

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

## STUDIUM FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KRYSTALINICKÝCH HORNIN VE VZTAHU K PLÁNOVANÉMU HLUBINNÉMU ÚLOŽIŠTI RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CRYSTALLINE ROCKS ASSOCIATED WITH PLANNED  
DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY FOR A RADIOACTIVE WASTE

ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE

PhD THESIS

OBOR

BRANCH OF STUDY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

OPONENTI

OPONENTS

KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY

Mgr. Dagmar Havlíčková

doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

XXX

XXX

MÍSTO A DATUM

OBHAJOBY

PLACE AND DATE OF DEFENSE

BRNO, XX 2020

## **Klíčová slova**

Mechanika hornin, krystalinické horniny, minerální složení, laboratorní zkoušky, pevnostní charakteristiky, deformační parametry.

## **Keywords**

Rock mechanics, crystalline rocks, mineral composition, laboratory tests, strength properties, deformation parameters.

Rukopis disertační práce je uložen na ústavu geotechniky Stavební fakulty VUT v Brně.

© Dagmar Havlíčková, 2020

ISBN 80-214-~~XXX~~

ISSN 1213-4198

## OBSAH

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE .....	5
2 PROBLEMATIKA HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ .....	5
3 STUDOVANÉ LOKALITY .....	7
3.1 HORKA.....	7
3.2 TŘEBÍČSKÝ MASIV .....	8
3.2.1 LOM KAMENNÁ .....	8
3.3 KRAVÍ HORA .....	9
3.4 STRÁŽECKÉ MOLDANUBIKUM.....	9
3.4.1 LOM HORNÍ BORY A VÝCHOZY GRANULITŮ V OKOLÍ HABŘÍ ..	10
4 METODIKA .....	11
4.1 PETROGRAFICKÝ POPIS HORNIN A OBJEMOVÁ HMOTNOST .....	11
4.1.1 POLARIZAČNÍ A KATODOLUMINISCENČNÍ MIKROSKOPIE .....	11
4.1.2 KATODOLUMINISCENCE .....	11
4.1.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA .....	11
4.1.4 OBJEMOVÁ HMOTNOST .....	11
4.2 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU.....	12
4.2.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST .....	12
4.2.2 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA”).....	12
4.2.3 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST .....	12
4.2.4 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST .....	13
4.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU.....	14
4.3.1 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA”).....	14
4.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST .....	14
5 VÝSLEDKY .....	15
5.1 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ DURBACHITU.....	15
5.2 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ GRANULITU.....	16
5.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU.....	17
5.3.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST .....	17
5.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU .....	17
5.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST .....	18
5.4 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU.....	21
5.4.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST .....	21
5.4.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU .....	21
5.4.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST .....	23
6 DISKUZE .....	25
7 ZÁVĚR.....	28
8 LITERATURA.....	30
CURRICULUM VITAE.....	34
ABSTRAKT .....	35



# 1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Výstavba hlubinného úložiště radioaktivních odpadů představuje společensky velice závažné téma. Český koncept budování úložiště předpokládá jako hostitelské prostředí krystalinické horniny. Při plánování výstavby hlubinného úložiště je jedním z hlavních kritérií výborná znalost geologických a geotechnických podmínek. Na horniny, ve kterých se plánují budovat rozsáhlé prostory a sítě chodeb, jsou kladeny tomu odpovídající vysoké nároky. Znalost detailních mineralogických, petrografických a z nich vycházejících fyzikálně-mechanických vlastností je zcela klíčová. Jednou z nejdůležitějších otázek je, jak se budou pevnostní charakteristiky uvažovaných horninových typů vyvíjet v hloubce cca 500 m, tedy v hloubce plánovaného úložiště, kde na tyto horniny působí nezanedbatelné trojosé napětí. Této otázce bylo zatím v rámci uvažovaných horninových typů věnováno minimální množství studií.

Cílem disertační práce je komplexní studium horninového materiálu a posouzení jeho vhodnosti pro účel výstavby hlubinného úložiště pro radioaktivní odpad. Výsledná data z mechanických zkoušek, doplněná o podrobný petrografický rozbor, mohou sloužit jako orientační a dílčí zhodnocení stability horninového materiálu pro budoucí výstavbu hlubinného úložiště.

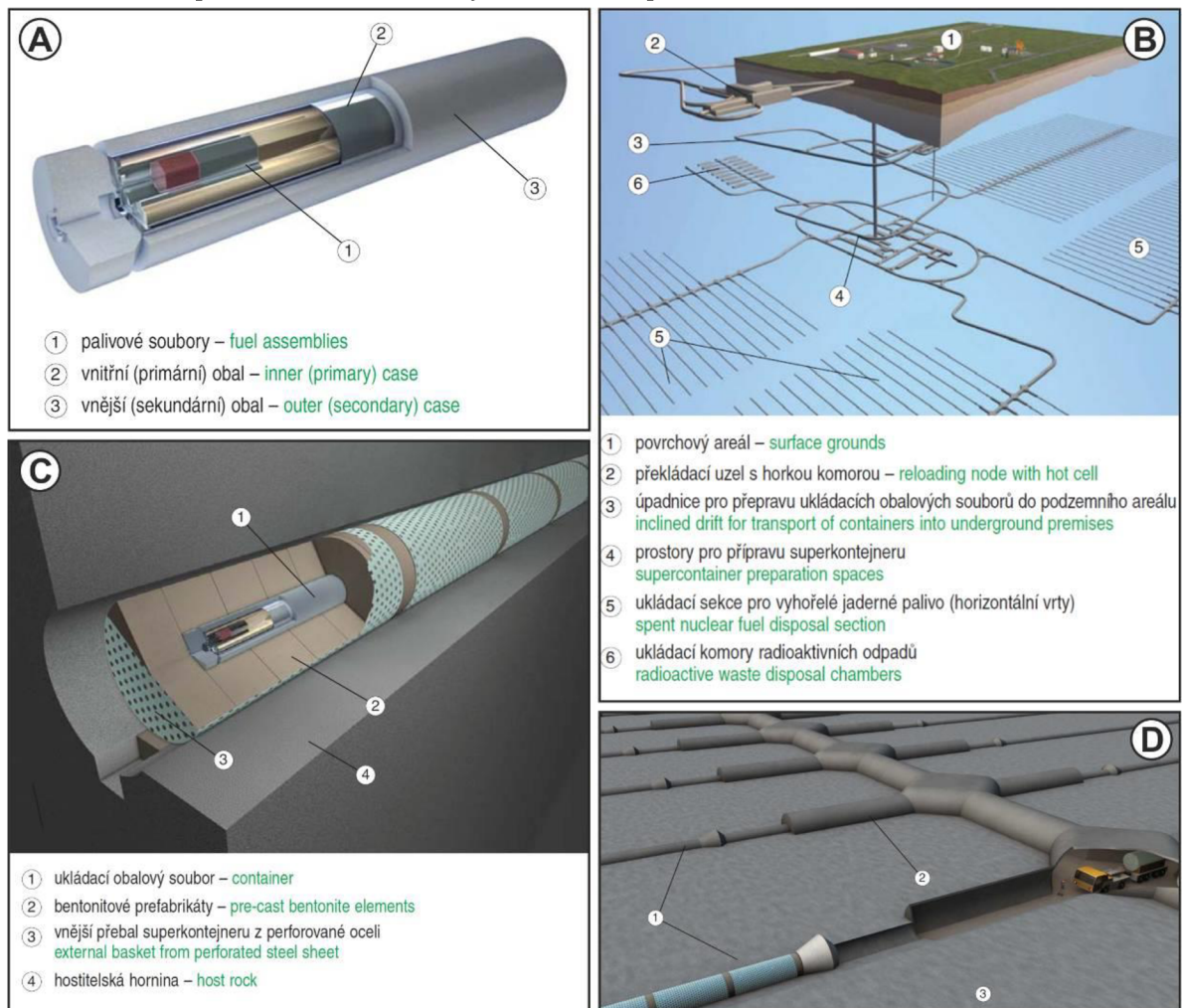
Data pro připravovanou disertační práci byla částečně získána v rámci projektu specifického výzkumu VUT FAST-S-17-4624 (Chování vícesložkových geomateriálů při testech trojosé tlakové pevnosti: pilotní experimentální studie v mechanice hornin), FAST-S-18-5356 (Stanovení vstupních parametrů materiálových modelů pro potřeby podzemního stavitelství s možností využití optimalizačních metod) a FAST-S-19-6031 (Lomově-mechanické vlastnosti geomateriálů ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů), na nichž autorka aktivně participovala. Dílčí výsledky těchto projektů již autorka publikovala jak formou časopisových článků (např. Havlíčková et al. 2019), tak formou abstraktů v rámci konferenčních sborníků (Šujanská et al. 2018, Šujanská a Závacký 2018).

## 2 PROBLEMATIKA HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

V České republice je již několik let Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) vytipováno v Českém masivu sedm perspektivních lokalit pro vybudování hlubinného úložiště vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva a další dvě nedávno přibyla v blízkosti jaderných elektráren (SÚRAO 2018d). V souvislosti s vývojem hlubinných úložišť jsou ve světě provozovány podzemní laboratoře, které mají významnou roli při výzkumných a vývojových aktivitách. Takové podzemní výzkumné pracoviště bylo zřízeno i v ČR na lokalitě Bukov. Sedm původně vytipovaných lokalit je tvořeno krystalinickými horninami, ve kterých se předpokládá dlouhodobě stabilní prostředí, které je nezbytné pro vybudování hlubinného úložiště. Pokud se v budoucnu podaří schválit jednu z těchto lokalit, následovali bychom Finsko, které již výstavbu finálního hlubinného úložiště v krystalinických horninách zahájilo, nebo Švédsko, které již obdrželo příslušné certifikace a na přípravách budoucího úložiště intenzivně pracuje (např. Zang a Stephansson 2010, Walton et al. 2015, Stephansson et al. 2019). Na základě zkušeností z ostatních zemí byl pro české úložiště navržen

multibariérový koncept (Obr. 1), jehož základní bariérou je ukládací obalový soubor, další bariérou jsou nepropustné těsnící materiály (např. bentonit) a třetí bariéru tvoří stabilní horninové prostředí cca 500 m pod povrchem (SÚRAO 2016c; SÚRAO 2018b,c). Budované úložiště na lokalitě Oikiluoto na západním pobřeží Finska má podloží tvořené převážně migmatickou rulou, která je silně foliovaná. Předpokládalo se, že foliace bude mít výrazný vliv na anizotropii pevnostních charakteristik, což bylo potvrzeno v práci Hakala et al. (2005).

Ve Švédsku se jedná o lokalitu Forsmark, kde je žulové podloží. Z nejnovějších odborných studií provedených na této lokalitě stojí za povšimnutí závěrečná zpráva Německého národního centra pro geovědy v Postupimi vypracovaná pro "Swedish Radiation Safety Authority" (SSM 2019), která obsahuje 3D modely se simulacemi tepelně-mechanického působení na horninový masiv v bezprostředním okolí úložiště.



**Obr. 1:** Multibariérový koncept hlubinného úložiště (Pospíšková 2014 – upraveno). **A** – Ukládací obalový soubor pro vyhořelé jaderné palivo; **B** – Technické řešení hlubinného úložiště; **C** – Superkontejner v úložném vrtu; **D** – Detail uspořádání úložných vrtů.

Z uvažovaných tuzemských lokalit pro výstavbu hlubinného úložiště již byly Správou úložišť radioaktivních odpadů v minulosti předběžně vybrány dvě nejperspektivnější – Horka a Kraví Hora (Obr. 2). Je ovšem třeba zdůraznit, že o finální lokalitě zatím rozhodnuto nebylo. Je plánováno, že úložiště bude vybudováno v hloubce cca 500 m pod povrchem,

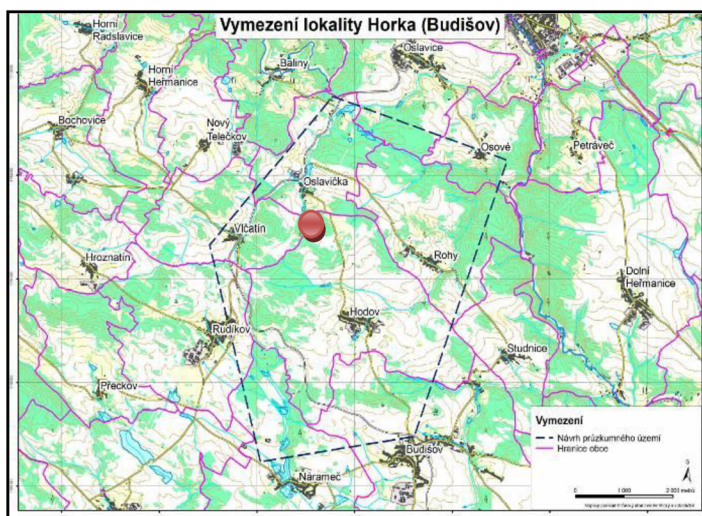
avšak v místě uvažovaných lokalit v průběhu vzniku této práce zatím nebyly provedeny tomu odpovídající hluboké vrtné práce. Z tohoto důvodu se autorka disertační práce snažila u studovaného horninového materiálu co nejvíce přiblížit charakteru hornin v podloží a odebírat čerstvé horniny z aktivních lomů ve stejných horninových masivech v blízkosti uvažovaných lokalit. Je tedy důležité zdůraznit, že vzorky nepocházejí přímo z podloží míst, kde se nachází kóty, podle kterých SÚRAO pojmenovalo průzkumná území pro účel stavby úložiště, nicméně jedná se o petrograficky totožné horninové typy z nedalekých lokalit (viz kapitola 3).



**Obr. 2:** Hlavní uvažované lokality pro výstavbu hlubinného úložiště mimo lokalit v bezprostředním okolí jaderných elektráren. Zdroj: Český rozhlas (2016).

### 3 STUDOVANÉ LOKALITY

#### 3.1 HORKA



**Obr. 3:** Topografická situace lokality Horka (Holub et al. 2012).

Lokalita byla pojmenována podle Hodovské Horky (581 m n. m. – červený bod na mapě na Obr. 3), která je druhým nejvyšším bodem průzkumného území pro budoucí úložiště. Toto území SÚRAO vyznačilo jako nepravidelný pětiúhelník zasahující do devíti obcí s plochou cca 28 km<sup>2</sup> a obec Hodov tvoří jeho pomyslný střed (Obr. 3). Území spadá do okresu Třebíč v kraji Vysočina. Geologicky území náleží třebíčskému masivu.

### 3.2 TŘEBÍČSKÝ MASIV

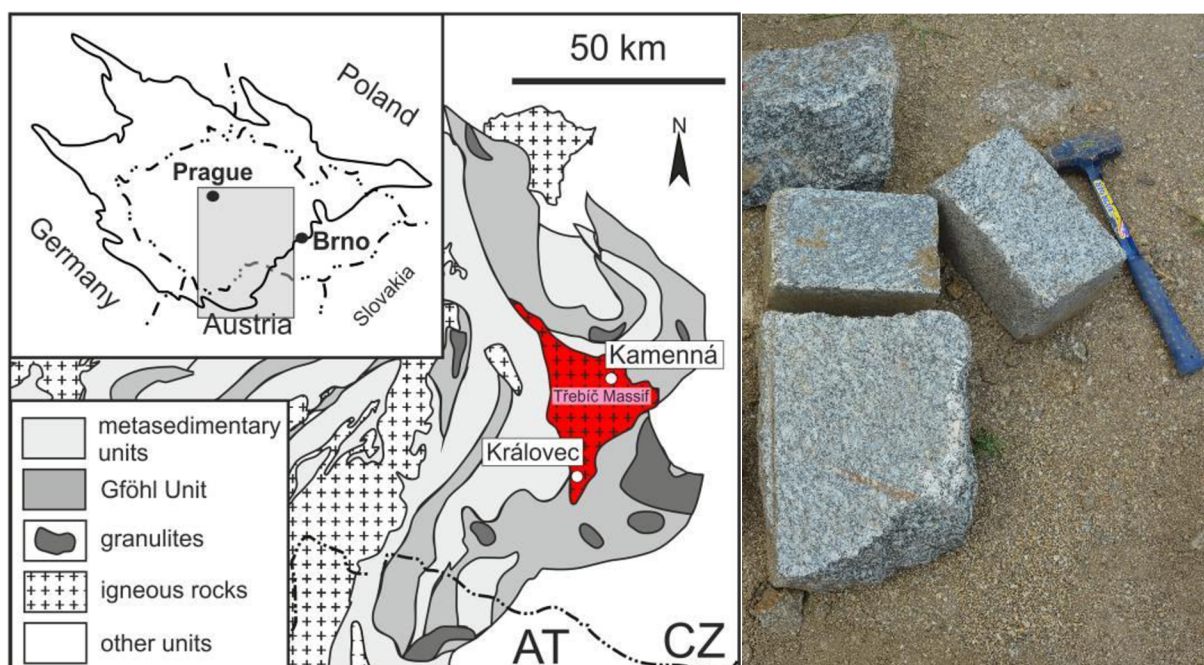
Třebíčský masiv je z geologického hlediska součástí moldanubické jednotky Českého masivu (Obr. 4A). Jedná se o největší těleso durbachitů (500 km<sup>2</sup>) v rámci variské Evropy.

Durbachit je hrubozrnná plutonická hornina složená převážně z alkalických živců doprovázených menším množstvím sodného plagioklasu, biotitu, pyroxenu, amfibolu, případně olivínu (Le Maitre 2002). Od granitů se liší vyšším podílem tmavých minerálů a nepřítomností (do 5 % z celkového obsahu) křemene. Tmavé minerály (biotit, amfibol, pyroxen, olivín) tvoří 10–35 % objemu horniny. Přesahuje-li zastoupení tmavých minerálů 35 %, hornina bývá označována jako melasyenit.

Horniny třebíčského masivu petrograficky spadají do hornin durbachitové série, které odpovídají amfibol-biotitickému melagranitu až melasyenitu s porfyrickými vyrostlicemi draselných živců (Holub 1997). Zvláštní pozornost u těchto hornin budí zvýšené koncentrace prvků K, Mg, ale také vyšší obsahy Th a U, díky nimž vykazují zvýšenou radioaktivitu (SÚRAO 2016a).

#### 3.2.1 LOM KAMENNÁ

Lokalita, kde autorka odebírala čerstvou surovinu vhodnou ke studiu, leží 7,8 km vzdušnou čarou od Hodovské Horky. Jedná se o aktivní třetířázkový lom v obci Kamenná u Budišova, vzdálené asi 10 km jv. od Velkého Meziříčí. Přítomné horniny třebíčského masivu lze označit jako porfyrické amfibol-biotitické melasyenity. V horninách mohou být mafické mikrogranulární enklávy s drobně zrnitou strukturou (Krmíček 2015). Hornina je v lomu minimálně tektonicky porušena a je vylamována v podobě bloků pro ušlechtilou kamenickou výrobu (Obr. 4B).

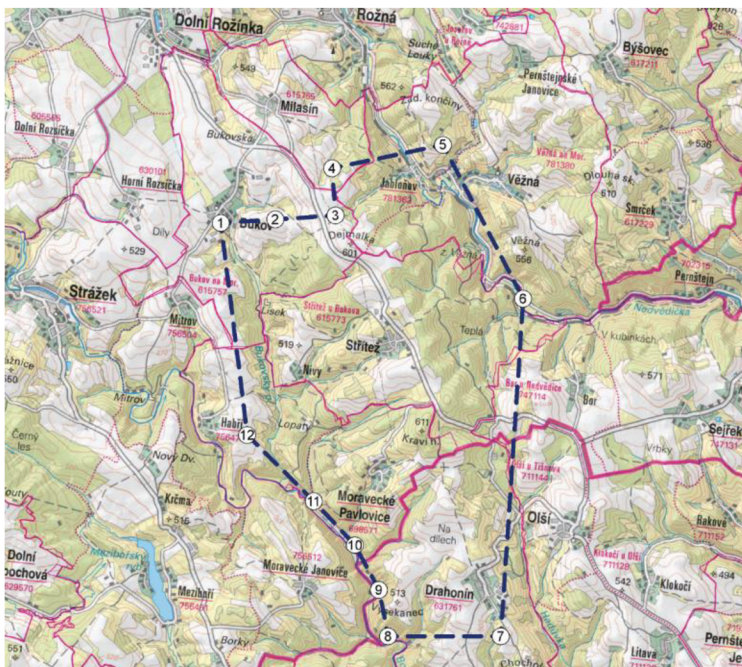


**Obr. 4:** **A** – Poloha třebíčského masivu v jv. části Českého masivu s vyznačením polohy lomu Kamenná a referenční lokality lomu Královec (viz kapitola 5) – Šujanská et al. (2018). **B** – Bloky částečně opracovaných durbachitů (syenitů) těžných v lomu Kamenná.



### 3.3 KRAVÍ HORA

Tato lokalita dostala svůj název podle nejvyšší kóty Kraví hora (611 m n. m.) v rámci průzkumného území ve tvaru dvanáctiúhelníku (Obr. 5) s rozlohou cca 17 km<sup>2</sup>. SÚRAO vymeziilo tento prostor zahrnující 8 obcí, z nichž pomyslný střed je v obci Střítež (Obr. 5).



Obr. 5: Topografická situace na lokalitě Kraví hora (SÚRAO 2018a).

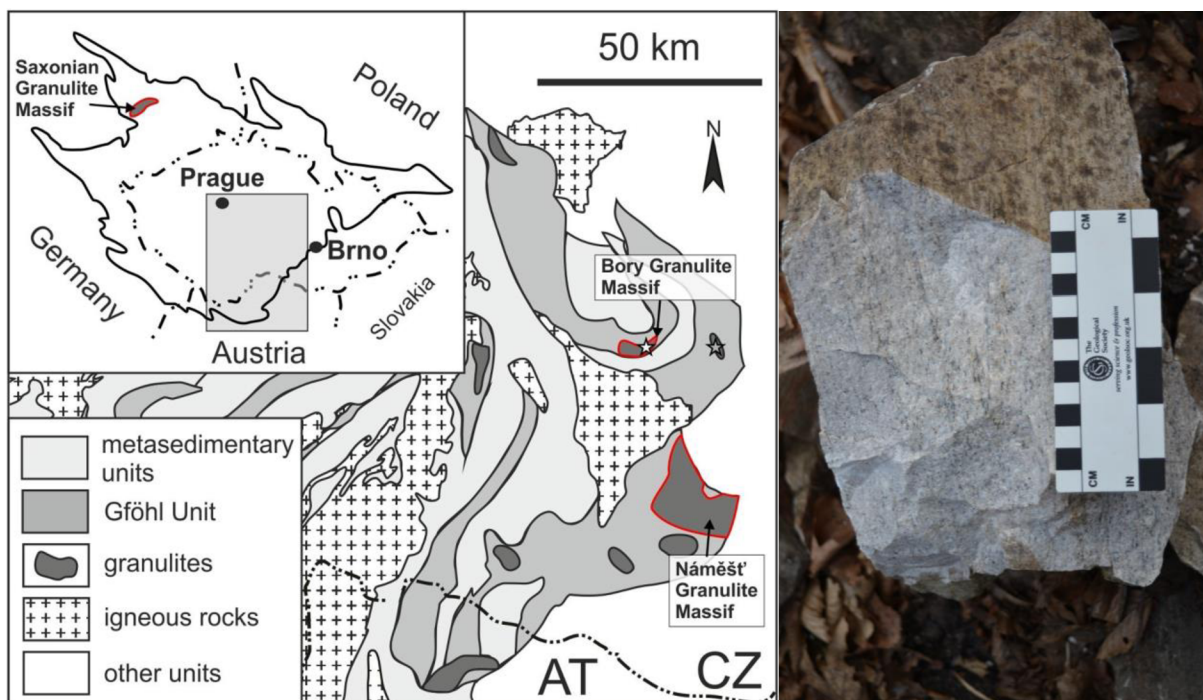
Území je situováno na pomezí Kraje Vysočina a Jihomoravského kraje, tedy na pomezí okresů Žďár nad Sázavou a Brno – venkov. Geologicky tato lokalita spadá do jednotky označované jako strážecké moldanubikum.

### 3.4 STRÁŽECKÉ MOLDANUBIKUM

Strážecké moldanubikum představuje geologickou jednotku vystupující severně od třebičského masivu (Obr. 6). Podloží lokality Kraví hora je tvořeno přeměněnými horninami – granulity a migmatity, představující těleso čochkovitého tvaru mezi ložisky uranu Rožná a Olší. Hloubkový dosah přítomných horninových komplexů je odhadován na několik km, což dostatečně splňuje předpoklad hloubky budování úložiště. Oblast patří díky blízkým uranovým dolům Rožná ke geologicky nejprozkoumanějším územím v celé České republice (SÚRAO 2016b). Navíc v prostoru bývalého uranového dolu Rožná bylo zřízeno podzemní výzkumné pracoviště Bukov, sloužící k ověření a testování inženýrských řešení, plánovaných pro výstavbu hlubinného úložiště. Je ovšem třeba poznamenat, že horninový typ - granulit, ve kterém se předpokládá vybudování hlubinného úložiště na lokalitě Kraví hora, se v rámci výzkumného pracoviště Bukov nenachází a tedy ani netestuje. Výstavba PVP Bukov byla dokončena v roce 2016 a následně zde započaly laboratorní a terénní práce (data k diskuzi poskytuje Souček 2016, Souček et al. 2017). Nejnovější studii podloží PVP Bukov společně s jeho 3D vizualizací přináší práce Bukovské at al. (2019).

Granulit je světlá, krystalinická, vysoce kompaktní hornina s lokálně páskovanými polohami biotitu a rozptýleným granátem. Poprvé jej v oblasti Českého masivu rozpoznal von Justi (1754) pod názvem „Namiester Stein“ na jeho typové lokalitě – Lamberk u Náměště nad Oslavou (náměšťský granulitový masiv; Obr. 6A) a o 48 let později jej Engelbrecht (1802) v saském granulitovém masivu (Saské granulitové pohoří) charakterizoval pod názvem

„Weisstein“ (bílý kámen) jako světle zbarvenou horninu s dominantním obsahem minerálů křemen + plagioklas (Obr. 6B).



**Obr. 6:** **A** – Schematické zobrazení Českého masivu s vyznačenými typovými granulitovými masivy (náměšťský granulitový masiv v České republice a saský granulitový masiv v Německu) společně se zkoumaným borským granulitovým masivem na jihovýchodní hranici Českého masivu. Pozice kamenolomu Horní Bory je označena bílou hvězdičkou, zatímco pozice potenciální lokality (Kráví hora) pro konstrukci podzemního úložiště jaderného odpadu je označena šedou hvězdičkou. Upraveno podle Krmíčka et al. (2011) a Havlíčkové et al. (2019). **B** – Příklad felsických (světlých) granulitů z Českého masivu.

### 3.4.1 LOM HORNÍ BORY A VÝCHOZY GRANULITŮ V OKOLÍ HABŘÍ



Bloky čerstvého granulitu byly odebrány cca 15,8 km vzdušnou čarou od kóty Kraví hora v aktivním lomu v obci Horní Bory (Obr. 7B, C). Granulity, převážně páskované, zde autorka vybírala z čerstvého materiálu po odstřelu. Dále byl srovnávací materiál získán při terénním průzkumu nejbližšího okolí samotné kóty Kraví hora, tedy z cca 2 km vzdálených výchozů granulitů u potoka Bobrůvka v katastru obce Habří (Obr. 7A).

**Obr. 7:** **A** – Terénní odběr vzorků granulitů u potoka Bobrůvka, obec Habří.; **B, C** – Granulity odkryté v lomu v Horních Borech. Foto: L. Krmíček.

## 4 METODIKA

### 4.1 PETROGRAFICKÝ POPIS HORNIN A OBJEMOVÁ HMOTNOST

#### 4.1.1 POLARIZAČNÍ A KATODOLUMINISCENČNÍ MIKROSKOPIE

Pozorování a focení základních petrografických charakteristik studovaných vzorků proběhlo na Ústavu geotechniky VUT v Brně pomocí binokulárního mikroskopu OLYMPUS SZX16. Pro detailní studium minerálních a mikrostrukturních charakteristik obou horninových typů byly z vybraných vzorků zhotoveny leštěné horninové výbrusy. Tyto výbrusy byly zhotoveny v Geologickém ústavu AV ČR v Praze. Orientace výbrusů byly voleny s ohledem na zastoupení a uspořádání minerálů v hornině. Studium výbrusů bylo realizováno Laboratoří optické mikroskopie GLÚ AV ČR s využitím polarizačního mikroskopu OLYMPUS BX51. Zde také proběhla fotodokumentace výbrusů pomocí software QuickPHOTO MICRO 3.0.

#### 4.1.2 KATODOLUMINISCENCE

Katodoluminiscenční studium výbrusů proběhlo na Ústavu geologických věd PŘF MU na přístroji HC2-LM (Simon Neuser, Bochum) při analytických podmínkách: vakuum 0,01 mbar, urychlovací napětí 14 kV, proudová hustota 10  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ . S ohledem na předchozí práce (např. Müller et al. 2000, Sláby a Götze 2004) byla katodová luminiscence využita zejména při detailním studiu živeců.

#### 4.1.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA

Vzorky hornin v této práci byly studovány pomocí elektronové mikrosondy CAMECA SX100 v Laboratoří elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, provozované společně Masarykovou univerzitou a Českou geologickou službou. Provozní podmínky pro vlnově disperzní (WDS) analýzy zahrnovaly urychlovací napětí 15 kV, proudy paprsku 10 nA a průměr elektronového svazku  $\sim 5 \mu\text{m}$ . Jako referenční standardy byly použity jak přírodní, tak syntetické minerály (např. Krmíček et al. 2014). Minerální složení a vzorce jsou uvedeny v jednotkách apfu (atoms per formula unit) a XMg bylo vypočteno jako  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ . Zkratky názvů minerálů jsou používány dle publikace Whitney a Evans (2010).

#### 4.1.4 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Pro určení objemové hmotnosti je třeba znát hmotnost vzorku a také jeho objem. V případě pravidelného tvaru testovacího tělesa stanovíme jeho objem proměřením rozměrů pomocí posuvného měřítka. Výslednou objemovou hmotnost vypočteme pomocí jednoduchého vztahu (ČSN EN 1936:2000):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

kde:  $m$  ... hmotnost vzorku [kg]

$V$  ... objem vzorku [ $\text{m}^3$ ]

Výsledky stanovení objemové hmotnosti mohou být využity při geotechnických výpočtech i jako indikátory k posouzení kvality testované horniny, resp. pro odlišení jejího stavu v rámci jednoho vyčleněného typu (viz. tabulka v práci Hanáka a Horáka 1988).

Hodnoty objemové hmotnosti lze statisticky vyhodnotit jako horní mez 95% intervalu spolehlivosti střední hodnoty rozdělení pravděpodobnosti parametru pro daný soubor dat.

## 4.2 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU

### 4.2.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST

Skleroskopická tvrdost byla v disertační práci měřena Schmidovým kladivem typu L a před samotným měřením byl na Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně zjištěn koeficient, kterým byly naměřené hodnoty korigovány. Na každém bloku horniny byla provedena série 10–20 měření a průměrná hodnota skleroskopické tvrdosti byla následně použita k odečtu korelované jednoosé tlakové pevnosti podle Bieniawského (1984).

Statistické vyhodnocení pevnosti se, dle normy (ČSN EN 1990:2004), provádí určením hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení. Výše zmíněný postup je společný jak pro durbachity, tak i pro granulity.

### 4.2.2 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA“)

Pevnost v příčném tahu byla stanovena pomocí tzv. brazilské zkoušky na sérii válcových těles o průměru 54,7 mm s poměrem L/D 0,5. Zatěžování probíhalo rychlostí 200 N / s (ISRM 2007).

### 4.2.3 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Zkušební tělesa pro jednoosou tlakovou pevnost (UCS) byly jádrové vrty s průměrem 54,7 mm a s poměrem L/D 2,0 (Obr. 8B). Zatížení bylo řízeno osovou deformací, měřenou LVDT snímači, rychlostí 1  $\mu\text{m/s}$ . Měření UCS a trojosé tlakové pevnosti durbachitů probíhalo ve výzkumném centru AdMaS (VUT v Brně) na moderním přístroji ADVANTEST 9 ROCK od italského výrobce Controls Group (Obr. 8A).



**Obr. 8:** A – Měřicí přístroj ADVANTEST 9 ROCK využívaný v laboratoři vědecko-výzkumného centra AdMaS. Foto: [www.controls-group.com](http://www.controls-group.com). B – Ukázka testovaného tělesa durbachitu z Kamenné.

Modul pružnosti a Poissonovo číslo byly pro durbachity z Kamenné stanoveny z odlehčovací smyčky pracovního diagramu pro odlehčovací interval  $70 \div 35$  MPa. Výpočet modulu pružnosti byl proveden na základě vztahu:

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{ax}} = \frac{\sigma_{1,max} - \sigma_{1,min}}{\varepsilon_{ax,max} - \varepsilon_{ax,min}} \quad (2)$$

kde  $\sigma_1$  je axiální napětí,  $\varepsilon_{ax}$  je axiální poměrné přetvoření a indexy min a max značí vrcholy odlehčovací smyčky. Poissonovo číslo bylo stanoveno podle následujícího vzorce:

$$\nu = \frac{E}{\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{rad}}} = \frac{E}{\frac{\sigma_{1,max} - \sigma_{1,min}}{\varepsilon_{rad,max} - \varepsilon_{rad,min}}} \quad (3)$$

kde  $E$  je modul pružnosti,  $\sigma_1$  je axiální napětí,  $\varepsilon_{rad}$  je radiální poměrné přetvoření a indexy min a max značí vrcholy odlehčovací smyčky.

Výsledná data z brazilské zkoušky (pevnost v příčném tahu) a UCS durbachitů lze statisticky vyhodnotit pomocí intervalového odhadu střední hodnoty pro soubor malého rozsahu. Tento způsob se používá u zkoušek, u kterých nebylo možno získat dostatečný počet dat. Výsledky analýzy tzv. malých výběrů jsou zatíženy velkou mírou nejistoty (Meloun et al. 2001). Pro zajištění maximální korektnosti výsledků analýzy byly proto pro tyto soubory o rozsahu  $4 < n < 20$  použity metody robustního odhadu dle Horna (1983, 1998). Pro odhad polohy byla použita tzv. pivotová polosuma (podrobný postup v práci Horna 1998, Pokorného 2010 či v rukopisu disertační práce).

#### 4.2.4 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Triaxiální zkoušky durbachitů byly řízeny osovou deformací, při které byla sledována také post-deformační část křivky napětí s reziduální pevností. Stupeň rychlosti deformace byl  $1 \mu\text{m/s}$ . Testovány byly horninové vývrty o průměru 38 mm s poměrem  $L/D$  2,0. Za účelem sledování variability chování durbachitu při triaxiálním zatížení byly hodnoty plášťových (komorových) tlaků následující: 5, 10, 13,5 a 20 MPa. Tyto hodnoty dobře odrážejí rozpětí podmínek v hloubce plánovaného úložiště odpadů. Testování probíhalo nejprve konstantním zatěžováním až do dosažení požadované hodnoty komorového tlaku, poté se zvyšovalo pouze osově zatížení.

Výsledky z triaxiálních zkoušek byly analyzovány za účelem stanovení parametrů kritérií porušení. Určena byla Hoek-Brown (H-B) a Mohr-Coulomb (M-C) kritéria. Parametry v nelineární H-B rovnici byly stanoveny (pomocí softwaru RockLab) s využitím následující rovnice:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

kde  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  – hlavní napětí,  $\sigma_{ci}$  – pevnost v jednoosém tlaku;  $m_i$ ,  $s$ , a – empirické materiálové konstanty (Hoek et al. 2002).

Výsledky jednotlivých testů se pro zjištění parametrů M-C kritérií porušení vynášejí do souřadnic normálového a smykového napětí, kde je reprezentují Mohrovy kružnice. Grafické znázornění a jednotlivé parametry podmínek porušení (soudržnost, úhel vnitřního tření) byly získány pomocí programu AutoCAD.

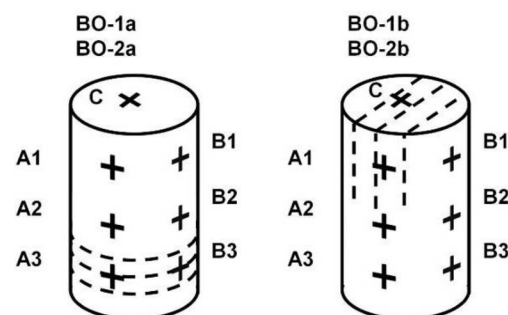
### 4.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU

Testy pevnostních vlastností granulitů byly provedeny jak v Laboratoři mechaniky hornin na Technické univerzitě v rakouském Štýrském Hradci, tak v laboratořích Oddělení fyzikálních vlastností hornin GLÚ AV ČR. Důvodem laboratorního testování vzorků mimo VUT byla zejména velmi vysoká odolnost odebraných granulitů, která jednak znemožňovala zhotovení zkušebních těles přímo ve vědecko-výzkumném centru AdMaS, ale také zapříčinila relativně menší množství testovaných těles a tudíž i nižší objem výsledných dat.

Horninové vývrty byly odvrtny v průměru 50 mm se štiřlostním poměrem (L:D) 2,0 pro testování pevnosti v jednoosém (UCS) a trojosém tlaku (Obr. 11B). Testování bylo zaměřeno na pozorování anizotropie mechanického chování, čemuž byla uzpůsobena i příprava orientovaných vzorků (Tab. 1). Vzorky pro mechanické testy byly vyrobeny ze tří bloků horniny (v tomto případě pro přehled označených BO-A, BO-B a BO-C, odpovídají označení BO1, BO2 a BO3 v popisu skleroskopické tvrdosti), vzorkovaných v kamenolomu Horní Bory. Soupis testovaných vzorků je shrnutý a vysvětlený v Tab. 1.

**Tab. 1** – Testované vzorky granulitu z lokality Horní Bory s náčrtem orientace vůči foliaci.

Vzorek	Typ testu	Poznámka
BO-1a	UCS	Vyvrtáno kolmo k foliaci. Vzorky odvrtny z horninového bloku BO-A.
BO-2a	Trojosá pevnost	
BO-1b	UCS	Vyvrtáno paralelně s foliací. Vzorky odvrtny z horninového bloku BO-C.
BO-2b	Trojosá pevnost	



#### 4.3.1 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA“)

Tahová pevnost byla stanovena pomocí tzv. brazilské zkoušky. Zkouška byla provedena na třech diskovitých vzorcích. Roviny foliace byly ve všech případech orientovány paralelně se základnami disků (Obr. 15A).

#### 4.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Testování pevnosti v jednoosém tlaku bylo provedeno dle metodiky ISRM (Franklin 1983) a bylo monitorováno s využitím LVDT snímačů. Dva ze senzorů měřily axiální napětí a jeden senzor měřil obvodovou deformaci. Radiální deformace byla vypočtena z logaritmu obvodové deformace. Modul pružnosti a Poissonovo číslo byly pro studované vzorky stanoveny z odlehčovací smyčky pracovního diagramu. Vzorek byl zatížen na 34 MPa, poté odlehčen na 10 MPa a opět zatížen na 34 MPa. Test byl v této fázi kontrolován tlakem s rychlostí přitížení 0,4 MPa/s. Poté byl test kontrolován obvodovou deformací o hodnotě 0,05 mm/min. Modul deformace  $E_{def}$  byl stanoven jako sečný modul mezi dvěma body diagramu napětí–deformace.

#### 4.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Metoda měření je detailně popsána výše pro durbachity. Pro sledování variability chování granulitu při triaxiálním zatížení byly hodnoty plášťových (komorových) tlaků, stejně

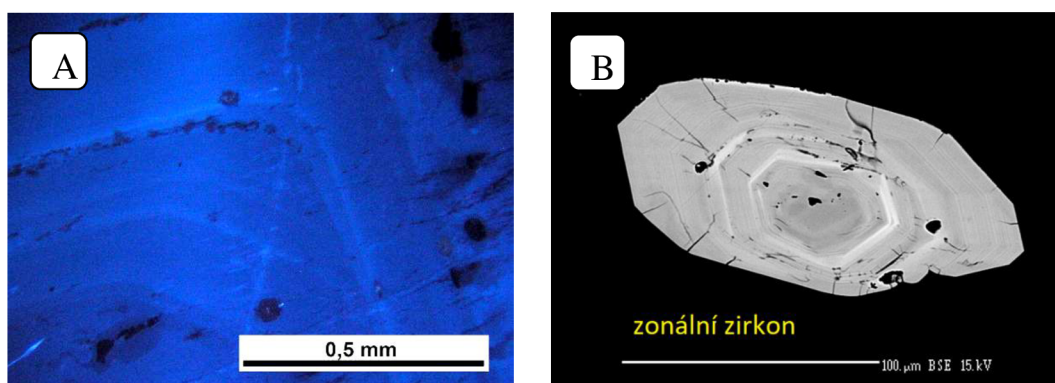
jako u durbachitu, voleny: 5, 10, 13,5 a 20 MPa. Za účelem ověření vlivu orientace foliace v podmínkách trojosého zatížení byly i u granulitu stanoveny parametry Hoek-Brownova kritéria porušení (viz vzorec č. 4; Hoek a Brown 2019). Hodnoty parametrů byly zjištěny výpočtem v tabulkovém procesoru. Hodnoty  $\sigma_{ci}$  a  $m_i$  byly stanoveny metodou nejmenších čtverců a konvenční hodnoty  $s$  a  $a$  byly uvažovány pro neporušenou horninu.

Určeny byly také Mohr-Coulombovy podmínky porušení, postupem totožným jako u durbachitů. Výsledky jednotlivých testů byly vyneseny do souřadnic normálového a smykového napětí, kde je reprezentují Mohrovy kružnice. Grafické znázornění a jednotlivé parametry podmínek porušení (soudržnost, úhel vnitřního tření) byly získány pomocí programu AutoCAD.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ DURBACHITU

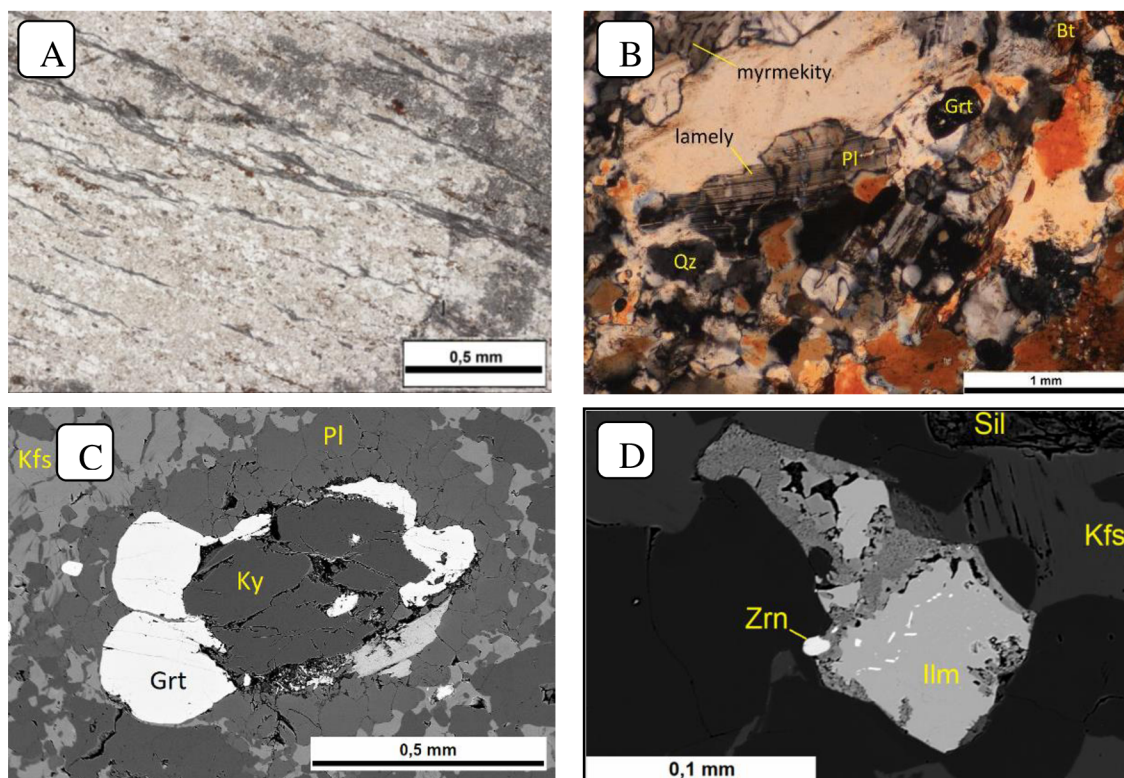
Vyrostlice draselných živců (až 3 cm) v durbachitu z lomu Kamenná jsou lokálně proudově usměrněny. K-živce jsou silně pertitické a dvojčatí podle karlovarského zákona. Živce mají výraznou oscilační zonalitu, která je dobře patná při zobrazení v katodové luminiscenci, kdy dochází ke střídání světle a tmavě modře luminescentních zón (Obr. 9A). K-živce společně s podružně zastoupenými plagioklasy základní hmoty mohou být postiženy sekundárními přeměnami, jako jsou sericitizace, karbonatizace a albitizace. Živce svým složením odpovídají ortoklasu, albitu a oligoklasu. Tmavé slídy chemismem odpovídají Mg – biotitu. Ten může být v některých případech chloritizován. Mimo slíd je v rámci durbachitu zastoupen také amfibol (vytváří až 2–3 mm velké krystaly), který svým složením odpovídá aktinolitu až magnesiohornblendu. Vzácně se objevují také pseudomorfózy po pyroxenu nebo amfibolu. Tmavé minerály často uzavírají akcesorické minerály, např. apatit, zirkon, pyrotin, titanit, allanit a blíže neurčený Th-silikát. Allanit v hornině tvoří i samostatná zrna, která jsou zonální, stejně tak zonální může být i zirkon (Obr. 9B). Křemen je přítomný pouze jako menší xenomorfní zrna v základní hmotě a jeho obsah zpravidla nepřevyšuje cca obj. 5 %.



**Obr. 9:** **A** – Zonalita draselného živce je zvládněně střídaním tmavě a světle modře luminescentních zón (CL; Kamenná). **B** – Zonální zirkon. Tyto akcesorické minerály s Th a U jsou hlavním zdrojem zvýšené radioaktivity durbachitů třebíčského masivu. Foto ve zpětně odražených elektronech.

## 5.2 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ GRANULITU

Granulity z lomu v Horních Borech i z lokality Habří jsou petrograficky velmi podobné a jsou charakterizované drobnými porfyroblasty granátu a granoblastickou mikrostrukturou. Na obou lokalitách výrazně převládá páskovaný typ granulitu s nápadnou foliací, kdy se střídají polohy s tmavou slídou a bez ní, nad světlým nepáskovaným typem (Obr. 10A). Základní mineralogické složení studovaných granulitů je křemen, K-živce, který převažuje nad plagioklasem, sillimanit, kyanit, biotit/flogopit, granát, rutil, ilmenit, apatit, hercynit (zpravidla zatlačovaný plagioklasem), pyroxen a zirkon. Křemen tvoří nepravidelná, undulózně zhášejší zrna, která jsou často doutníkovitě protažená. Draselný živec bývá xenomorfní a výrazně pertitický. Jeho kompoziční charakteristika je na obou lokalitách shodná (ortoklas). Plagioklas se objevuje jen ojediněle a složením odpovídá především oligoklasu. Na kontaktu živců mohou být patrné tzv. myrmekity (Obr. 10B). Zatímco v granulitu z lomu v Horních Borech odpovídá tmavá slída biotitu, tmavá slída z lokality Habří odpovídá svým složením Mg-biotitu až flogopitu. Porfyroblasty granátu tvoří zaoblená, bezbarvá zrna, která bývají často silně rozpraskaná. Granát je charakterizován převahou almandinové komponenty. Vedlejším minerálem je kyanit (Obr. 10C), který se často mění na jehlicovitý sillimanit. Rutil u granulitů z lomu v Horních Borech i z lokality Habří vytváří charakteristické žlutohnědé mikroporfyroblasty s nápadným reliéfem. Ilmenit vykazuje na okrajích známky leukoxenizace, tedy rozpadu na jemnější materiál (Obr. 10D). Apatit na obou lokalitách vystupuje v podobě protáhlých zrn a drobných inkluzí v granátu.



**Obr. 10:** A – Celkový pohled na distribuci minerálů v granulitu z Horních Borů (PPL). B – Granulit z Horních Borů. Patrné lamelování u plagioklasu (Pl) a myrmekity v K-živci (Kfs). Matrix je převážně tvořená křemenem (Qz), XPL. C – Minerály ve vzorku granulitu z Habří: granát (Grt) uzavírá kyanit (Ky), okolí tvoří plagioklas (Pl), který se střídá s K-živcem (Kfs).



**D** – Zrno ilmenitu (Ilm) z Horních Borů, značně přeměněného v jemnozrnnější materiál (leukoxenizace). V ilmenitu byly identifikovány wolframity v podobě inkluzí. V těsné blízkosti ilmenitu je malé zrno zirkonu (Zrn). Vlastní hornina je tvořena K-živci, biotitem a křemenem. Foto ve zpětně odražených elektronech.

### 5.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU

#### 5.3.1 SKLERSKOPICKÁ TVRDOST

Skleroskopická tvrdost durbachitů z Kamenné byla měřena na reprezentativních horninových blocích. V Tab. 2 je shrnutí průměrných hodnot  $R_{korig.}$  pro jednotlivé bloky horniny a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti ( $UCS_o$ ).

**Tab. 2** – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti ( $R_{korigovaná}$ ) durbachitu a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti ( $UCS_o$ ) podle Bieniawského (1984).

Parametr	Jednotka	Durbachit Kamenná		
		KA1	KA2	KA3
Horninový blok				
Objem. hmotnost $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2680		
$R_{korigovaná}$	[-]	59	44	68
$UCS_o$	[MPa]	270	125	475

Statistické vyhodnocení pomocí 5% kvantilu rozdělení pro soubor naměřených dat skleroskopické tvrdosti je uvedeno v tabulce níže (Tab. 3).

**Tab. 3** – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u hodnoty  $R_{korigované}$  pro durbachit.

Durbachit - Kamenná			
Horninový blok	KA1	KA2	KA3
Dolní 5% kvantil $R_{kor.}$	44	34	65

#### 5.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Charakter tahového porušení vzorků durbachitu z Kamenné po testování pomocí brazilské zkoušky je vyobrazen na Obr. 11A.

Získaná data jednoosé tlakové pevnosti a pevnosti v příčném tahu jsou v průměrných hodnotách prezentována v následující tabulce (Tab. 4). V tabulce je rovněž uvedena suchá objemová hmotnost a statistické údaje o jednotlivých zkouškách včetně směrodatných odchylek.

**Tab. 4** – Naměřená data pevnosti v příčném tahu a jednoosé tlakové pevnosti.

Kamenná - durbachit	Průměrná hodnota	Počet vzorků	Směrodatná odchylka
Pevnost v příčném tahu	5.70 MPa	6	0.96 MPa
Jednoosá tlaková pevnost	109.7 MPa	5	5.5 MPa
Suchá objemová hmotnost	2 680 kg/m <sup>3</sup>	15	26 kg/m <sup>3</sup>

Výsledky objemové hmotnosti lze statisticky vyhodnotit následovně: Horní mez 95% intervalu spolehlivosti střední hodnoty rozdělení pravděpodobnosti parametru pro soubor dat objemové hmotnosti durbachitu činí 2691,0 kg/m<sup>3</sup>.

Průměrná jednoosá tlaková pevnost durbachitu z lokality Kamenná (110 MPa) odpovídá zdravé hornině. Tato pevnost je přibližně 18× vyšší než je pevnost v příčném tahu.

Po statistickém zpracování souboru dat dle postupu uvedeného v metodické části disertační práce lze konstatovat, že:

- 1) Brazilská zkouška: při 95% intervalu spolehlivosti se střední hodnotou  $\mu = 5,70$  MPa platí:  $5,09 \leq \mu \leq 5,91$ .
- 2) UCS: při 95% intervalu spolehlivosti se střední hodnotou  $\mu = 110$  MPa platí:  $82 \leq \mu \leq 139$ .

Výsledné hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla pro durbachit z Kamenné jsou uvedeny v Tab. 5.

**Tab. 5** – Hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla.

Hornina a lokalita	Interval napětí		E [GPa]	ν [-]
	$\sigma_{1,max}$ [MPa]	$\sigma_{1,min}$ [MPa]		
Durbachit - Kamenná	70	35	55,2	0,31

### 5.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Vzorky durbachitu z Kamenné po testování trojosé tlakové pevnosti jsou porušovány systémem střížných trhlin, které často vykazují kulisovité uspořádání typu *en echelon* (Obr. 11B).



**Obr. 11:** **A** – Ukázka tahového porušení vzorků durbachitu z Kamenné. **B** – Porušení vzorku durbachitu z Kamenné po triaxiální zkoušce, ukázka střížných trhlin s kulisovitým uspořádáním typu *en echelon* (např. Davis et al. 2011).

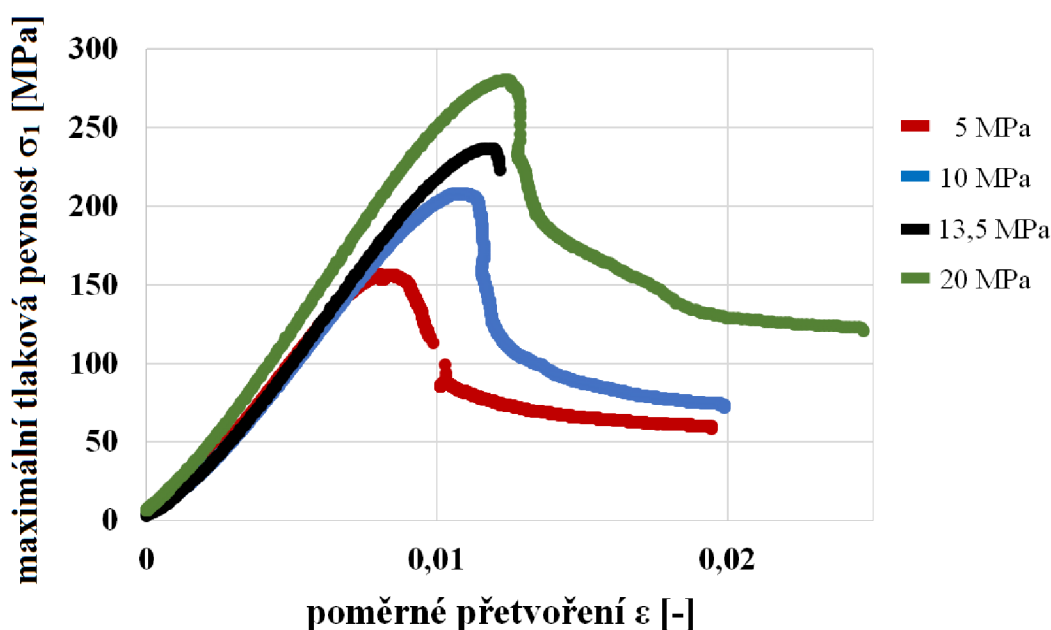
Průměrné hodnoty získané z triaxiálních testů jsou shrnuty v Tab. 6. Z naměřených hodnot je zřejmé, že napětí  $\sigma_1$  roste úměrně komorovému tlaku  $\sigma_3$ . Při maximálním

komorovém tlaku 20 MPa vykazuje durbachit z Kamenné přibližně  $2,5\times$  vyšší pevnost oproti pevnosti stanovené v prostém tlaku.

**Tab. 6** – Hodnoty naměřené při triaxiálním testování durbachitů.

Kamenná		
Komorový tlak $\sigma_3$ [MPa]	Maximální tlaková pevnost $\sigma_1$ [MPa]	Reziduální tlaková pevnost $\sigma_1$ [MPa]
5	156	60
10	207	73
13,5	237	-
20	280	118

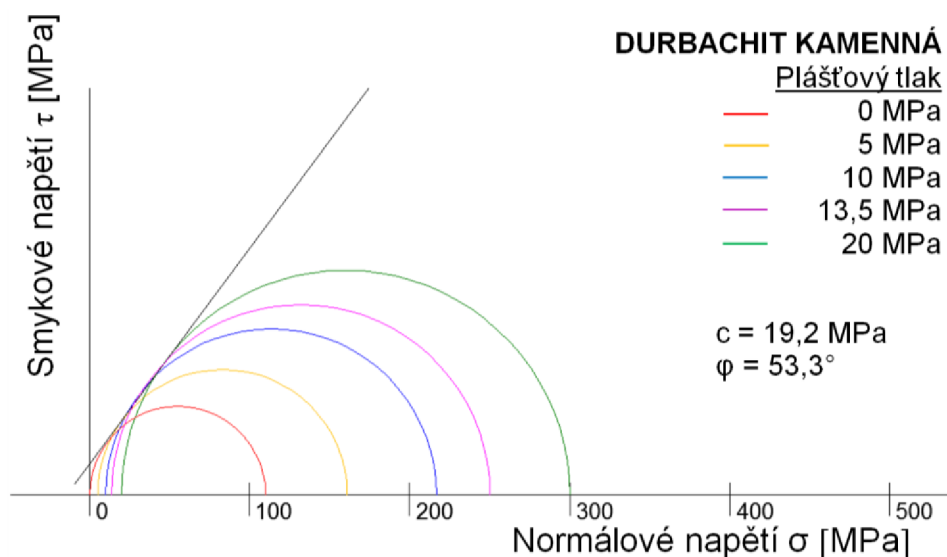
Výsledky triaxiálních zkoušek jsou graficky prezentovány na Obr. 12, kde osa x představuje osovou deformaci (poměrné přetvoření)  $\varepsilon$  [-] a osa y odpovídá napětí  $\sigma_1$  [MPa] při komorových tlacích 5, 10, 13,5 a 20 MPa. Záznam reziduální pevnosti při tlaku 13,5 MPa se nepodařil úspěšně realizovat, a proto v diagramu u této hodnoty chybí údaje. Významnější pokles post-deformační části křivky je specifický u vyšších komorových tlaků.



**Obr. 12:** Pracovní diagram z průběhu triaxiálních zkoušek durbachitů z Kamenné (Šujanská et al. 2018 – upraveno).

Prezentaci výsledků triaxiálních zkoušek ve vztahu k definovaným kritériím porušení přináší Tab. 7, Obr. 13 a 14.

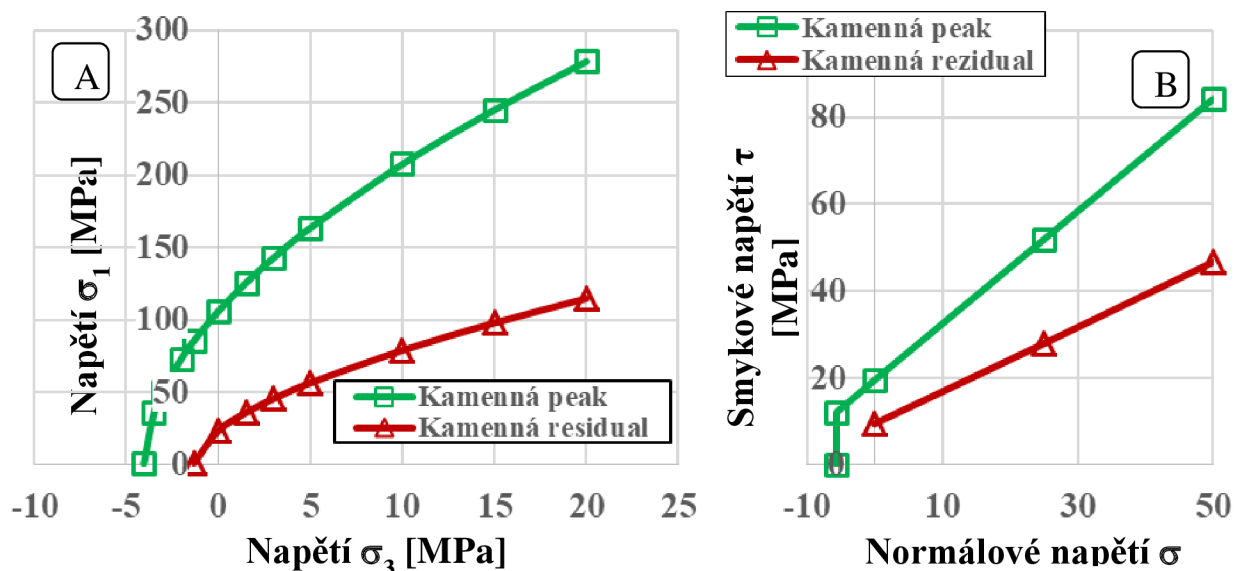
Reziduální pevnost durbachitu z Kamenné je v porovnání s maximální pevností výrazně snížena, kdy parametr  $\sigma_{ci}$  v kritériu H-B (Hoek-Brow) byl snížen na 23 % a úhel tření  $\varphi$  v kritériu M-C (Mohr-Coulomb) byl snížen na 70 %.



**Obr. 13:** Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek durbachitu z Kamenné, kde  $c$  = soudržnost,  $\varphi$  = úhel vnitřního tření.

**Tab. 7** – Parametry podmínek porušení H-B (Hoek-Brown) a M-C (Mohr-Coulomb). Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Kritérium porušení	Hoek-Brown (H-B)				Mohr-Coulomb (M-C)	
Parametr	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$m_i$ [-]	$s$ [-]	$a$ [-]	$c$ [MPa]	$\varphi$ [°]
Maximální pevnost	106,2	26,16	1,0	0,5	19,2	53,3
Reziduální pevnost	23,8	17,77	1,0	0,5	9,43	36,6



**Obr. 14:** Grafy čar porušení H-B (Hoek-Brown) (A) a M-C (Mohr-Coulomb) (B) kritéria. Upraveno podle Šujanské et al. (2018).

## 5.4 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU

### 5.4.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST

V Tab. 8 jsou shrnuty průměrné hodnoty  $R_{\text{korig.}}$  pro jednotlivé bloky horniny a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti ( $UCS_0$ ).

**Tab. 8** – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti granulitů ( $R_{\text{korigovaná}}$ ) a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti ( $UCS_0$ ) podle Bieniawského (1984).

Parametr	Jednotka	Granulit Horní Bory			Granulit Habří
		BO1	BO2	BO3	HA1
Horninový blok		BO1	BO2	BO3	HA1
Objem. hmotnost $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2640			2640
$R_{\text{korigovaná}}$	[-]	53	62	55	55
$UCS_0$	[MPa]	180	270	205	198

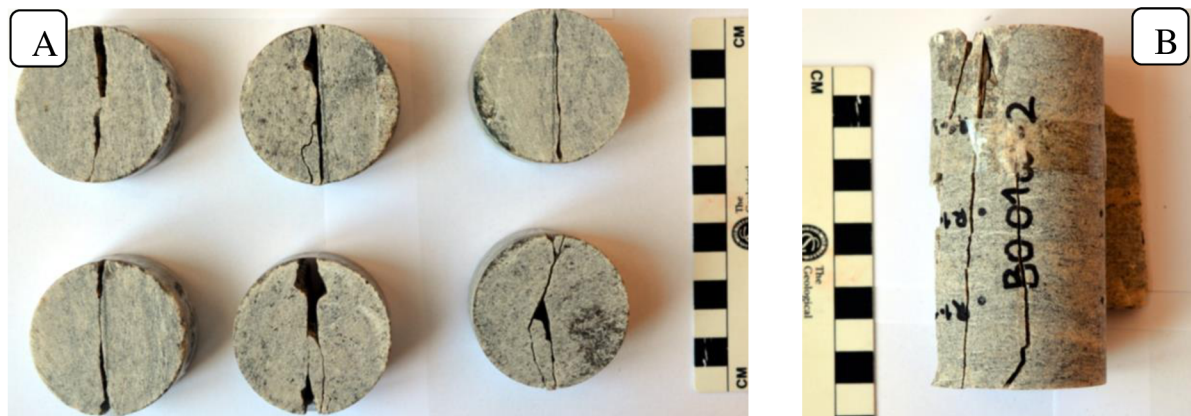
Statistické vyhodnocení pomocí 5% kvantilu rozdělení je pro soubor dat skleroskopické tvrdosti uvedeno v následující tabulce (Tab. 9).

**Tab. 9** – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u  $R_{\text{korigované}}$  pro vzorky z lokality Horní Bory a Habří.

Granulit - Horní Bory				Granulit - Habří	
Horninový blok	BO1	BO2	BO3	Horninový blok	HA1
Dolní 5% kvantil $R_{\text{kor.}}$	47	55	44	Dolní 5% kvantil $R_{\text{kor.}}$	49

### 5.4.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Přehled hlavních mechanických parametrů a jejich variace vůči rozdílné orientaci foliace je uveden v Tab. 10. S ohledem na velikost dostupných vzorků granulitů, bylo možné zhotovit sadu testovacích těles pouze z bloků granulitů odebraných v Horních Borech, které však velmi dobře mineralogicky odpovídají materiálu přímo z místa plánovaného vzniku úložiště na lokalitě Habří (viz kapitola 5.2). Ukázka porušení testovaných vzorků granulitu z Horních Borů je vyobrazena na Obr. 15.



**Obr. 15:** **A** – Ukázka tahového porušení vzorků granulitu z Horních Borů. **B** – Ukázka křehkého porušení vzorků granulitu z Horních Borů po jednoosé zkoušce.

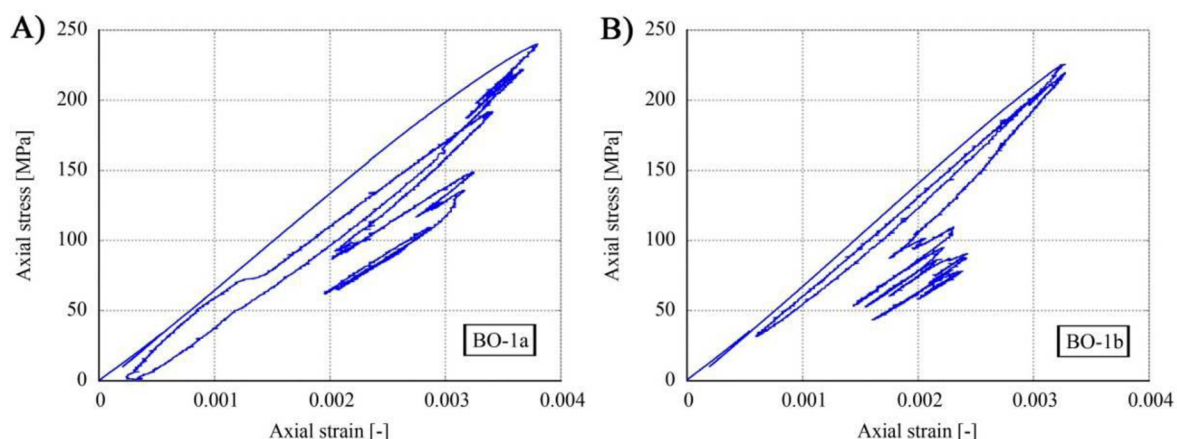
**Tab. 10** – Fyzikálně-mechanické vlastnosti testovaného granulitu z lokality Horní Bory. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Orientace vůči foliaci:	kolmo	paralelně	Jednotky:
<b>Objemová hmotnost</b>	2640		kg/m <sup>3</sup>
<b>UCS</b>	240	225	MPa
<b>E<sub>def</sub></b>	62,6	64,8	GPa
<b>E</b>	70,3	71,6	GPa
<b>v</b>	0,19	0,14	-
<b>Pevnost v tahu*</b>	15,1		MPa

\* orientace foliace paralelně s bázemi diskovitých vzorků

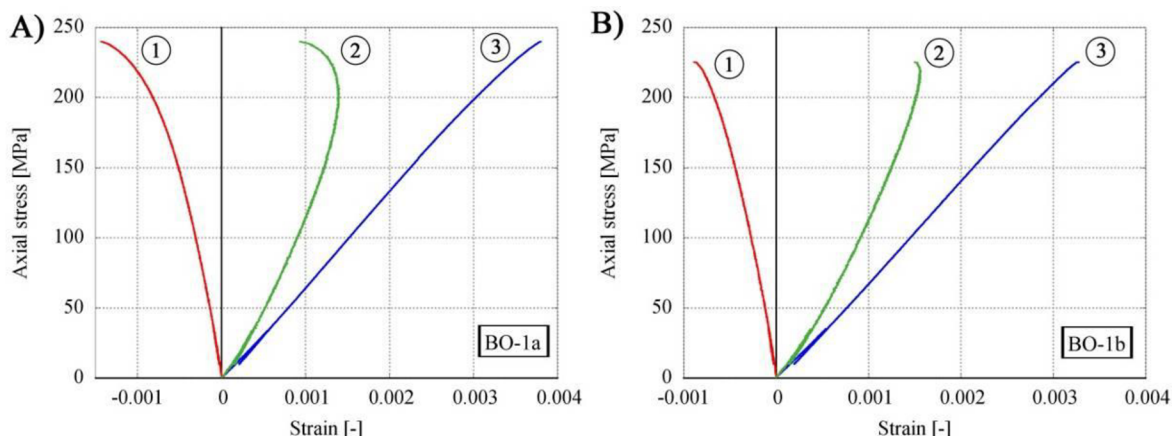
Výsledky objemové hmotnosti lze statisticky vyhodnotit následovně: horní mez 95% intervalu spolehlivosti střední hodnoty rozdělení pravděpodobnosti parametru pro soubor dat objemové hmotnosti granulitu činí 2632,8 kg/m<sup>3</sup>.

Testovaný granolit z lokality Horní Bory vykazoval relativně vysokou jednoosou tlakovou pevnost (více než 200 MPa). Vyšší hodnoty UCS byly zaznamenány při zatížení kolmo na foliaci. Naopak, v případě zatížení paralelně s foliací se hornina na základě zjištěných parametrů deformovatelnosti zdála být mírně tužší. Křehké porušení horniny, indikované výrazným poklesem na křivce napětí–deformace, bylo pozorováno v obou případech orientace foliace. Testované vzorky musely být následně výrazně odlehčeny, aby se předešlo nekontrolovanému porušení. Velikost poklesu byla zřetelnější u vzorku BO-1a (Obr. 16A). Na druhou stranu, pokles na křivce napětí–deformace se objevil bezprostředně po dosažení maximální hodnoty pevnosti (Obr. 16B), kdy se vytvořila masivní trhлина podél jedné z ploch foliace.



**Obr. 16:** Diagramy napětí–deformace UCS testů s vynesenu deformací s fází po porušení. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

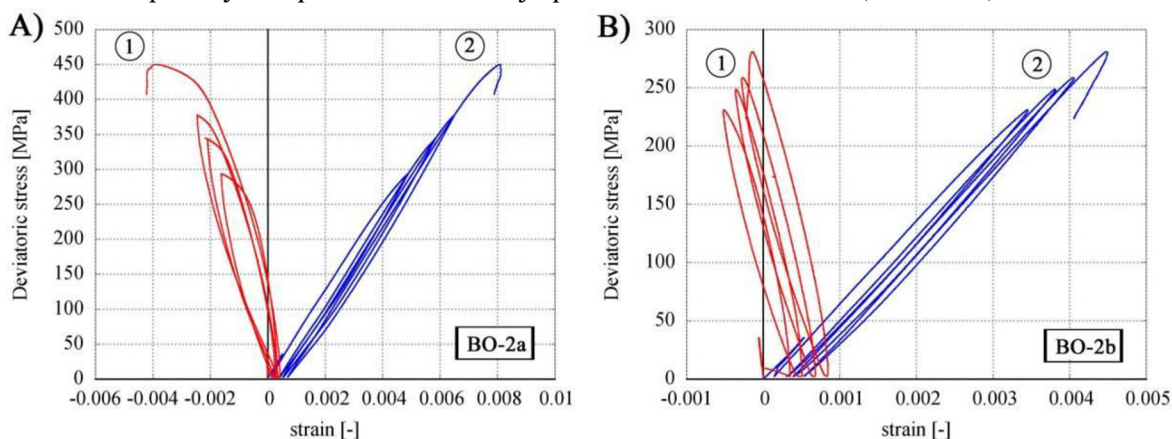
Variabilita procesu porušení byla rovněž dokumentována detailní deformační analýzou (Obr. 17). Nejvýraznější kontrast se objevil na objemové deformaci (Obr. 17 – křivka 2). Minimální objem vzorku BO-1a byl dosažen při 206 MPa (86 % UCS). Minimální objem vzorku BO-1b byl dosažen při 219 MPa (97 % UCS), tedy značně blízko maximální pevnosti.



**Obr. 17:** Diagramy napětí–deformace UCS testů s rozlišenými komponentami deformace vůči maximální osově pevnosti. Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – objemová deformace; křivka „3“ – osová deformace. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

#### 5.4.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Hodnoty maximálních osových napětí dosažené během trojosých tlakových testů granulitů jsou uvedeny v Tab. 11. Vzorek BO-2a vykazuje vyšší pevnost v testech trojosé tlakové pevnosti oproti vzorku BO-2b (Obr. 18A). Byla zde tedy pozorována obdobná závislost orientace foliace jako při testování jednoosé tlakové pevnosti. Výrazná radiální deformace při zvýšení plášťového tlaku je patrná u vzorku BO-2b (Obr. 18B).



**Obr. 18:** Vztah poměrného přetvoření a napětí u trojosých testů u vzorků BO-2a (A) a BO-2b (B). Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – osová deformace (Havlíčková et al. 2019).

**Tab. 11** – Maximální napětí dosažená během trojosých testů granulitu z Horních Borů. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Plášťový tlak $\sigma_3$ [MPa]	Maximální osová napětí $\sigma_1$ [MPa]	
	BO-2a (kolmo)	BO-2b (paralelně)
0*	240*	225*
5	298	236
10	353	259
13,5	391	272
20	470	301

\* UCS testy na vzorcích BO-1a a BO-1b

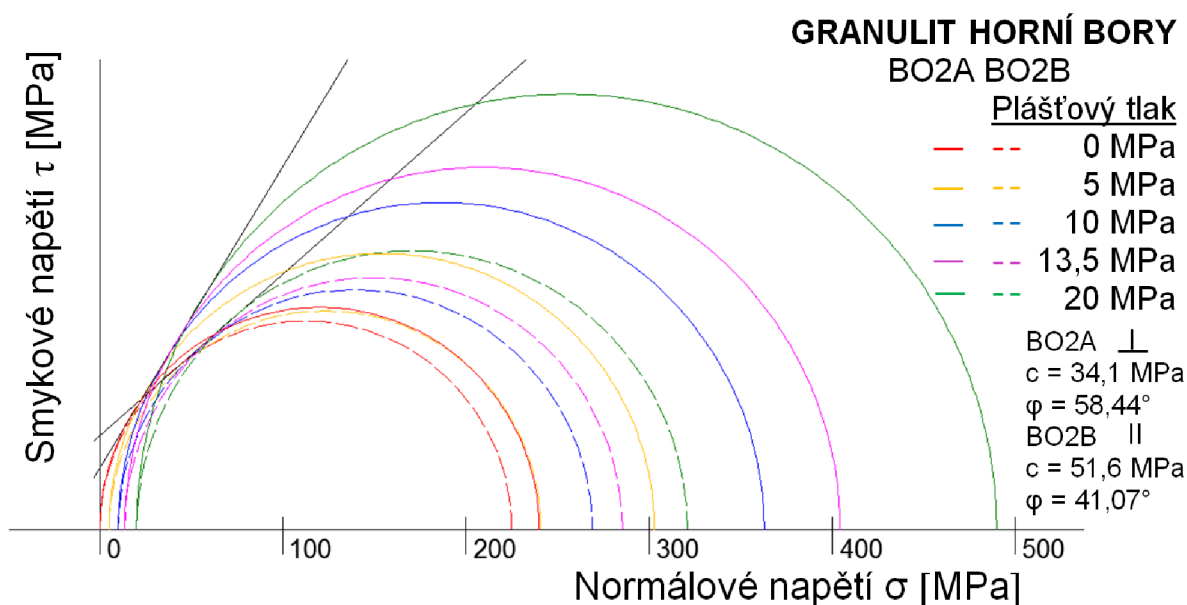
Získaná data byla následně analyzována za účelem zjištění hodnot parametrů Hoek-Brownova (Tab. 12) a Mohr-Coulombova (Obr. 19) kritéria porušení.

**Tab. 12** – Parametry Hoek-Brownova kritéria porušení s ohledem na orientaci foliace v granulitu. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Parametr	Symbol	kolmo	paralelně	Jednotky
UCS neporušené horniny	$\sigma_{ci}$	233	220	MPa
Materiálové konstanty (použity standardy s a a pro neporušené horniny)	$m_i$	29,5	6,4	-
	s	1,0	1,0	-
	a	0,5	0,5	-
Odhadnutá pevnost v tahu	$\sigma_t$	7,90	33,5	MPa

Parametr  $\sigma_{ci}$  je Hoek-Brownovým kritériem mírně podhodnocen ve srovnání s přímo stanovenou hodnotou jednoosé pevnosti. Variace hodnoty je 3 % při kolmé a 2 % při paralelní orientaci foliace. Naopak, odhad pevnosti v tahu  $\sigma_t$  je výrazně nižší ve směru kolmém k foliaci. Proto je vliv orientace foliace zřejmý také v pevnosti v tahu.

Po vynesení Mohrových kružnic s daty z triaxiálních zkoušek granulitů byly získány parametry M-C kritéria porušení, a to soudržnost ( $c = 34,1$  MPa a  $51,6$  MPa) a úhel vnitřního tření ( $\varphi = 58,44^\circ$  a  $41,07^\circ$ ). Hodnoty pro jednotlivá tělesa jsou dosti rozdílné a korespondují s orientací vzorků vůči foliaci.



**Obr. 19:** Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek granulitu – Horní Bory, kde  $c$  = soudržnost,  $\varphi$  = úhel vnitřního tření. Vzorek BO2A – kolmý k foliaci, BO2B – rovnoběžný s foliací.

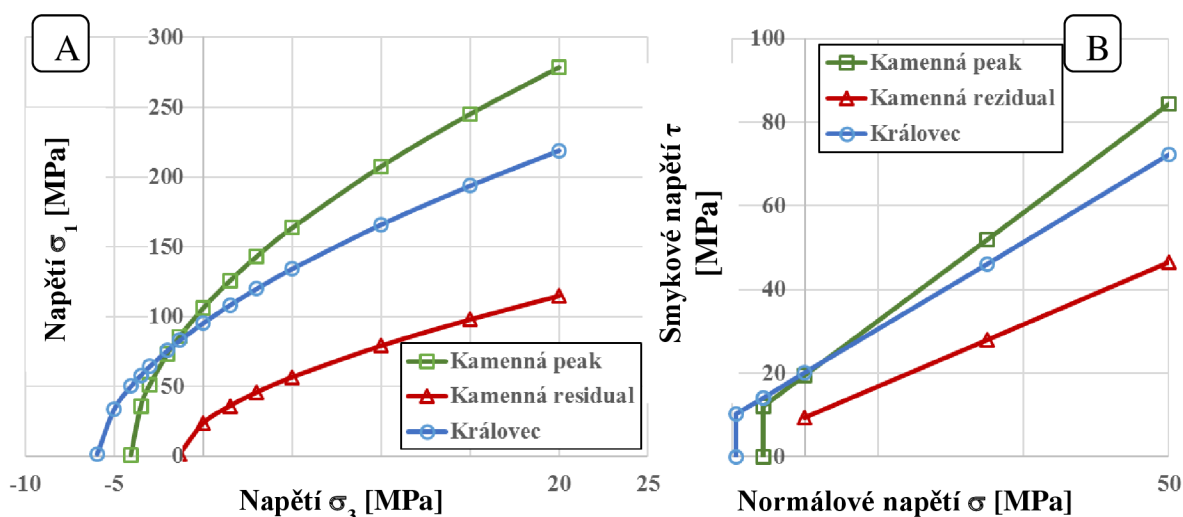


## 6 DISKUZE

Na základě provedeného studia lze konstatovat, že oba studované petrografické typy, tedy durbachit i granulit, představují geomateriály, které jsou bezesporu vhodné pro konstrukci budoucího úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva, avšak každý má své pro a proti. Durbachity jsou horninovým typem, jehož mechanické vlastnosti jsou do jisté míry porovnatelné s tzv. švédským modelem, kdy je úložiště umístěno v granitoidním masivu. Durbachity se porušují v porovnání s granulity více křehce s výrazně sníženou hodnotou reziduální pevnosti a mohou být tedy více citliví k porušení při případném zemětřesení či mikrozemětřesení. Tyto jevy teoreticky mohou být v okolí předpokládaného úložiště indukovány zvýšeným tepelně-mechanickým působením na horninový masiv v bezprostředním okolí úložiště radioaktivního materiálu (srov. SSM 2019). Takováto seismická aktivita teoreticky může v konečném důsledku zapříčinit porušení ochranných obalů, ve kterých bude radioaktivní materiál skladován. Naproti tomu granulit vykazuje vyšší stupeň anizotropie svých mechanických vlastností, a tím se tento horninový typ více podobá tzv. finskému modelu, kdy je úložiště budováno v metamorfovaných horninách s foliací (např. Hakala et al. 2005). Granulity, jakožto metamorfované horniny, mají sice horší mechanické vlastnosti ve směru paralelním s foliací, avšak foliace je do jisté míry schopna změny vyvolané v důsledku tepelně-mechanického působení na horninový masiv v bezprostředním okolí úložiště radioaktivního materiálu kompenzovat, aniž by došlo ke křehkému porušení horninového masivu. Na následujících řádcích jsou shrnuty a diskutovány zjištěné výsledky z obou studovaných horninových typů.

### *DURBACHIT*

Zjištěné fyzikálně-mechanické vlastnosti durbachitů třebečského masivu z lokality Kamenná je možné srovnat s fyzikálně-mechanickými charakteristikami durbachitů z lokality Královec, které publikovali Krmíček a Závacký (2017), kteří testovali horninové vývrty se stejným průměrem. Durbachity z Kamenné charakterizují mírně vyšší hodnoty jednoosé tlakové pevnosti na straně jedné a nižší hodnoty pevnosti v příčném tahu na straně druhé. Toto je možné interpretovat v kontextu pozorovaného vyššího zastoupení přednostně orientovaných vyrostlíc draselných živců s výbornou štěpností na lokalitě Kamenná (srov. kap. 5.1). Suchá objemová hmotnost je vyšší u durbachitu z Královce, což koresponduje s vyšším obsahem tmavých minerálů, charakterizovaných vyšší objemovou hmotností. Variabilita uvedených parametrů je s ohledem na velikost směrodatných odchylek u obou srovnávaných lokalit nízká a durbachity z Královce, které neobsahují ve zvýšené míře mafické mikrogranulární enklávy, se jeví jako homogennější než durbachity z Kamenné. Křivky pro Hoek-Brown a Mohr-Coulomb parametry podmínek porušení ukazují na vyšší pevnost s rostoucím tlakem u durbachitů z Kamenné (Obr. 20). Je ovšem třeba zdůraznit, že tyto parametry charakterizují pouze tektonicky neporušenou horninu, nikoliv celý horninový masiv s diskontinuitami.

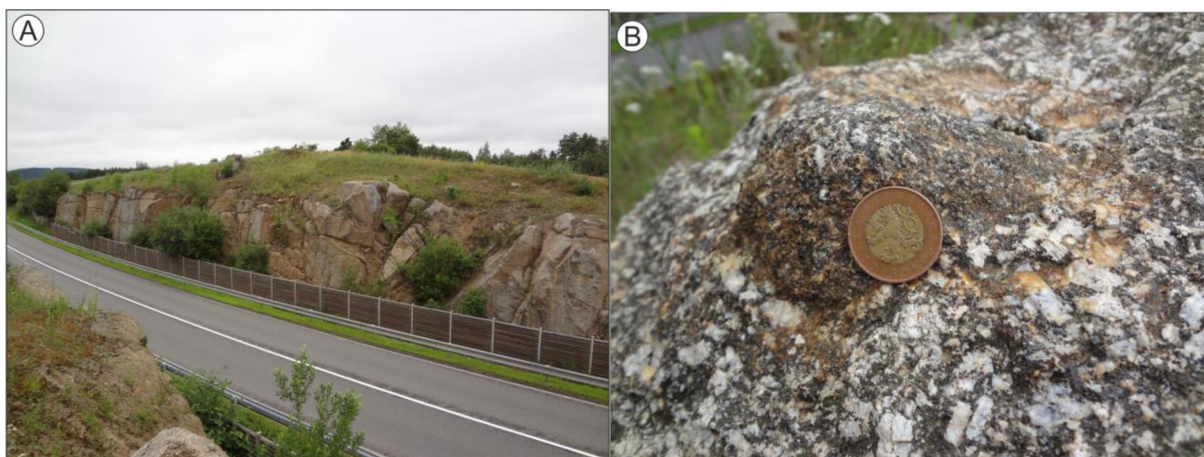


**Obr. 20:** Průběh čar porušení pro H-B (Hoek-Brown) (A) a M-C (Mohr-Coulomb) (B) kritéria u durbachitů na lokalitě Kamenná ve srovnání s lokalitou Královec situovanou v jižní části třebíčského masivu (Šujanská et al. 2018).

Dále je do jisté míry možné porovnat a diskutovat zjištěné fyzikálně-mechanické vlastnosti durbachitů z lokality Kamenná s výsledky, které na horninových vývrtech durbachitů s obdobným průměrem a/nebo štíhlostním poměrem pro SÚRAO zjistil Petružálek (2017). Lokalita odběru vzorků durbachitu je v práci Petružálka (2017) označena jako Oslavička, nicméně na základě publikovaných zeměpisných souřadnic je místem odběru skalní výchoz v zářezu silniční komunikace u obce Oslavice, který do průzkumného území vymezeného firmou SÚRAO již nezapadá (viz Obr. 3 v kapitole 3.1).

V porovnání s daty získanými v rámci disertační práce jsou hodnoty měření durbachitů z Oslavičky poměrně odlišné, s jedinou výjimkou, kterou představuje objemová hmotnost (Kamenná  $2,680 \text{ g/cm}^3$ ; Oslavička  $2,712 \text{ g/cm}^3$ ). Velký rozdíl je především u výsledků jednoosé tlakové pevnosti, kdy průměrná UCS u durbachitu z Kamenné činí  $109,7 (\pm 5,5)$  MPa, zatímco u vzorků z Oslavičky je to  $73,7 (\pm 10,3)$  MPa. Modul pružnosti a Poissonovo číslo je  $E = 55,2 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,31$  (Kamenná) a  $E = 19,9 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,18$  (Oslavička). Pevnost v příčném tahu vyšla v průměru  $5,7 (\pm 0,96)$  MPa (Kamenná) a  $3,4 (\pm 0,5)$  MPa (Oslavička). Výrazný rozdíl je patrný také u triaxiálních zkoušek, kdy můžeme srovnat data s plášťovým tlakem, který odpovídá předpokládané hloubce úložiště, tedy 13,5 MPa (maximální hodnota = 237 MPa; Kamenná) s daty s plášťovým tlakem 13 MPa (maximální hodnota = 152,6 MPa; Oslavička).

I když by se na základě deklarované objemové hmotnosti mělo jednat o „zdravou“ horninu, zejména data pro UCS z práce Petružálka (2017) pravděpodobně korelují s navětráním testovaného materiálu (Obr. 21). Na rozdíl od durbachitů z lomu Kamenná je pevnost podstatně snížena. Chybí zde tedy předpoklad testování dostatečně zdravého horninového materiálu, jaký lze očekávat v hloubce 500 m pod povrchem, a který byl vnímán jako důležitý parametr v rešeršní a terénní etapě této disertační práce.



**Obr. 21:** **A** – Ukázka rozvětraných durbachitových výchozů v zářezu silniční komunikace u obce Oslavice; **B** – Detail durbachitu z téže lokality se selektivně vyvětralou mafickou mikrogranulární enklávou. Povrchové horniny z této lokality či jejího širšího okolí postižené značným zvětráním pravděpodobně posloužily jako výchozí materiál pro testování fyzikálně-mechanických vlastností durbachitu pro budoucí úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva (Petružálek et al. 2017). Autorka disertační práce se na základě provedeného studia domnívá, že tato lokalita není dostatečně reprezentativní. Foto: L. Krmíček.

## **GRANULIT**

### ***Petrografické vlastnosti granulitu***

Na základě pozorovaného minerálního a petrografického složení lze konstatovat, že studovaný čerstvý horninový materiál z lokality Horní Bory odpovídá jemnozrnnému, různě foliovanému felsickému granulitu s hlavní minerální asociací: křemen + živec (K-živec > plagioklas) + granát + biotit + kyanit a/nebo sillimanit a akcesorický ilmenit, apatit, hercynit a zirkon. Mineralogicky se tak shoduje s lokalitou u potoka Bobrůvka v katastru obce Habří, která leží přímo v uvažované oblasti pro budoucí úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Na druhou stranu, hornina z Horních Borů texturně/mineralogicky neodpovídá granulitové rule, která může tvořit několik centimetrů až metrů mocné partie v borském granulitovém masivu (např. Cempírek et al. 2010). Materiál testovaný v disertační práci tak v souladu s vytyčeným cílem odpovídá granulitu, tj. petrografickému typu, který je zvažován pro vybudování podzemního úložiště jaderného odpadu (Kováčik et al. 2016).

### ***Anizotropie mechanických vlastností***

Na základě foliace, pozorované v mikroskopickém a makroskopickém měřítku, bylo možné u granulitu z kamenolomu Horní Bory očekávat jistou anizotropii mechanických vlastností. Tento předpoklad se v omezeném rozsahu potvrdil také při laboratorním testování. Jednoosá tlaková pevnost byla o 6,3 % vyšší při testování ve směru kolmo k foliaci (srov. Tab. 10). Obecně testovaný granulit vykazoval relativně vysoké hodnoty UCS (225, resp. 240 MPa) a horninu je tak možné zařadit do stupně „R5 – Velmi pevná” dle klasifikace ČSN EN ISO 14689-1:2004, kdy se získané hodnoty blíží hornímu limitu tohoto stupně (100–

250 MPa). Maximální trojosá tlaková pevnost byla vyšší při orientaci kolmo k foliaci (srov. Tab. 11). Parametr  $m_i$  Hoek-Brownova kritéria porušení se s ohledem na orientaci ploch foliace lišil nejvýrazněji (78 %). Na druhou stranu, variace odhadované pevnosti v tahu  $\sigma_t$  byla také vysoká (76 %), avšak v opačném trendu – parametr byl vyšší ve směru paralelním s foliací (srov. Tab. 12). Porovnáme-li parametry přetvárnosti, jsou mírně vyšší v případě, kdy je foliace orientována paralelně se zatížením. Oproti tomu, Poissonovo číslo  $\nu$  je o 26 % nižší při stejné orientaci (srov. Tab. 10). Na základě zjištěných dat je tedy očekávaná anizotropie mechanických vlastností relativně nízká, s výjimkou parametrů  $m_i$  a  $\sigma_t$ . Pevnost v tlaku v jednoosých a trojosých testech klesá, pokud je hornina zatížena paralelně s foliací, zatímco moduly pružnosti jsou mírně zvýšené.

Studie Petružálka (2017) uvádí pro granulity z lokality Kraví hora (Moravské Pavlovice) následující parametry: UCS 215 MPa, Youngův modul  $E$  49,8 MPa, hodnota Poissonova čísla  $\nu$  0,19, maximální pevnost v podmínkách trojosého tlaku 310 MPa při plášťovém tlaku  $\sigma_3$  13 MPa a pevnost v příčném tahu 10,5 MPa. Hodnoty UCS,  $E$  a pevnosti v příčném tahu jsou tedy nižší, než jsou výsledky v disertační práci. Poissonovo číslo dosahuje stejné hodnoty jako v disertační práci v případě, kdy byla foliace orientována kolmo ke směru zatížení. Maximální pevnost v trojosých testech je mezi hodnotami, které byly získány za srovnatelných podmínek plášťového tlaku ( $\sigma_3 = 13,5$  MPa). Níže je nabídnuto potenciální vysvětlení zmíněné variability:

- Pertužálek (2017) studoval vzorky přímo z Kraví hory – potenciální lokality úložiště jaderného odpadu. Hornina byla vzorkována z dostupných povrchových výchozů a mohla tedy být navětralá.
- Vzorky z Kraví hory jsou silně foliované (viz prezentované obrázky v práci Petružálka 2017) a více melanokráttní, než je charakteristické pro typické felsické granulity. Vyšší obsah tmavých minerálů v hornině z Kraví hory může být indikován vyšší hustotou ( $2655 \text{ kg/m}^3$ ), než autorka zjistila v této práci. Hornina z Kraví hory tedy spíše připomíná granulitovou rulu než klasický granulit. Toto ukazuje na důležitost detailního petrografického popisu, který by měl vždy předcházet před vlastním studiem fyzikálně-mechanických vlastností.

## 7 ZÁVĚR

Disertační práce pojednává o petrografických a fyzikálně-mechanických vlastnostech dvou horninových typů (durbachit, granulit), které jsou uvažovány pro výstavbu budoucího úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva na území České republiky. Čerstvý horninový materiál byl pro potřeby disertační práce odebírán v činných lomech, které jsou lokalizovány nedaleko oblastí vytipovaných Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) jako nejvíce perspektivní pro případné vybudování úložiště. Prozatím se k oběma horninovým typům objevuje v domácí i světové literatuře minimum prací, které by se komplexně zabývaly kombinovanými petrografickými a fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, a právě v tomto spočívá síla a hlavní cíl této disertační práce. Protože se hlubinně

úložiště plánuje v krystalinických horninách v hloubce 500 m, stěžejní jsou výstupy z triaxiálních zkoušek simulujících napjatostní podmínky v uvažované hloubce.

Na základě provedeného studia lze konstatovat, že oba studované petrografické typy jsou bezesporu vhodné pro konstrukci budoucího úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Durbachity jsou horninovým typem, jehož mechanické vlastnosti jsou do jisté míry porovnatelné s tzv. švédským modelem, kdy je úložiště lokalizováno v žulovém masivu, zatímco granulit vykazuje vyšší stupeň anizotropie svých mechanických vlastností, a tím se tento horninový typ více podobá tzv. finskému modelu, kdy je úložiště budováno v metamorfovaných horninách s foliací.

Hlavní konkrétní závěry studia obou horninových typů lze sumarizovat do následujících bodů:

### **Durbachit**

- Durbachity z lokality Kamenná (třebíčský masiv) charakterizují mírně vyšší hodnoty jednoosé tlakové pevnosti na straně jedné a nižší hodnoty pevností v příčném tahu na straně druhé, které lze spojit s vyšším zastoupením přednostně orientovaných vyrostlíc draselných živců s výbornou štěpností.
- Průměrná jednoosá tlaková pevnost durbachitu z lokality Kamenná (110 MPa) odpovídá zdravé hornině. Tato pevnost je přibližně 18× vyšší než pevnost v příčném tahu.
- Z naměřených hodnot triaxiální pevnosti je zřejmé, že napětí  $\sigma_1$  roste úměrně komorovému tlaku  $\sigma_3$ . Při maximálním komorovém tlaku 20 MPa vykazuje durbachit z Kamenné přibližně 2,5× vyšší pevnost oproti pevnosti stanovené v prostém tlaku.
- Reziduální pevnost durbachitu z Kamenné je v porovnání s maximální pevností výrazně snížena, kdy parametr  $\sigma_{ci}$  v kritériu H-B (Hoek-Brown) byl snížen na 23 % a úhel tření  $\varphi$  v kritériu M-C (Mohr-Coulomb) byl snížen na 70 %.

### **Granulit:**

- Anizotropie byla identifikována ve stavbě horniny jak v makroskopickém, tak v mikroskopickém měřítku a je v příčinné souvislosti s pozorovanou anizotropií mechanických vlastností. Variabilita jednoosé tlakové pevnosti i modulů pružnosti byla relativně nízká. Na druhou stranu, variabilita Poissonova čísla a Hoek-Brownova kritéria porušení v podmínkách trojosého zatížení je relativně vysoká.
- Testovaná hornina dosáhla značně vysokých hodnot jednoosé tlakové pevnosti (až 240 MPa) a během laboratorního testování byl pozorován křehký typ porušení.
- Stanovení mechanických vlastností vyžaduje výrazně více dat v případě anizotropní horniny. S ohledem na množství provedených laboratorních testů, které bylo možné realizovat pro potřeby této disertační práce, by popsání kvantifikace anizotropie horniny měla být považována spíše za přibližnou.

## 8 LITERATURA

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mechanics design in mining and tunnelling. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1984, 272 p.

BUKOVSKÁ, Z.; SOEJONO, I.; VONDROVIC, L.; VAVRO, M.; SOUČEK, K.; BURIÁNEK, D.; DOBEŠ, P.; ŠVAGERA, O.; WACLAWIK, P.; ŘIHOŠEK, J.; VERNER, K.; SLÁMA, J.; VAVRO, L.; KONÍČEK, P.; STAŠ, L.; PÉCSKAY, Z.; VESELOVSKÝ, F. Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic. In: *Engineering Geology*, 2019, 259, 105186. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105186.

CEMPÍREK, J.; NOVÁK, M.; DOLNÍČEK, Z.; KOTKOVÁ, J.; ŠKODA, R. Crystal chemistry and origin of grandidierite, ominelite, boralsilite, and werdingite from the Bory Granulite Massif, Czech Republic. In: *American Mineralogist*, 2010, 95 (10), p. 1533–1547. DOI: 10.2138/am.2010.3480.

ČSN EN 1936. Zkušební metody přírodního kamene – stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti. Praha: Český normalizační institut, 2000, 12 s.

ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI Český normalizační institut, 2004.

ČSN EN ISO 14689-1. Geotechnický průzkum a zkoušení – pojmenování a zařídování hornin – část 1: pojmenování a popis. Praha: Český normalizační institut, 2004, 20 s.

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J.; KLUTH, C. F.; KLUTH, C. Structural geology of rocks and regions. John Wiley and Sons, 2011.

ENGELBRECHT, CH. A. Kurze Beschreibung des Weisssteins, einer im geognostischen System bis jetzt unbekannt gewesenen Gebirgsart. Schr. Linnischen Gesell, Lipsko, 1802, p. 26–34.

FRANKLIN, J. A. Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20 (6), p. 285–290.

HAKALA, M.; KUULA, H.; HUDSON, J. Strength and strain Anisotropy of Olkiluoto Mica gneiss. – *Pracovní zpráva 2005-61*, POSIVA OY, 2005.

HANÁK, J.; HORÁK, V. Geotechnické vlastnosti granodioritů východní granitoidové zóny brněnského masivu. In: *Ročenka GMS 1986–1987*. Brno: GEOTEST, 1988, s. 219–231.

HAVLÍČKOVÁ, D.; ZÁVACKÝ, M.; KRMÍČEK, L.; BLÜMEL, M.; ROZSYPALOVÁ, I. Mechanical properties of Granulite from Horní Bory in Bohemian massif. In: *GeoScience Engineering*, 2019, 65 (4), p. 38–53. ISSN 1802-5420. DOI: 10.35180/gse-2019-0022.

- HOEK, E.; BROWN, E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. In: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, 11(3), p. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001.
- HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C. T.; CORKUM, B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. In: *NARMS-TAC Conference*, Canada, 2002, p. 267–273.
- HOLUB, F. V. Ultrapotassic plutonic rocks of the durbachite series in the Bohemian Massif: Petrology, geochemistry and petrogenetic interpretation. In: *Sborník geologických věd, ložisková geologie, mineralogie*, 1997, 31, p. 5–26.
- HOLUB, J.; FIEDLER, F.; KOZÁK, T.; VOZÁR, M. Technická zpráva Horka – Budišov, 002, 2012, 81 s.
- HORN, P.; PESCE, A.; COPELAND, B. A robust approach to reference interval estimation and evaluation. In: *Clin Chem*. 1998, 44 (3), p. 622–631.
- HORN, P. Some easy T-statistics. In: *J. Am. Statist. Assoc.* 1983, 78, p. 930–936.
- ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Ankara: International Society for Rock Mechanics, 2007, 628 p.
- KOVÁČIK, M.; URÍK, J.; ELIÁŠ, M.; VONDROVIC, L.; VENCL, M.; POSPÍŠKOVÁ, I. Ověření vhodnosti horninového prostředí pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO v PÚ ZZZK Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora a Magdaléna. MS, *Technická zpráva 65*, Správa úložišť radioakt. odpadů, 2016, Praha, 43 s.
- KRMÍČEK, L.; CEMPÍREK, J.; HAVLÍN, A.; PŘICHYSTAL, A.; HOUZAR, S.; KRMÍČKOVÁ, M.; GADAS, P. et al. Mineralogy and petrogenesis of a Ba–Ti–Zr-rich peralkaline dyke from Šebkovice (Czech Republic): recognition of the most lamproitic Variscan intrusion. In: *Lithos*, 2011, 121, p. 74–86. DOI: 10.1016/j.lithos.2010.10.005.
- KRMÍČEK, L.; HALAVÍNOVÁ, M.; ROMER, R. L.; VAŠINOVÁ, G.; VACULOVÍČ, T. Phlogopite/matrix, clinopyroxene/matrix and clinopyroxene/phlogopite trace-element partitioning in a calc-alkaline lamprophyre: new constrains from the Křižanovice minette dyke (Bohemian Massif), In: *Journal of Geosciences*, 2014, 59, p. 87–96. DOI: 10.3190/jgeosci.160.
- KRMÍČEK, L. Posouzení vlivu přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti základových hornin z žulového a syenitového masivu: pilotní studie z ČR. – *Habilitační práce*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Brno, 2015.
- KRMÍČEK, L.; ZÁVACKÝ, M. Triaxial compression testing of multicomponent geomaterials from quartz-poor (syenitic) systems. In: *Geoscience Engineering*, 2017, 63 (4), p. 1–7. ISSN: 1802-5420.

LE MAITRE, R. W. Igneous Rocks: A classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences subcommission on the systematics of igneous rocks. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 252 p.

MELOUN, M.; HILL, M.; MILITKÝ, J.; KUPKA, K. Analysis of large and small samples of biochemical and clinical data. In: *Clin Chem Lab Med. Berlin* – New York: Walter de Gruyter, 2001, 39 (1), p. 53–61. DOI: 10.1515/CCLM.2001.013.

MÜLLER, A.; SELTMANN, R.; BEHR, H. J. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite–case study from the Schellerhau Granite Complex, Eastern Erzgebirge, Germany. In: *Mineralium Deposita*, 2000, 35 (2), p. 169–189. DOI: 10.1007/s001260050014.

PETRUŽÁLEK, M. Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů na potenciálních lokalitách HÚ. – *Technická zpráva*. Geologický ústav AV ČR, v. v. i. Praha, leden 2017.

POSPÍŠKOVÁ, V. Příprava hlubinného úložiště v České republice. In: *Tunel*, 2014, 2, s. 11 – 17.

SĽABY, E.; GÖTZE, J. Feldspar crystallization under magma-mixing conditions shown by cathodoluminescence and geochemical modelling—a case study from the Karkonosze pluton (SW Poland). In: *Mineralogical Magazine*, 2004, 68 (4), p. 561–577.

SSM. 3D Thermo-Mechanical Coupled Modelling of Thermo-Seismic Response of a Fractured Rock Mass related to the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste in Hard Rock. – *Report No. 2019:15*, 2019. ISSN: 2000-0456.

SOUČEK, K. Podzemní výzkumné pracoviště Bukov - geotechnická charakterizace lokality, 2016.

SOUČEK, K.; VAVRO, M.; STAŠ, L.; VAVRO, L.; WACLAWIK, P.; KONICEK, P.; PTÁČEK, J.; VONDROVIC, L. Geotechnical Characterization of Bukov Underground Research Facility. In: *Procedia Engineering*, 2017, 191, p. 711–718.

STEPHANSSON, O.; SEMIKOVA, H.; ZIMMERMANN, G.; ZANG, A. Laboratory pulse test of hydraulic fracturing on granitic sample cores from Äspö HRL, Sweden. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (2), p. 629-633.

SÚRAO: Průzkumné území pro zvláštní zásah do zemské kůry – Horka, leták. Praha, 2016a.

SÚRAO: Průzkumné území pro zvláštní zásah do zemské kůry – Kraví hora, leták. Praha, 2016b.

ŠUJANSKÁ, D.; ZÁVACKÝ, M.; KRMÍČEK, L. Behaviour of syenite under triaxial load conditions. In: *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*, STEF92 Technology, Sofie, Bulharsko, 2018. ISSN 1314-2704, ISBN 978-619-7408-36-2.



von JUSTI, J. H. G. Nachricht von einer neuen Art eines neues Halbedelgesteines so kürztlich in Mähren entdeckt worden. Neue Wahrheiten zumVorteil der Naturkunde und des gesellschaftlichen Leben der Menchen 1,1754.

WALTON, G.; LATO, M.; ANSCHÜTZ, H.; PERRAS, M. A.; DIEDERICH, M. S. Non-invasive detection of fractures, fracture zones, and rock damage in a hard rock excavation - Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden. In: *Engineering Geology*, 2015, 196, p. 210–221.

WHITNEY, D. L.; EVANS, B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. In: *American mineralogist*, 2010, 95 (1), p. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.

ZANG, A.; STEPHANSSON, O. Stress Fields of the Earth's Crust. Springer, Berlin, 2010.

### **Internetové zdroje:**

CONTROLS-GROUP: Rock mechanics. Photo. [www.controls-group.com](http://www.controls-group.com) [online]. 2018. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://www.controls-group.com/eng/rock-mechanics-testing-equipment>

ČESKÝ ROZHLAS: Stát zúžil výběr míst pro úložiště jaderného odpadu. Zůstaly Kraví hora a Horka. [www.irozhlas.cz](http://www.irozhlas.cz) [online]. 2016. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/stat-zuzil-vyber-mist-pro-uloziste-jaderneho-odpadu-zustaly-kravi-hora-a-horka\\_201607151424\\_vkourimsky](https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/stat-zuzil-vyber-mist-pro-uloziste-jaderneho-odpadu-zustaly-kravi-hora-a-horka_201607151424_vkourimsky)

SÚRAO: Hlubinné úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. [www.surao.cz](http://www.surao.cz), Praha, 2016c. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: [https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/03/HU\\_brozura\\_final.pdf](https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/03/HU_brozura_final.pdf)

SÚRAO: Lokalita Kraví hora, topogr. situace, [www.surao.cz](http://www.surao.cz) [online]. Praha, 2018a. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/data/original/images/mapy/topo/kravi-hora-topo-a4-50k.jpg>

SÚRAO: Ukládání vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. [www.surao.cz](http://www.surao.cz) [online]. Praha, 2018b. [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/rao/ukladani-vysokoaktivnich-odpadu-a-vjp>

SÚRAO: Zahraniční i domácí odborníci se v parlamentu shodli na nutnosti úložiště. [www.surao.cz](http://www.surao.cz) [online]. Praha, 2018c. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/zahranicni-i-domaci-odbornici-se-v-parlamentu-shodli-na-nutnosti-uloziste/>

SÚRAO: Zkoumané lokality. [www.surao.cz](http://www.surao.cz) [online]. Praha, 2018d. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/zkoumane-lokality>

## CURRICULUM VITAE



Mgr. Dagmar Havlíčková, roz. Šujanská

Narozena v Kroměříži v září 1991.

### Vzdělání

- 2017 – dosud:           Doktorský studijní program, obor Konstrukce a dopravní stavby,  
Ústav Geotechniky Fakulty stavební VUT v Brně.
- 2013 – 2016:           Magisterský st. program, obor Aplikovaná a environmentální geologie,  
Ústav geologických věd Přírodovědecké fakulty MU v Brně.
- 2011 – 2013:           Bakalářský studijní program, obor Geologie,  
Ústav geologických věd Přírodovědecké fakulty MU v Brně.
- 2005 – 2011:           Víceleté studium na Arcibiskupském gymnáziu Kroměříž.

### Pracovní zkušenosti v oboru

- 2018                    GEOtest, a.s.; laboratorní technik – laboratoře mechaniky zemin.
- 2017                    GEODRILL s.r.o.; laborant – zkoušky v laboratoři mechaniky zemin.

### Účast ve výzkumných projektech (člen řešitelského týmu)

- 2019                    FAST-S-19-6031 Lomově-mechanické vlastnosti droby v kontextu  
dalších vlastností horniny.
- 2018                    FAST-S-18-5356 Stanovení vstupních parametrů mater. modelů pro  
potřeby podzemního stavitelství s možností využití optimaliz. metod.
- 2017                    FAST-S-17-4624 Chování vícesložkových geomateriálů při testech  
trojosé tlakové pevnosti: pilotní experim. studie v mechanice hornin.

### Pedagogická činnost

Vedení cvičení z předmětu BF001 *Geologie* a předmětu BF092 *Základy regionální geologie České republiky pro stavební inženýry*.

### Další vědecké aktivity

Organizační garant za Ústav Geotechniky konference Juniorstav za rok 2018, 2019 a 2020.

Komunikace s vědeckými pracovníky společnosti SÚRAO a účast na exkurzi do Podzemní výzkumné laboratoře Bukov.

## **ABSTRAKT**

V současnosti je v České republice vytipováno několik hlavních lokalit, na kterých se očekávají příznivé přírodní podmínky pro vybudování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Český koncept budování úložiště předpokládá jako hostitelské prostředí krystalinické horniny. Podstatou disertační práce je kombinované studium petrografických a fyzikálně-mechanických vlastností (skleroskopická tvrdost, pevnost v jednoosém a trojosém tlaku, pevnost v příčném tahu) krystalinických horninových typů (durbachit, granulit), vyskytujících se na dvou nejvíce favorizovaných lokalitách – Horka u Velkého Meziříčí a Kraví hora u Dolní Rožínky.

## **ABSTRACT**

The Czech deep repository development programme resulted in identification of several localities with favourable geological conditions. The Czech concept of a deep repository construction targets on crystalline host rocks. The dissertation focuses on combined petrographic and physico-mechanical properties (rebound hardness, uniaxial and triaxial compressive strength, indirect tensile strength) of crystalline rocks (durbachite, ganulite) from the most favoured localities – Horka near Velké Meziříčí and Kraví hora near Dolní Rožínka.