkem 9 složek. Jednotlivé složky si můžeme demonstrovat na elementární krychli (Obr. 46), na každou plošku může působit síla ve třech nezávislých směrech: kolmo na plochu a rovnoběžně s ní ve směru zbývajících os. Jednotkou složek napětí je tlak v pascálech [Pa]. Složky jsou označeny symboly σ pro napětí působící kolmo (=normálová napětí) k ploše a τ pro napětí působící rovnoběžně s

plochou (=smyková napětí), tyto znaky jsou poté doplněny o příslušný index označující osu (pracujeme v kartézské soustavě).



Obrázek 46- Elementární krychle se složkami tenzoru napětí, převzato ze Zang and Stephansson (2010)

Zapišeme-li tenzor napětí jako matici dostaneme (34). Tímto zápisem vyjádříme nejen velikost, ale i orientaci jednotlivých napětí a můžeme s nimi tedy dále pracovat. V této práci budeme používat znaménkovou konvenci mechaniky hornin, tzn. tlak kladný, tah záporný.

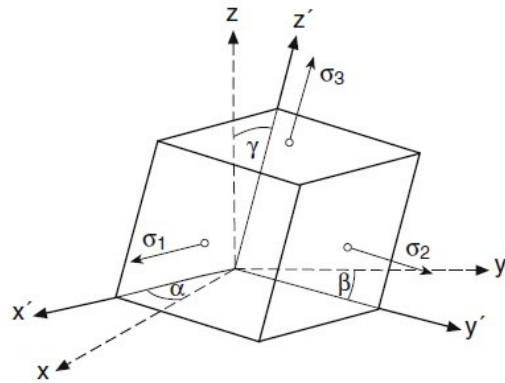
$$\begin{matrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{matrix} \quad (34)$$

Důležitým pojmem se kterým často můžeme potkat je tzv. hlavní napětí. Hlavní napětí je takové napětí, jehož smykové složky jsou rovné nule. Tenzor hlavních napětí by pak vypadal takto (35).

$$\begin{matrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{matrix} \quad (35)$$

Tenzor hlavních napětí můžeme získat pomocí transformace (rotace) tenzoru napětí. Při práci s hlavními napětími jsou pak jednotlivé složky pro jednoduchost běžně označovány jako $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, kdy platí že osy

jsou vybrány tak, aby platilo $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. V případě, že bychom si chtěli hlavní napětí zobrazit na



elementární krychli dostali bychom toto (Obr. 47).

Obrázek 47- Elementární krychle zobrazující hlavní napětí, osy x' , y' , z' zobrazují rotaci od původních os souřadnicového systému, převzato ze Zang and Stephansson (2010)

6.2. Význam napětí v Inženýrské geologii

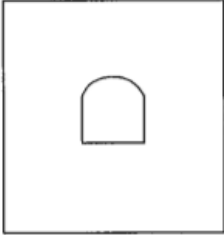
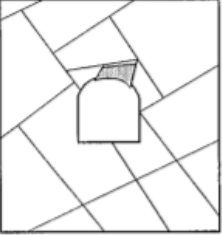
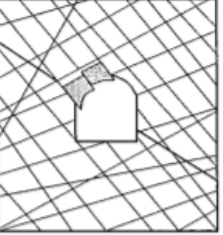
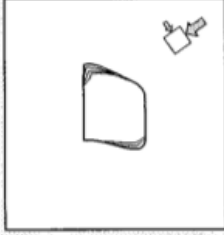
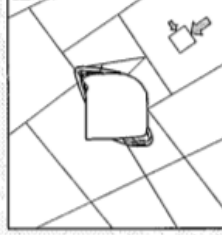
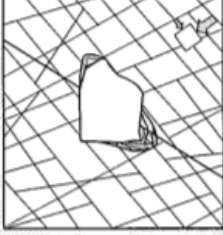
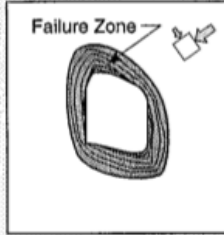
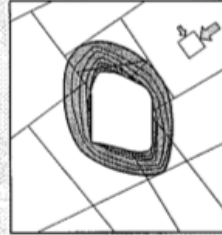
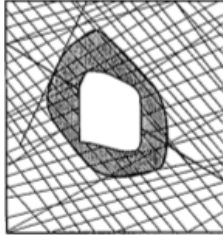
Znalost tenzoru napětí horninového prostředí je kritická pro úspěšnou a bezpečnou výstavbu prakticky veškerých podzemních staveb. Zvláště pak tunelů a kaveren, kde v lepším případě musí být kvůli nepříznivým napěťovým podmínkám v masivu naddimenzováno ostění a upraven režim ražby. Špatná prozkoumanost a znalost horninového masivu může být v případě těchto staveb až fatální.

Při navrhování ražby je nutné plánovat tak, aby docházelo k ražbě v co nejméně napjatých horninách s vysokou pevností. Obecně se při ražbách velkých kaveren postupuje tak, že delší osa je orientována paralelně se směrem S_H (Mimaki and Matsuo 1986 in Zang and Stephansson 2010).

Porušení je obecně v tunelech dvojího typu: a) strukturální – způsobené gravitací a za b) způsobené napětím. Porušení typu (a) je běžný typ porušení pro případy, kde je malé horizontální napětí (malé hloubky) a dochází tak uvolňování klínovitých bloků ze stropu či boků tunelu, které vlivem gravitace kloužou / padají do prostoru tunelu / kaverny. Porušení typu (b) nastává ve chvíli, kdy je překonána pevnost masivu. Porušení tohoto typu je velice nebezpečné a je cílem se před ním zabezpečit (ostění atd).

6.3. Stress to strength ratio

Hlavním ukazatelem, podle kterého můžeme usuzovat jakým mechanismem dojde k případnému porušení masivu, je tzv. stress to strength ratio. Jedná se o poměr pevnosti a napětí. Pro hloubky do 400 metrů lze využít poměr vertikálního napětí ku pevnosti v prostém tlaku (Muirwood 1972, Adyan et al. 1996 in Martin et al. 2003). V případě poměru $\sigma_{ci}/S_v > 2$ a hloubce menší než 400 bude s největší pravděpodobností docházet k deformacím. Hoek a Brown (1980) na základě svého výzkumu zavedli jako index stability tunelu poměr mezi σ_{ci} a $S_H(\sigma_1)$, který byl odvozen pro čtvercové tunely v Africe. Hoekův stabilitní index nabývá hodnot 0,1 až 0,5 (Martin et al. 2003). Deformace v závislosti na velikosti Hoekova indexu stability a porušení masivu diskontinuitami je dobře vidět na Obr. 48.

	Massive	Moderately Fractured	Highly Fractured
Low In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$)	 <p>Linear elastic response.</p>	 <p>Falling or sliding of blocks and wedges.</p>	 <p>Unravelling of blocks from the excavation surface.</p>
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 > \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$)	 <p>Brittle failure adjacent to excavation boundary.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.</p>
High In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 <p>Failure Zone Brittle failure around the excavation.</p>	 <p>Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.</p>	 <p>Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.</p>

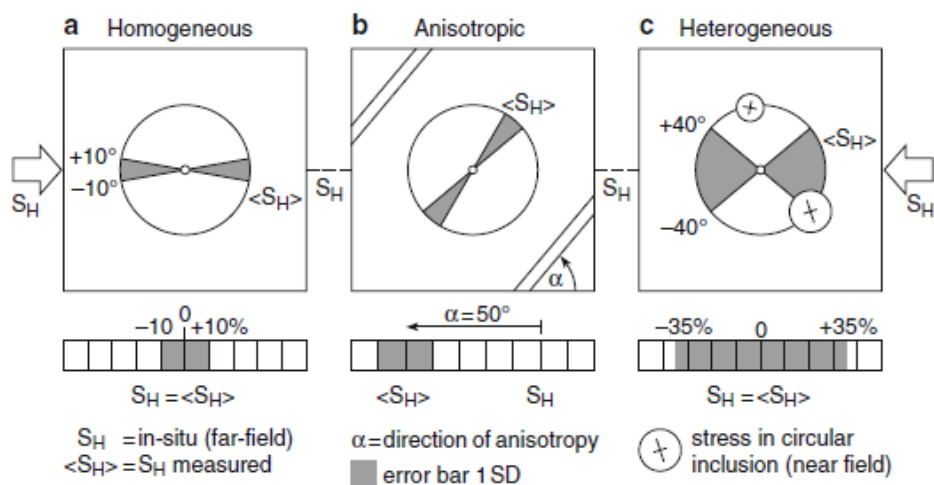
Obrázek 48- Deformace tunelu v závislosti na velikosti „tunnel stability index“ podle Hoeka a porušení masivu diskontinuitami, převzato z Martin, Kaiser, McCreath (1999) - upraveno

6.4. Určování napjatosti horninového masivu

Metody určování napjatosti masivu a teorie za tím, je velice obsáhlé téma zasluhující si vlastní práci. V této práci bude tedy toto téma pouze lehce nakousnuto a pro zájemce bude odkázáno na literaturu zabývající se touto problematikou podrobněji.

Důležitý fakt ohledně napjatosti masivu je to, že napjatost nelze měřit – zjišťovat přímo, ale je nutno použít metod nepřímých. Hlavním předpokladem je zde Hookův zákon a lineární vztah mezi napětím a přetvořením. Touto analýzou mezi přetvořením a napětím lze pak zpětně vypočíst nutné vypočíst in-situ napětí.

Přesnost měření napětí pro izotropní a anizotropní, či heterogenní horniny vystihuje Obr. 49.



Obrázek 49 - Přesnost měření napětí pro homogenní (A), anizotropní (B) a heterogenní (C) horniny, převzato ze Zang and Stephansson (2010)

V případě homogenních hornin je přesnost měření směru a velikosti napětí velice dobrá a běžně se pohybuje okolo 10 % (Zang and Stephansson 2010). Anizotropní horniny jsou problematictější, neboť anizotropie způsobuje rotaci napětí směrem k ose anizotropie (foliace, usměrnění atd.) (Zang and Stephansson 2010). Měření napětí heterogenních hornin je nejméně přesné a zpravidla je zatíženo vysokou mírou nejistoty, která vychází z heterogenity materiálu (Zang and Stephansson 2010). V okolí heterogenních hornin tak panují výrazně odlišné podmínky (co se týče napjatosti), než by se dalo předpokládat z geologicko – tektonických poměrů dané oblasti.

6.5. Základní princip

Jak už bylo zmíněno výše, valná většina všech metod určování napjatosti je založena na Hookově vztahu mezi napětím a přetvořením. Jak můžeme vidět, do vztahu (36) vstupuje youngův modul E , který musíme znát a dále L a L_0 , jež vyjadřují změnu rozměrů v měřeném směru. Pro $E = 100 \text{ GPa}$, je potřebná přesnost měření deformace $0,1 \mu\text{m}$.

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{L-L_0}{L_0} \quad (36)$$

Pro měření změny rozměrů (délek) se velice často využívá tzv. tenzometrů (strain gauges), což je zařízení, které se připevní na vzorek a na základě změny rozměrů, mění svůj elektrický odpor (Zang and Stephansson 2010). Různý počet a konfigurace těchto čidel umožňuje měřit změny délek ve všech směrech. Na základě vztahu (37) je pomocí odporu změřeného v klidu R_0 a kalibrační konstanty „ k “ určeno přetvoření. Dále postupujeme dle vztahu (36), za předpokladu znalosti youngova modulu E .

$$\frac{R}{R_0} = k\varepsilon = k \frac{L-L_0}{L_0} \quad (37)$$

Postupů pro odvození tenzoru napětí bylo vyvinuto mnoho, v této práci se budu zabývat pouze jejich zlomkem. Pro kompletní přehled odkazuji zájemce na práci Zang and Stephansson (2010). Obecně by se tyto metody daly rozdělit podle užití na: metody laboratorní (na připravených vzorcích), měření ve vrtu a metody využívající zemětřesení. Pro naši práci budou nejdůležitější metody určování napjatosti ve vrtu.

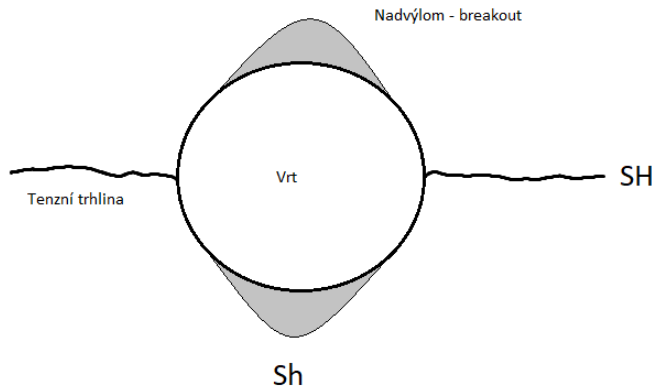
6.6. Měření ve vrtu – HF a příbuzné metody

Nejznámější metodou pro zjištění tenzoru napětí je tzv. Hydro fracturing (HF). Tato metoda se dá využít i pro utěsněná podzemní díla větších rozměrů (chodby atd.). Principem HF je pumpování kapaliny (nejčastěji vody) do vrtu (méně často, podzemní chodby), kdy tlak kapaliny vytvoří na stěně vrtu / chodby trhlinu. Tato trhlina nám udává velikost S_h . Směr S_h je kolmý, na směr protažení tahové trhliny. Velikost S_h je odečtena z grafu tlaku vody v čase, přesněji tlaku vody při zavření trhliny (Zang and Stephansson 2010). V případě, že bychom chtěli znát i velikost S_H , musíme znát pevnost dané horniny v prostém tahu (T_0) a vrcholový tlak hydraulické kapaliny (Zang and Stephansson 2010). Metoda HF má několik modifikací: HTPF, sleeve fracturing a BBO.

Modifikace HTPF (hydraulic test on pre-existing fractures), využívá k určení velikosti S_h a S_H na už existujících trhlínách. Výhodou této modifikace je, že není potřeba znát pevnost horniny v prostém tahu (T_0) (Zang and Stephansson 2010). Pro zjištění 2D a 3D tenzoru napětí je teoreticky potřeba 3 a 6 už existujících trhlín. Reálně je však potřeba kolem 5-10 trhlín pro 2D tenzor napětí a 9-20 trhlín pro 3D tenzor napětí (Zang and Stephansson 2010). Nevýhodou HTPF je časová náročnost a nutnost přesného zaměření existujících trhlín.

Další modifikací HF je tzv. sleeve fracturing. Tato modifikace používá k vyvození napětí na stěnu tunelu speciální frakovací rukáv (fracking sleeve). Výhoda této metody je, možnost zjišťovat tenzor napětí i u velice propustných / rozpukaných hornin.

Borehole – breakout (BBO) je poslední technikou, jak zjistit napjatost z vrtu. Tato metoda využívá toho, že vrt má tendenci tvořit „nadvýlom“ ve směru S_h . Toto je způsobeno koncentrací napětí na stěnách vrtu. V místech, kde je překročena tlaková pevnost horniny, dochází k vyvinutí trhlín a následnému „nadvýlomu“ (Zoback et al., 1985; Bell, 1990 in Tingay et al. 2008). S BBO souvisí také tzv. drilling induced fractures (tenzní trhliny viz Obr 50.), což jsou vertikální, úzké a ostře omezené trhliny. Tyto trhliny nemají tendenci tvořit „nadvýlom“ a nacházejí se v místech s minimální koncentrací napětí na stěně vrtu. Tenzní trhliny jsou tedy zhruba paralelní se směrem S_H (Aadnoy and Bell 1998 in Tingay et al. 2008) Vzájemnou souvislost směru S_h , S_H a tenzních trhlín můžeme vidět na Obr. 50.

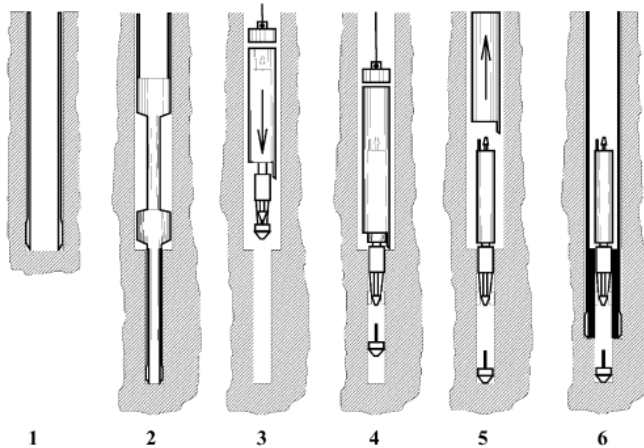


Obrázek 50 - Souvislost S_h , S_H a „nadvýlomu“ ve vrtu

6.7. Měření ve vrtu – relaxační metody

Relaxační metody jsou založeny na využití tenzometrů v různých zapojeních a relaxaci horniny při oddělení od horninového prostředí. Po oddělení horniny (vrtného jádra) od okolního napjatého prostředí, dochází k relaxaci vzorku – zvětšení objemu. Měřením této změny objemu jsme schopni zpětně vypočítat tenzor napětí působící na okolní horninu podle Hookova zákona (Zang and Stephansson 2010). Na základě umístění tenzometrů dělíme relaxační metody na: undercoring (měříme relaxaci horniny na plášti vrtné sondy), overcoring (měříme relaxaci odvrtného jádra) a mixed coring (kombinace výše zmíněných) (Zang and Stephansson 2010).

Nejčastěji používanou metodou je overcoring v kombinaci s použitím pilotního vrtu (Ljunggren et al. 2003). Podle práce Ljunggren et al. (2003) tuto metodu dále dělíme podle použitého měřidla na tzv. soft inclusion cells, využívající tenzometry a na metodu využívající měřidla absolutních deformací. Dalším rozdílem mezi těmito metodami je, že v případě metody s tenzometry měříme tenzor napětí ve 3D, nevýhodou je nutnost mít neporušené jádro dlouhé mezi 40 – 60 cm (Ljunggren et al. 2003). Metoda využívající měřidla absolutních deformací potřebuje neporušené jádro délky alespoň 30 cm a pro 3D tenzor napětí je nutné provést 3 neparalelní měření – vrty (Ljunggren et al. 2003). Metodika měření s tenzometry je demonstrována na Obr. 51.



Obrázek 51 - Provedení měření napětí pomocí soft inclusion cell, 1 – počáteční stav, 2 – odvrtání pilotního vrtu a odebrání jádra, 3 – spuštění měřícího zařízení do pilotního vrtu, 4 – 5 vložení měřícího zařízení s tenzometrem do vrtu, 6 – převrtání pilotního vrtu + samotné měření; převzato z Ljunggren et al. (2003)

Existují i další metody měření napětí ve vrtu, které nepotřebují pilotní vrt. Jsou jimi „doorstopper“ a kónické a hemisférické tenzometry (Zang and Stephansson 2010). Každá z tří metod má svoje výhody a nevýhody. Nevýhodou doorstopperu je nutnost mít rovnou a vyleštěnou plochu na konci vrtu, na kterou je doorstopper připevněn a možnost měřit napětí pouze na ploše kolmé k ose vrtu (Ljunggren et al. 2003). Výhodou je relativní rychlost měření a nutnost provést převrtání pouze v délce do 5 cm (Ljunggren et al. 2003). Nevýhodou metody používající kónické a hemisférické tenzometry je pracná příprava koncové části vrtu a problém s pórovými tlaky (nutnost ji upravit do požadovaného tvaru – kužel atd.) (Ljunggren et al. 2003). Výhodou je pak krátká délka převrtání a možnost měřit 3D tenzor napětí v jednom vrtu (Ljunggren et al. 2003).

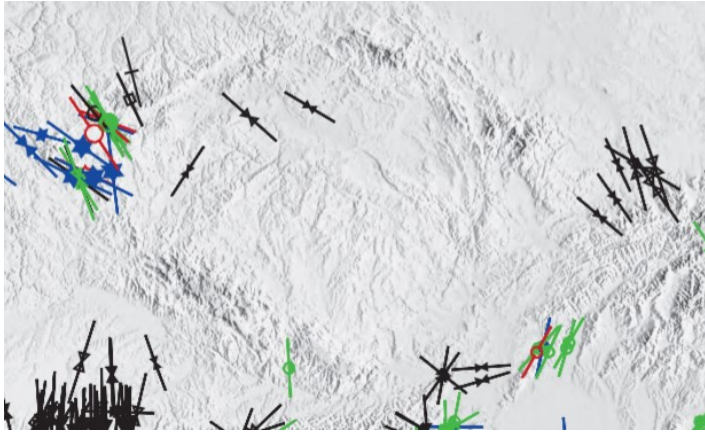
6.8. Další metody

Příbuznou metodou k měření napětí ve vrtu je metoda RLRV (relief of large rock volumes), jejíž předpoklady jsou stejné (změna rozměrů – lineární vztah mezi napětím a přetvořením). Metoda využívá měření radiální deformace celého tunelu se zpětnou numerickou analýzou a stanovení tenzoru napětí v okolí tunelu (Zang and Stephansson 2010).

Poslední metodou, kterou si zde představíme je tzv. kompenzační metoda využívající plochý lis. Výhoda této metody je, že nepotřebujeme znát deformační modul horniny (E) a její princip je vytvoření žlábků / štěrbin, do které je lis umístěn. Cílem je za pomoci napětí vyvozeného lisem kompenzovat relaxaci způsobenou vytvořením štěrbin (Zang and Stephansson 2010).

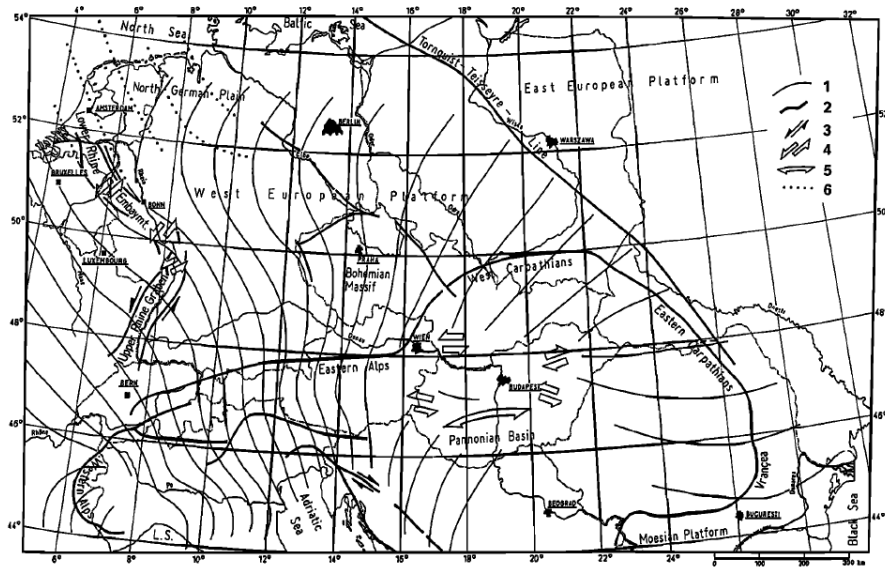
6.9. Dostupná data pro lokalitu Březový potok

Data pro určení tenzoru napětí na lokalitě BP nejsou k dispozici. Jak můžeme vidět na Obr. 51, kde vidíme výřez z World Stress Map pro ČR, v České republice je použitelných dat minimum.



Obrázek 52- Výřez z WSM pro ČR, orientace delší osy zde značí směr S_H , převzato z Heidbach et al. (2016) – upraveno

Pro odhadnutí směru S_H jsem se řídil trendem, který popsán v práci Grunthal and Stromeyer (1992), kteří pro Český masiv popisují trend S_H v západních Čechách ve směru SSZ. Tento trend se směrem na východ postupně mění a otáčí se postupně na S a dále na SSV viz Obr. 53.



Obrázek 53- Mapa trendu napětí (S_H) pro střední Evropu, převzato ze Grunthal and Stromeyer (1992)

Odhadnutý směr (azimut) S_H , tak nabývá hodnot $300^\circ - 340^\circ$. Velikost S_h a S_H byla určena z měření napětí v podzemní laboratoři Bukov v hloubce 600 metrů pod povrchem. V podzemní laboratoři Bukov bylo provedeno měření tenzoru napětí pomocí 3 metod (Souček et al. 2017). První metodou byla HF, druhou metodou byl overcoring za pomoci kónické hlavy (CCBO) a poslední metodou bylo měření radiální deformace tunelu a zpětný výpočet napětí dle matematického modelu (INVGEM) (Souček et al. 2017). Výsledky jednotlivých metod můžeme vidět v Tab. 25.

Tabulka 25- Měření tenzoru napětí v podzemní laboratoři Bukov, HF - hydrofracturing, CCBO - compact conical borehole overcoring, INVGEM - měření radiální deformace tunelu a zpětný výpočet tenzoru napětí pomocí matematického modelu, ** - S_v vypočteno jako tíha nadloží, převzato ze Souček et al. (2017)

Method	S_v [MPa]	S_H [MPa]	OH [°]	S_h [MPa]
HF	16.5**	17 – 26	358 – 23	10 – 14
CCBO*	20.5	11.8	55	11.5
INVGEM	16.5**	18.7	30	11.0

Z těchto výsledků byl odhadnut náš tenzor napětí (pro lokalitu Březový potok) takto: $S_v = 13,29$ MPa; $S_h = 11,6 - 13$ MPa a $S_H = 16 - 26$ MPa viz Tab. 26. Horizontální složka tenzoru napětí (S_v) byla stanovena jako váha nadloží pro hloubku 500 metrů. Velikosti vertikálních složek tenzoru napětí byly převzaty z naměřených dat s tím, že byla převzata nejnižší a nejvyšší hodnota. Výjimkou byla horní hranice S_h , jež byla snížena, aby byl zachován jednotný tektonický režim ($S_v > S_h$). To, že odhadnutý tenzor napětí se zakládal na datech z hloubky 600 metrů není samozřejmě ideální. Nebyla však dostupná žádná jiná data.

Tabulka 26- Odhadnuté hodnoty tenzoru napětí pro naši lokalitu

S_v [MPa]	S_H [MPa]	azimut [°]	S_h [MPa]
13,29	16-26	300 - 340	11,6 - 13

6.10. Porovnání výsledků

Odhadnuté hodnoty tenzoru napětí budou porovnány s hodnotami tenzorů napětí na lokalitách pro švédský a finský program HÚ. Vzhledem k rozdílnému geologickému vývoji ČR a obou skandinávských oblastí (kontinentální zalednění) je nutné brát dále prezentované výsledky pouze jako porovnání na úrovni teoretických podmínek.

Tenzor napětí na lokalitě Onkalo byl měřen za pomoci celé škály metod (včetně overcoringu a HF). Velikost obou hlavních směrů napětí bylo stanoveno na základě měření a bylo paralelní s povrchem. Vertikální složka tenzoru napětí je uvažována jako tíha nadloží, neboť zde není žádný odklon S_v od vertikály (OMTF 2013).

V případě lokality Försmark byla využita jiná metodika, založená na interpretaci širších trendů z různých metod měření napětí (nepřímého) (Martin 2007). Tenzor napětí byl stanoven za pomoci dat z overcoringu, BBO a vztahu mezi S_h , S_H a pevností v prostém tlaku (Martin 2007). Vertikální složka byla uvažována jako tíha nadloží (Martin 2007). Pro kompletní použité metodiky odkazují čtenáře na práci Martin (2007).

Tabulka 27 - Porovnání tenzorů napětí, převzato ze Souček et al. 2017; OMTF 2013; Martin 2007 - upraveno

	S_v [MPa]	S_H [MPa]	azimut [°]	S_h [MPa]
Březový potok	13,29	16-26	300-340	11,6-13
Onkalo (Fi)	13,25	22,6-34,6	275	12,95-20,95
Försmark (Šv)	13,25	34,8-47,2	325	18,6-27,8

Jak můžeme vidět v Tab. 27, vertikální složka napětí je velice podobná. Značné rozdíly můžeme vidět až v případě S_h a S_H , kdy nejnepríznivější podmínky panují na lokalitě Forsmark a potom na lokalitě Onkalo. Zajímavostí je podobnost azimutů S_H v obou Skandinávských projektech s těmi, které byli odhadnuty pro lokalitu BP.

6.11. Diskuze

Při aplikaci Hoekova stabilitního indexu na určený tenzor napětí (S_H : 16 – 26 MPa) a určené pevnosti v prostém tlaku (157,6 MPa), dostáváme hodnotu toho indexu 0,1 – 0,16. To odpovídá dle Obr. 48 nízkému až střednímu in – situ napětí, což jsou velice příhodné podmínky. I v případě, že by reálný tenzor napětí na lokalitě BP byl daleko vyšší (např. 36 MPa), stále bychom se pohybovali v rozmezí středního napětí. Stabilitní index, dopadá nejhůře na lokalitě Onkalo, a to kvůli nízké pevnosti v prostém tlaku. Stále je však v rozmezí střední in – situ napjatosti.

Jak už bylo řečeno v kapitole 6.9 – Dostupná data, vyvozovat nějaké širší záběry ohledně napjatosti na lokalitě BP nemá moc velký smysl. Hodnoty zjištěné v podzemní laboratoři Bukov, se nacházejí velice daleko (od lokality BP) a v jiné hloubce (600 metrů pod povrchem). I v případě, že by měření byla provedena přímo na lokalitě BP, stále je zde efekt heterogenity horninového masivu. Pro potřebu ilustrativního modelu, však tento odhadnutý tenzor napětí stačí.

Zajímavostí je, že určený azimut hlavního horizontálního napětí je velice podobný těm, které byly určeny pro lokalitu Onkalo a Försmark.

7. Numerický model

Výsledky laboratorních testů a odhadnutého tenzoru napětí budou sloužit ke konstrukci jednoduchého numerického modelu úložiště. Hlavním cílem modelu bude ukázat, jak se liší deformace tunelu v závislosti na orientaci k hlavnímu směru tenzoru napětí (S_H), na použitých parametrech HB obálky (plně definované či pouze odhadnuté viz m_i) a na velikosti tenzoru napětí (viz Tab. 26). Důraz zde bude kladen na parametry HB obálky. Triaxiální zkoušky jsou velice drahá a časově náročná záležitost a je tedy důležité vědět, zda mohou mít v konečném důsledku smysl.

7.1. Výběr programu pro numerické modelování, základní parametry a konstituční model

Pro modelování byl použit program PLAXIS 2D (od stejnojmenné firmy), verze z roku 2016. Této verzi byla dána přednost, neboť dovoluje využít vlastní tenzor napětí (field stress) pro definici počátečních podmínek (dalšími možnostmi jsou K0 procedura a tzv. „gravity loading“) ve formě 3 hlavních napětí (σ_1 , σ_2 , σ_3) a úhlu rotace největšího hlavního napětí (σ_1). Tenzor napětí (field stress) byl zachován konstantní během všech fází výpočtu. PLAXIS 3D tuto možnost, v nám dostupné verzi, neumožňuje.

Typ modelu byl „plain – strain“, jednotlivé elementy měly 15 uzlových bodů. Polygon, na kterém byl prováděn výpočet měl hrany o délce 100 krát 100 metrů, vlastní tunel byl umístěn v hloubce 50 metrů uprostřed polygonu. Celý polygon byl suchý – hladina HPV nebyla definována. Námí zvolený konstituční – materiálový model byl „Hoek – Brown“ jak je definován v: „Plaxis (2016): Validation – Hoek – Brown material model – 2016“. Geometrie tunelu byla dokonalý kruh s průměrem 5 metrů bez ostění (plate), či rozhraní (interface). Síť byla v okolí tunelu náležitě zjemněna. Okrajové podmínky byly pevně uzamčeny (fully fixed). Typ výpočtu byl nastaven jako „Plastic calculation“. Pro výpočet počátečních podmínek byly využita metoda tenzoru napětí „field stress“.

7.2. Vstupní data

Jako vstupní data pro náš model sloužily výsledky z kapitol: „Laboratorní část – intact rock“ a „Horninový masiv“. Suchá objemová hmotnost byla převzata z práce Petružálka (2017) (viz Tab. 4). Jmenovitě se jednalo o youngův modul E_m pro masiv, pevnost v prostém tlaku, poissonovo konstantu, parametr m_i , parametr D a GSI. Jak můžeme vidět v Tab. 28, máme celkově 4 sady vstupních parametrů pro numerický model. Celkově lze rozlišit jednotlivé sady na 2 základní případy. „HB – odhad“, odpovídá situaci, kdy nemáme HB obálku pevnosti plně definovanou a parametr m_i je pouze odhadnut (zde bylo využito tabelované hodnoty pro granodiorit). „HB – plně definováno“, je případ plně definované HB obálky s parametrem m_i zjištěným nelineární regrese laboratorních dat („RocLab regrese“). Materiálový model programu PLAXIS, si parametr m_b dopočítává sám (viz výše uvedená citace). Youngův modul pro masiv (pro GSI neodpovídající „100“) je nutno vložit už redukovaný (viz podkapitola „Pevnostní charakteristika masivu“).

Tabulka 28 - Vstupní parametry pro numerický model, barevné kódování rozlišuje jednotlivé sady parametrů a bude použito i dále

	HB - odhad		HB - plně definováno	
	Neporušeno	Porušeno	Neporušeno	Porušeno
γ [kN/m ³]	25,66	25,66	25,66	25,66
E_m [GPa]	58,70	33,40	58,70	33,40
ν [-]	0,28	0,28	0,28	0,28
σ_{ci} [MPa]	157,60	157,60	157,60	157,60
m_i [-]	29,00	29,00	21,93	21,93
GSI [-]	100,00	62,00	100,00	62,00
D [-]	0,00	0,00	0,00	0,00

7.3. Výpočetní scénáře

Spojením našich čtyř sad vstupních parametrů a tenzoru napětí (určené intervaly pro jednotlivé součásti) dostáváme celkem 16+2 výpočetních variant, které mohou teoreticky nastat. Tyto výpočetní varianty jsou uvedeny v Tab. 29. Pro rozlišení použitých sad parametrů je zachováno barevné kódování (viz Tab. 28). Dva přidání scénáře byly zahrnuty po provedení prvotní sady výpočtů a mají redukované maximální horizontální napětí. Vzhledem k orientaci tunelu vůči S_H jsou nejméně příznivé scénáře, varianta 5 – 8_mod a 13 – 16_mod.

Tabulka 29 - Výpočetní varianty; „Horizontální napětí“ – odpovídá napětí kolmo ke stěně tunelu; složka tenzoru napětí působící paralelně se směrem tunelu zde není zahrnuta vzhledem k 2D charakteru výpočtu; varianta "8_mod" a "16_mod" byly přidány potom, co bylo zjištěno, že varianta 8 a 16 vede ke kolapsu tunelu (uvedeno v poznámce)

Varianta	Vertikální napětí [MPa]	Horizontální napětí [MPa]	Poznámka
1	13,29	11,60	-
2	13,29	13,00	-
3	13,29	11,60	-
4	13,29	13,00	-
5	13,29	16,00	-
6	13,29	26,00	-
7	13,29	16,00	-
8	13,29	26,00	Kolaps
8_mod	13,29	21,00	Horní hranice - 23 MPa
9	13,29	11,60	-
10	13,29	13,00	-
11	13,29	11,60	-
12	13,29	13,00	-
13	13,29	16,00	-
14	13,29	26,00	-
15	13,29	16,00	-
16	13,29	26,00	Kolaps
16_mod	13,29	21,00	Horní hranice

7.4. Výsledky a diskuze

Pro vyhodnocení výpočtu byly zavedeny 4 tzv. „charakteristické body“, jedná se o body na stěně tunelu v pozici 12 hodin (bod 1), 3 hodiny (bod 2), 6 hodin (bod 3) a 9 hodin (bod 4) tak, jak by vznikly při zobrazení řezu tunelem. U těchto bodů byly sledovány deformace na příslušných osách. Na ose X pro body 2 a 4. Na ose Y pro body 1 a 3.

Tabulka 30 - Deformace charakteristických bodů na stěně tunelu. Všechny hodnoty jsou kladné hodnoty, jež odpovídají konvergencím do prostoru tunelu. Barevné kódování odpovídá Tab. 28

Varianta	Deformace charakt. bodů			
	Bod 1 [mm]	Bod 2 [mm]	Bod 3 [mm]	Bod 4 [mm]
1	0,756	0,588	0,763	0,588
2	0,723	0,697	0,730	0,697
3	1,044	1,349	1,053	1,349
4	1,230	1,288	1,241	1,287
5	0,652	0,930	0,659	0,930
6	0,419	1,707	0,423	1,707
7	1,177	1,670	1,188	1,670
8	-	-	-	-
8 mod	1,036	2,353	1,018	2,353
9	0,756	0,588	0,763	0,588
10	0,723	0,697	0,730	0,697
11	1,044	1,349	1,053	1,348
12	1,232	1,289	1,242	1,288
13	0,653	0,930	0,659	0,930
14	0,418	1,707	0,418	1,707
15	1,179	1,670	1,190	1,670
16	-	-	-	-
16 mod	1,033	2,367	1,040	2,367

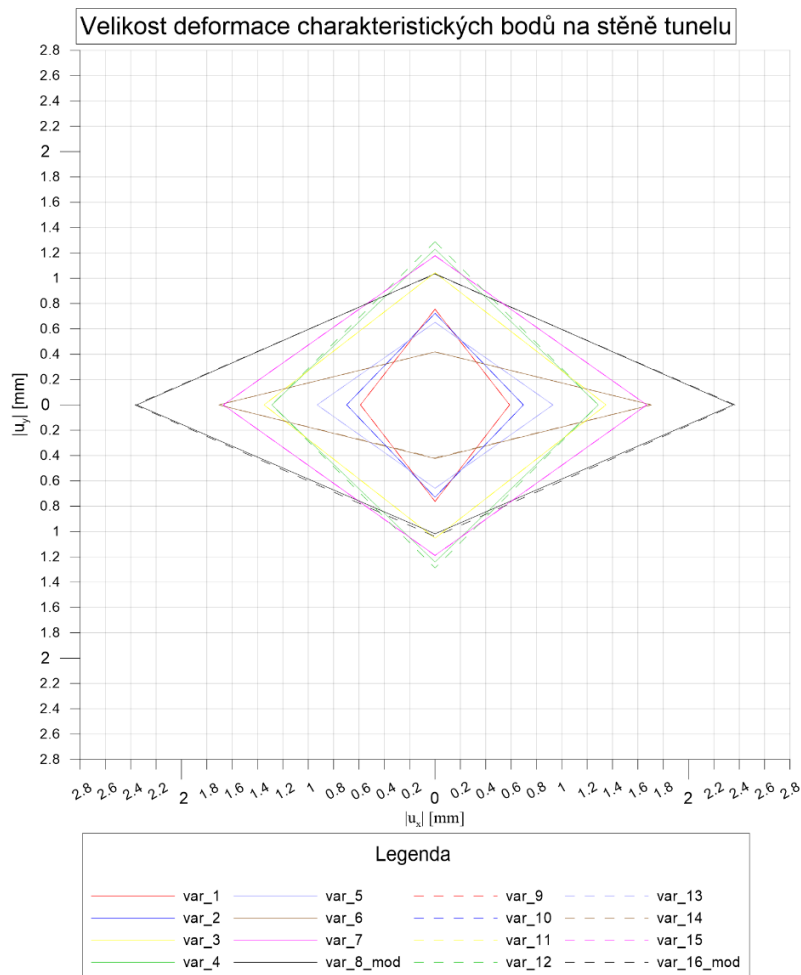
Výsledné deformace charakteristických bodů můžeme vidět v Tab. 30. V případě variant 1-2 a 9-10 vidíme, že největší deformace vznikají na bodech 1 a 3. Tyto varianty odpovídají situaci, kdy je S_H orientováno paralelně s tunelem a na stěnu tedy působí menší hlavní napětí a platí, že $S_h < S_v$. V dalších variantách vždy převažují deformace na bodech 2 a 4. Největší deformace vznikly ve výpočtové variantě 16_mod, kde dosahují hodnot až 2,367 mm na bodech 2 a 4. Po porovnání odpovídajících si variant (stejně hodnoty tenzoru napětí, jiné m_i) vidíme, že rozdíly v hodnotě parametru m_i nemají, kromě varianty 8_mod a 16_mod, žádný dopad na velikost deformací. Rozdíly pro ostatní varianty jsou na úrovni chyby výpočtu. Znatelné rozdíly ve výše zmíněných variantách jsou způsobeny blízkostí k maximální přípustné hodnotě bočního napětí (působící složka tenzoru napětí) – blízkost k HB obálce pevnosti. Rozdílný odhad hodnoty m_i se tedy projevuje až při podmínkách, které se blíží limitní stabilitě tunelu. Pro vyšší m_i vycházejí nižší hodnoty deformací a vyšší přípustná hodnota bočního napětí (působící složka tenzoru napětí v daném směru), což v našem případě činí cca o 2 MPa více a rozdíl v deformacích v řádech 0,01-0,02 mm. To je způsobeno vlivem m_i na tvar HB obálky (tedy na maximální pevnost) při daném „plášťovém tlaku“.

Nejdůležitějšími veličinami jsou tedy: velikost tenzoru napětí a jeho orientace, správné určení GSI a parametr disturbance D. Důležitost GSI a D spočívá v redukci m_i na m_b a redukci laboratorně získaného E (youngův modul pružnosti) na modul masivu E_{rm} . Výsledné porovnání odpovídajících si variant můžeme vidět v Tab. 31 a na Obr. 54.

Tabulka 31 - Porovnání deformací na charakteristických bodech pro odpovídající si výpočetní varianty. Zachováno barevné kódování z Tab. 28. Všechny hodnoty zobrazeny jako absolutní hodnoty konvergencí char. bodů do prostoru tunelu

Bod	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]
	1	9		2	10		3	11		4	12	
1	0,756	0,756	0,000	0,723	0,723	0,000	1,044	1,044	0,000	1,230	1,232	0,002
2	0,588	0,588	0,000	0,697	0,697	0,000	1,349	1,349	0,000	1,288	1,289	0,001
3	0,763	0,763	0,000	0,730	0,730	0,000	1,053	1,053	0,000	1,241	1,242	0,001
4	0,588	0,588	0,000	0,697	0,697	0,000	1,349	1,348	0,001	1,287	1,288	0,001

Bod	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]	Deformace [mm]		Rozdíl [mm]
	5	13		6	14		7	15		8_mod	16_mod	
1	0,652	0,653	0,001	0,419	0,418	0,001	1,177	1,179	0,002	1,036	1,033	0,003
2	0,930	0,930	0,000	1,707	1,707	0,000	1,670	1,670	0,000	2,353	2,367	0,014
3	0,659	0,659	0,000	0,423	0,418	0,005	1,188	1,190	0,002	1,018	1,040	0,022
4	0,930	0,930	0,000	1,707	1,707	0,000	1,670	1,670	0,000	2,353	2,367	0,014

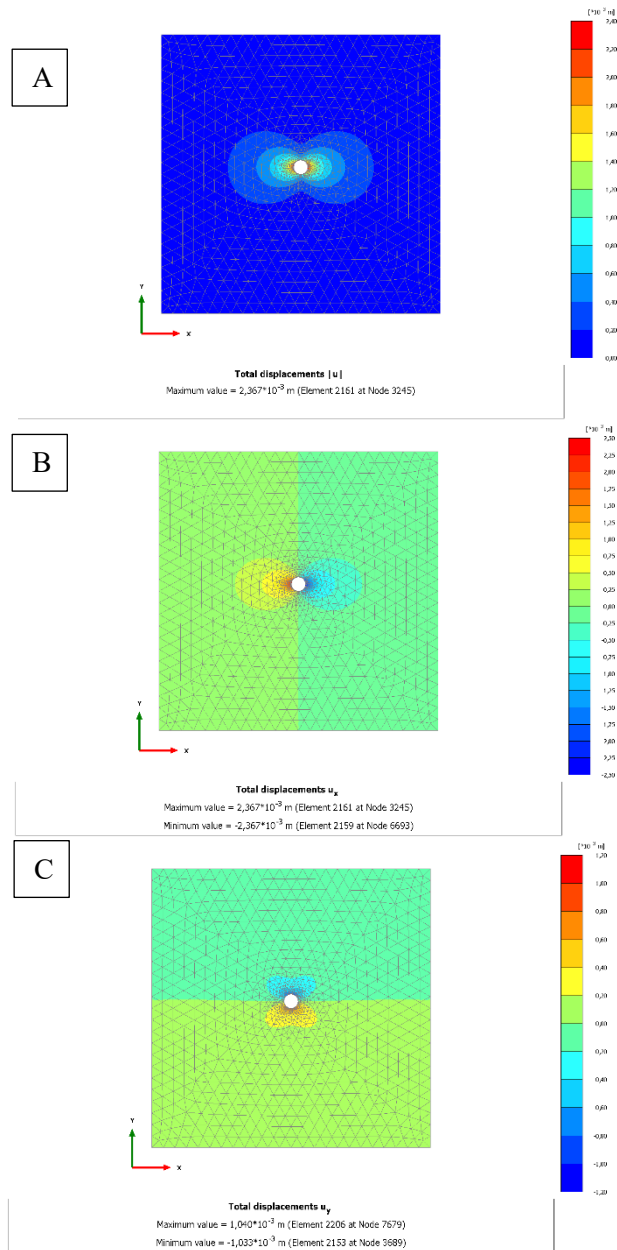


Obrázek 54 - Grafické zobrazení deformací při různých výpočetních variantách. Hodnoty odpovídají konvergencím char. bodů na příslušných osách. Označení jednotlivých výp. variant odpovídá tomu z Tab. 28

Je nutné znovu zopakovat, že zde prezentovaný numerický model a jeho výsledky, jsou velice jednoduchou simulací. Příklad výstupu z programu Plaxis můžeme pro ilustraci vidět na Obr. 55.

Vzhledem k tomu, že veškeré numerické hodnoty výstupů jednotlivých výpočetních variant jsou uvedeny v Tab. 30, zbylé grafické výstupy z programu Plaxis zde nebudou uváděny.

V tomto modelu byl zanedbán efekt podzemní vody, dilatace hornin, součinitele beta - redukce napětí způsobená blízkostí čelby před instalací ostění (ostění nebylo uvažováno jako takové) a celková rozpukanost horninového masivu. Důvody pro takto jednoduchý model byly uvedeny v odpovídajících kapitolách. Jednalo se tak prakticky vždy o nedostatek vhodných dat. Dokonale definována byla pouze HB obálka pevnosti, pro kterou bylo provedeno dostatečné množství triaxiálních zkoušek a byla hlavní náplní této práce. Pro naše účely se však jedná o dostačující model.



Obrázek 55- Ilustrační výstup z programu Plaxis, výpočetní varianta "I6_mod ". Obrázky ukazují hodnoty totálních deformací (A), deformací podle osy X (B) a deformací podle osy Y (C) v mm.

8. Závěr

Tato práce úspěšně splnila hlavní cíle, které pro ni byly stanoveny. Za pomoci už dostupných výsledků publikovaných v práci Petružálka (2017), doplněných o další triaxiální zkoušky za vyšších plášťových tlaků, se podařilo plně definovat Hoek – Brownovu obálku pevnosti. Byla vyvinuta metodika pro provádění triaxiálních zkoušek za vysokých plášťových – řízením zkoušky z pomoci tlaku hydraulické kapaliny na místo snímače síly. Dále byly prozkoumány alternativní metody stanovení parametru m_i , z nichž se jako nejlepší jeví metoda „R indexu“. Tato metoda, pro náš vzorek granodioritu, odhadovala hodnotu parametru m_i velice blízkou hodnotě stanovené pomocí kompletní sady triaxiálních zkoušek (21,01 – R index; 21,93 – regresně z triax. zkoušek). Využitím R indexu pro prvotní odhad m_i (pro vhodné horniny, viz kapitola „ M_i “), na místo sady triax. zkoušek, může být ušetřeno velké množství finančních prostředků a času. Triaxiální zkoušky za vysokých plášťových tlaků jsou náročné na vybavení laboratoře, nejedná se tedy o běžně prováděny zkoušky. Je však vhodné provést alespoň jednu triax. zkoušku za tlaku (plášť.), který odpovídá přitížení nadloží v požadované hloubce, kvůli možnosti korelovat výsledky odhadu. V případě programů zahraničních úložišť nebyly triax. zkoušky příliš časté. Větší pozornost byla věnována pevnostem v prostém tlaku, příčném tahu a parametrům horninového masivu.

Pevnostní parametry masivu (HB obálka pevnosti pro masiv) určené v této práci jsou realistickými odhady (viz Tab.22). Pro jejich přesné stanovení, by však bylo nutné mít k dispozici data ohledně GSI a stavu diskontinuit v dané hloubce. Archivní vrty zde nejsou příliš vhodné zvláště kvůli subjektivitě popisu jader. Obecně lze předpokládat, že GSI a porušenost masivu se do hloubky, pro granitoidní horniny, snižuje (za předpokladu absence výrazných poruchových zón, či vyhnutí se jim). Stanovený rozsah GSI (62-100) je v tomto případě na straně bezpečnosti. Dá se očekávat, že spodní hranice GSI bude vyšší než 62. V ČR se stále pracuje s více potencionálními lokalitami pro projekt HÚ, lze očekávat, že do budoucna budou data o zájmových horninových masivech doplněna. Velice přínosný je výzkum v podzemní laboratoři Bukov. Nevýhodou je, že na lokalitě podzemní laboratoře Bukov se nacházejí odlišné horninové typy, než jsou na lokalitě BP. Švédský a finský program úložiště měl v tomto ohledu velikou výhodu. Tato výhoda pramenila z možnosti mapovat stav masivu přímo v podzemních stavbách (Finsko). Rozsáhlé vrtné práce na lokalitě Forsmark (Švédsko) a existence dalšího úložiště v blízkém okolí, zase poskytla velké množství informací švédskému projektu.

Nedostatek dat týkajících se tenzoru napětí na potencionálních lokalitách je velice závažný problém. Jak bylo ukázáno v kapitole 6 a 7, pro správné stanovení tenzoru napětí je nezbytné provést měření v zájmové hloubce a vzhledem k heterogenitě horninových těles ideálně přímo na zkoumané lokalitě. Data z podzemní laboratoře Bukov jsou reálná, vzhledem k švédskému a finskému programu HÚ a v této fázi programu výstavby úložiště dostačující. Na základě dat z Bukova byl stanoven tenzor napětí: $S_v = 13,29$ MPa; $S_h = 11,6 - 13$ MPa a $S_H = 16 - 26$ MPa s azimutem $S_H = 300 - 340^\circ$. Orientace a velikost tenzoru napětí byla velice diskutovaným tématem v případě programu zahraničních úložišť (viz práce *Martin 2007* či *OMTF 2013*). Autorem odhadnutý azimut hlavního horizontálního napětí S_H je v dobré korelaci se zahraničními výsledky (Finsko, Švédsko).

Výsledky jednoduchého numerického modelu úložiště ukázali, že přesné stanovení HB obálky pro intaktní horninu (její plné definování) nemusí být nutně prioritou při plánování projektu úložiště. Jako důležitější se ukázal tenzor napětí, jeho orientace a parametry popisující horninový masiv (zde hlavně GSI, neboť D bylo arbitrárně staveno jako 0). Až při nejnevhodnější výpočtové variantě byly změny v deformacích tunelu pozorovatelné.

I tak se rozdíly mezi plně definovanou HB obálkou a odhadnutou obálkou lišili pouze v řádech setin milimetru – deformace stěn v char. bodech (maximální rozdíl činil 0,022 mm). Lze předpokládat, že reálně budou mít vyšší váhu i jiné proměnné např. podzemní voda, použitá technologie ražby, použité ostění a jeho instalace atd.

9. Použitá literatura

Publikace a zprávy

ANDRA (2005a): Les recherches de l'ANDRA sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue: résultats et perspectives : dossier 2005.- ANDRA, Châtenay-Malabry. France. ISBN 2951010877.

ANDRA (2005b): Dossier 2005, Granite. Safety analysis of a geological repository.- ANDRA, Châtenay-Malabry, France.

Bárta, J., Bašta, J., Lipold, O., Malá, J., Ottová, M., Suková, H., Unzeitig, M., Vach, J., Vondra, J. (1986): ZAVERECNA ZPRAVA UKOLU SLATINA - SUROVINA: DEKORACNI KAMEN - ETAPA PRUŽKUMU: PODROBNA - STAV KE DNI: 31.12.1985.- Geindustria, Praha.

Barton, N. R., Lien, R., Lunde, J. (1974): Engineering classification of roc masses for design of tunnel support.- Rock. Mech., 6-4, pp. 189-239.

Bašta, J., Morvicová, L., Suková, H., Špaček, K. (1976): Závěrečná zpráva úkolu Defurovy Lažany II. Surovina: kámen štěpný a dekorační (blatenská žula). Etapa průzkumu: předběžná. Stav ke dni: 22.1.1975.- Geindustria, závod Stříbro.

Bieniawski, Z.T. (1976): Rock Mass Classification in Rock Engineering.- In: Bieniawski, Z.T.,(ed), Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, pp. 97-106.

Bieniawski, Z.T. (1989): Engineering rock mass classification.- Wiley, New York.

Cai, M. (2010): Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter mi of Brittle Rocks.- Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, pp. 167-184.

Campbell, M. E. (1997): Granite landforms.- Journal of the Royal Society of Western Australia. 80.

Ceballos, F., Olalla, C., Jimenez R. (2014): Relationship between RMRb and GSI based on in situ data.

Claudiel, A., Gautschi, A., Vomvoris, S. (2016): Swiss Geological Studies to Support Implementation of Repository Projects: Status 2015 and Outlook.- In: Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., Swift, P., (eds.)(2016): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review.

Čermáková, H., Čtyroký, V., Hora, Z. (1960): Průzkum kamene (žuly) Defurovy Lažany.- Geologický průzkum Praha, závod České Budějovice.

Deere, D. U., Deere, D. W. (1988): The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practise.- In: Kirkaldie, L. (ed)(1988): Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984.- American Society for Testing and Materials, pp. 91-101, Philadelphia.

Farin, S., Labalette, T., Ouzounian, G., Plas, F. (2016): Progress Towards Geological Disposal of High-Level and Intermediate-Level Long-Lived Radioactive Waste at an Industrial Scale - The Cigéo Project in France.- In: Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., Swift, P., (eds.)(2016): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review.

Giger, S., Marschall, P. (2014): Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland: Arbeitsbericht NAB 14-01.- NAGRA, Wettingen.

Glamheden, R., Lanaro, F., Karlsson, J., Lindberg U., Bygg, B., Wrafter, J., Hakami, H., Johansson, M. (2008): Rock mechanics Forsmark. Modelling Stage 2.3 - Complementary analysis and verification of the rock mechanics model: R-08-66.- Svensk Kärnbränslehantering AB.

Goldich, S.S. (1938): A Study in Rock Weathering.- Journal of Geology, 46, pp. 17–58.

Grünthal, G., Stromeyer, D. (1992): The Recent Crustal Stress Field in Central Europe - Trajectories and Finite-element Modeling. - Journal of Geophysical Research, 97- 11, pp. 805-820.

Hakala, M., Valli J., Wanne, T., Siren, T., Suikkanen J. (2015): ONKALO POSE EXPERIMENT - POSE Back Analyses Plan - Working Report 2015-22.- POSIVA OY, EURAJOKI, Finland.

Harrison, J. P., Hudson, J.A. (2000): Engineering rock mechanics.- Pergamon, Oxford. ISBN 0080430104.

Heidbach, O., Custodio, S., Kingdon, A., Mariucci, M.T., Montone, P., Müller, B., Pierdominici, S., Rajabi, M., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Williams, J., Ziegler, M. (2016): Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016.- GFZ Data Service.

Hoek, E. (2001): Rock mass properties for underground mines.- in: Hustrulid, W. A., Bullocks, R.L(eds): Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies.

Hoek, E., Brown, E.T. (1980): Empirical strength criterion for rock masses.- J. Geotech. Engng Div., pp. 1013-1035.

Hoek, E., Brown, E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34-8, pp. 1165-1186. ISSN 1365-1609.

- Hoek, E., Carranza-Torres, T., Corkum, B. (2002):** Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition.
- Hoek, E., Carter, T., Diederichs, M. (2013):** Quantification of the Geological Strength Index Chart.- 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013, 3 pp. 1757-1764.
- Hoek, E., Diederichs M.S. (2006):** Empirical estimation of rock mass modulus.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43-2, pp. 203-215. ISSN 1365-1609.
- Hoek, E., Marinos, P. (2007):** A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion.- Soils and Rocks.
- Holub, F. V. (1991):** Příspěvek k petrochemii středočeského plutonu.- In: Souček, J. (ed.): Horniny ve vědách o Zemi.- pp. 117–140. Univerzita Karlova, Praha.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2009):** Classification of radioactive waste: general safety guide.- IAEA, Vienna. ISBN 9789201092090.
- Janoušek, V., Wiegand, B., Žák, J. (2010):** Dating the onset of Variscan crustal exhumation in the core of the Bohemian Massif: new U-Pb single zircon ages from the high-K calc-alkaline granodiorites of the Blatná suite, Central Bohemian Plutonic Complex.- Journal of the Geological Society London, 167, pp. 347–360.
- Křištiak, J., Sobota, T. (1986):** ZPRAVA O STRUKTURNE GEOLOGICKEM MAPOVANI A VYHLEDAVACIM PRUŽKUMU NA U - USEK KADOV - STAV KE DNI 31.12.1985.- Uranový průzkum, Liberec.
- Kubínová, Š. (2010):** Variský magmatismus na styku Bohemika a Moldanubika v oblasti sv. výběžků středočeského plutonického komplexu.- Diplomová práce, Univerzita Karlova, Praha.
- Lahti, M. (2016):** Towards Implementation of the Spent Nuclear Fuel Repository in Finland.- In: Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., Swift, P., (eds.)(2016): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review.
- Le Maitre, R. W. (e.)(2002):** Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, 2nd ed. xvi + 236 pp.- Cambridge, New York, Melbourne.
- Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., Christiansson, R. (2003):** An Overview of Rock Stress Measurement Methods.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 40, pp. 975-989.

Lundqvist, B., Hammarström, M. (2016): Licensing of the KBS-3 Concept for Spent Nuclear Fuel in Sweden.- In: Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., Swift, P., (eds.)(2016): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review.

Martin, C.D. (2007): Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark - Forsmark stage 2.2.: R-07-26.- Svensk Kärnbränslehantering AB.

Martin, C.D., Chandler N.A. (1993): Stress heterogeneity and geological structures.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30-7, pp. 993-999. ISSN 0148-9062.

Martin, C.D., Kaiser, P.K., Christiansson R.(2003): Stress, instability and design of underground excavations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40-(7-8),pp. 1027-1047, ISSN 1365-1609

Martin, D., Kaiser, P., McCreath, D. (1999): Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels.- CAN. GEOTECH. J. 36. pp. 136-151.

Mostyn, G., Douglas, K. (2000): Strength of intact rock and rock masses.- GeoEng 2000-1.

Novotný, J. (2009): Obtíže inženýrskogeologického průzkumu v žulových masívech.- sborník Národního inženýrskogeologického kongresu s mezinárodní účastí, Ostrava 31.8. – 3.9.2009, pp. 25-28.

OMTF (OLKILUOTO MODELLING TASK FORCE) (2011): Olkiluoto site description. ISBN 9789516521797.

Petružálek, M. (2017): Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů na potencionálních lokalitách HÚ.- Závěrečná zpráva, GÚ AV ČR, Praha.

Plaxis (2016): Validation – Hoek – Brown material model – 2016.- PLAXIS.

Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1976): Discontinuity spacings in rock.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 13, pp. 135–148.

Read, S. A. L., Richards, L. R. (2015): Guidelines for use of tensile data in the calculation of the Hoek Brown constant m_i .- In: In Proceedings of ISRM Congress, Montreal, pp. 10-13, Quebec, Canada.

Read, S. A. L., Richards, L. (2011): A Comparative Study of m_i , the Hoek-Brown Constant for Intact Rock Material.- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Read, S. A. L., Richards, L. R. (2014): Correlation of direct and indirect tensile tests for use in the Hoek-Brown constant m_i .- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Sari, M. (2010): A simple approximation to estimate the Hoek-Brown parameter ' m_i ' for intact rocks.

Shen, J., Karakus, M. (2014): Simplified Method for Estimating the Hoek-Brown Constant for Intact Rocks.- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140-6.

Singh, M., Raj, A., Singh, B. (2011): Modified Mohr–Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48-4, pp. 546-555. ISSN 1365-1609.

SKB (2013): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase SDM-Site Forsmark: TR-08-05.- Svensk Kärnbränslehantering AB. ISSN 1404-0344.

Slovák, J. (2016): Progress of the Czech Deep Geological Repository Program.- In: Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D., Swift, P., (eds.)(2016): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review.

Souček, K., Vavro, M., Staš, L., Vavro, L., Waclawik, P., Konicek, P., Ptáček, J., Vondrovic, L. (2017): Geotechnical Characterization of Bukov Underground Research Facility.- Procedia Engineering, 191, pp.711-718. ISSN 1877-7058.

SÚRAO (2016): PVP Bukov.- SÚRAO, Praha.

SÚRAO (2017): Zprávy ze Správy.- 2017(4). ISSN 2533-5073.

Tingay, M., Reinecker, J., Müller, B. (2008): Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs.

Valli, J., Hakala, M. (2016): ONKALO POSE Experiment - Analysis of Rock Mechanics Test Data.- Working Report 2016-49, POSIVA OY, EURAJOKI, Finland.

Vasarhelyi, B., Kovács, L., Török, Á. (2016): Analysing the modified Hoek–Brown failure criteria using Hungarian granitic rocks.- Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2, pp. 131-136.

Wang, W., Shen, J. (2017): Comparison of existing methods and a new tensile strength based model in estimating the Hoek-Brown constant m_i for intact rocks.- Engineering Geology, 224, pp 87-96. ISSN 0013-795.

Zang, A., Stephansson O. (2010): Stress field of the Earth's crust. - Springer, Dordrecht. ISBN 9781402084430.

Zhao, J., Broms, B.B., Zhou, J., Choa, V. (1994): A study of weathering of the Bukit Timan granite, Part A: Review, field observations and geophysical survey.- Bull of IAEG, 49, pp. 97 -106.

Zuo, J., Li, H., Xie, H., Ju, Y., Peng, S. (2008): A nonlinear strength criterion for rock-like materials based on fracture mechanics.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45-4, pp. 594-599. ISSN 1365-1609.

Zuo, J., Liu, J., Li, H. (2015): A theoretical derivation of the Hoek–Brown failure criterion for rock materials.- Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7-4, pp. 361-366. ISSN 1674-7755.

Normy

ČSN EN 12390-6. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles.

ČSN EN 1926. Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v tlaku.

ČSN CEN ISO/TS 17892-11. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu.

ČSN CEN ISO/TS 17892-3. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru.

ČSN EN 1936. Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti.

ČSN EN 721165. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku přírodního stavebního kamene.

Webové zdroje

www1. - Skladování a uložení vyhořelého paliva, středně a nízkoaktivního odpadu. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/7.html>

www2. - ONKALO. POSIVA [online]. Eurajoki [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: http://www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo#.W2yAROGzaUm

www3. - HADES underground laboratory. SCK•CEN Science Platform [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: <http://science.sckcen.be/en/Facilities/HADES>

www4. - R&D for the geological disposal of medium and high level waste in the Boom Clay. SCK•CEN Science Platform [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: http://science.sckcen.be/en/Projects/Project/RD_waste_disposal/Geological_disposal

www5.- ASSE II [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: http://www.asse.bund.de/Asse/DE/home/home_node.html

www6.- ENDLAGER MORSLEBEN [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: http://www.endlager-morsleben.de/Morsleben/EN/topics/repository/repository_node.html;jsessionid=8C733D876143DD1D2A52FBA8E8D91E12.1_cid339

www7.- KONRAD [online]. [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: http://www.endlager-konrad.de/Konrad/EN/themen/endlager/endlager_node.html

www8.- Operation of the Gorleben mine will be reduced to a minimum. Bundesamt für Strahlenschutz [online]. 2014, 2014 [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: <http://www.bfs.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/EN/2014/007.html>

www9.- SÚRAO stahuje své žádosti o prodloužení průzkumných území. SÚRAO [online]. 2017 [cit. 2018-08-09].

Dostupné z: <https://www.surao.cz/clanek-450-surao-stahuje-sve-zadosti-o-prodlouzeni-pruzkumnych-uzemi>

www10.- SÚRAO [online]. [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/>

www11.- Chánovice. Regionální informační servis [online]. [cit. 2018-08-10].

Dostupné z: <http://www.risy.cz/cs/vyhledavace/obce/detail?Zuj=556335>

www12.- Chánovice [online]. [cit. 2018-08-10].

Dostupné z: www.chanovice.cz

Mapové aplikace

earth.google.com/web/ - satelitní snímky

geoportal.cuzk.cz – Základní mapa České republiky 1:10000

mapy.geology.cz/geocr50/ - Geologická mapa 1:50000

mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/ - Mapa vrtné prozkoumanosti