



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

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mgr. Dagmar Havlíčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

BRNO 2020

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.

Klíčová slova

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

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.

Keywords

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

Bibliografická citace VŠKP:

Mgr. Dagmar Havlíčková *Studium fyzikálně-mechanických vlastností krystalinických hornin ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů*. Brno, 2020. 94 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat hlavně školiteli doc. RNDr. Lukáši Krmíčkoví, Ph.D. za jeho pomoc, podmětné návrhy a náměty, vstřícný přístup a čas, který mi během vypracování dizertační práce věnoval. Velké díky patří také kolegům z Ústavu geotechniky Fakulty stavební VUT v Brně, kteří mi byli vždy nápomocni. Konkrétně děkuji Ing. Martinovi Závackému za jeho čas a péči při zhotovování zkušebních těles a pomoc v průběhu mechanických zkoušek a Ing. Heleně Brdečkové, Ph.D. za ochotné rady v průběhu celého studia. Velké díky patří také mému manželovi za jeho podporu a spolehlivou pomoc vždy, když jsem potřebovala.

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN.....	8
2.1 VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI HORNIN.....	8
2.1.1 HUSTOTA A OBJEMOVÁ HMOTNOST	8
2.1.2 IDENTIFIKACE MINERÁLNÍHO SLOŽENÍ	9
2.2 VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN.....	10
2.2.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST	11
2.2.2 PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU.....	14
2.2.3 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU (BRAZILSKÁ ZKOUŠKA)	15
2.2.4 TRIAXIÁLNÍ PEVNOST	17
3 PROBLEMATIKA HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ	19
4 STUDOVANÉ LOKALITY	22
4.1 HORKA.....	22
4.2 TŘEBÍČSKÝ MASIV.....	23
4.2.1 LOM KAMENNÁ.....	23
4.3 KRAVÍ HORA	25
4.4 STRÁŽECKÉ MOLDANUBIKUM.....	26
4.4.1 LOM HORNÍ BORY A VÝCHOZY GRANULITŮ V OKOLÍ HABŘÍ ..	28
5 PŘEDCHOZÍ STUDIUM FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HORNIN V OKOLÍ VYBRANÝCH LOKALIT	30
6 METODIKA	39
6.1 PETROGRAFICKÝ POPIS HORNIN	39
6.1.1 POLARIZAČNÍ A KATODOLUMINISCENČNÍ MIKROSKOPIE.....	39
6.1.2 KATODOLUMINISCENCE	39
6.1.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA	39
6.2 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU.....	40
6.2.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST	40

6.2.2 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA”)	40
6.2.3 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST	40
6.2.4 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST	43
6.3. PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU	44
6.3.1 PŘÍČNÁ TAHOVÁ PEVNOST („BRAZILSKÁ ZKOUŠKA”)	45
6.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST	45
7.1 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ DURBACHITU	47
7.2 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ GRANULITU	52
7.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU	56
7.3.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST	56
7.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU	58
7.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST	60
7.4 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU	64
7.4.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST	64
7.4.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU	66
7.4.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST	69
8 DISKUZE	71
9 ZÁVĚR	77
10 LITERATURA	79
11 SEZNAM OBRÁZKŮ	87
12 SEZNAM TABULEK	92

1 ÚVOD

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.

Data pro připravovanou disertační práci byla částečně získána v rámci projektů 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 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

Fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin představují základní charakteristiky, které jsou nezbytné pro stavební praxi (např. Yaşar a Erdoğan 2004; Altindag a Güney 2010; Petružálek et al. 2019 a další). Zjištění některých vlastností lze provést paralelně více metodickými postupy, a proto byla například v minulosti širokým kolektivem domácích autorů vypracována studie „Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin“ (Zavoral et al. 1987). Aktuálně platné normy ČSN EN-ISO stanovují některé fyzikálně-mechanické vlastnosti. Americkou asociací pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials – ASTM 1984, 1995, 2004) a Mezinárodní společností pro mechaniku hornin (International Society for Rock Mechanics – ISRM 1981, 2007, 2015) byly publikovány standardizace postupů v nadnárodním měřítku. Možnosti studia fyzikálně-mechanických vlastností krystalinických hornin přehledně shrnuje zahraniční knižní publikace Zanga a Stephanssona (2010).

V následujících podkapitolách jsou popsány vybrané vlastnosti hornin s ohledem na jejich užití v této práci. Pro podrobnější charakteristiku lze odkázat například na ucelenější práce kolegů z Ústavu Geotechniky FAST VUT v Brně – Horáka (2001) nebo Krmíčka (2015), podle kterých je uděláno shrnutí výbraných vlastností.

2.1 VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI HORNIN

Fyzikální vlastnosti hornin jsou projevem jejich hmoty a fází. Nejčastěji se tyto vlastnosti dělí na základní (hmotové), fyzikálně-chemické a hydrofyzikální (např. Horák et al. 2005).

2.1.1 HUSTOTA A OBJEMOVÁ HMOTNOST

Hustota je hmotnost objemové jednotky tuhé fáze horniny bez pórů a dutin. Častěji je stanovována tzv. objemová hmotnost, což je hmotnost všech součástí horniny (tuhé, plynné, popř. kapalné fáze). 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):

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

kde: m ... hmotnost vzorku [kg]

V ... objem vzorku [m³]

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 (Tab. 1).

Tab. 1 – Ukázka stanovení hodnot objemové hmotnosti pro horniny východní granitoidní zóny brněnského masivu. Upraveno z práce Hanáka a Horáka (1988).

Typ horniny	Objemová hmotnost [kg · m⁻³]
Granitoid zvětralý	2 460–2 580
Granitoid značně zvětralý	2 580–2 620
Granitoid středně až mírně zvětralý	2 620–2 660
Granitoid zdravý	2 660–2 690

2.1.2 IDENTIFIKACE MINERÁLNÍHO SLOŽENÍ

Fyzikální vlastnosti hornin jsou podmíněny strukturou, chemickým složením a vzájemným sepětím minerálních komponent. K přesné identifikaci minerálních fází a případného stupně jejich přeměny se dnes, kromě optické a katodoluminiscenční mikroskopie, běžně používá elektronová mikroskopie a mikroanalýza.

POLARIZAČNÍ A KATODOLUMINISCENČNÍ MIKROSKOPIE

K určování optických vlastností minerálů se tradičně používá polarizační mikroskop. Tato metoda využívá lineárně polarizované světlo, které kmitá v jedné rovině. Polarizaci vytváří filtry (polarizátor a analyzátor), umístěné v optické ose mikroskopu (např. Gregerová et al. 2002). Pro pozorování vzorků v polarizačním mikroskopu jsou z hornin zhotovovány horninové výbrusy o standardní tloušťce cca. 0,03 mm (MacKenzie et al. 1997). Plocha výbrusu umožňuje detailně pozorovat desítky až tisíce minerálů (dle zrnitosti horninového vzorku). Umístění řezu horninovým vzorkem pro účel zhotovení výbrusu se vždy volí co

nejvhodněji k orientaci a stavebnímu uspořádání minerálů (mikrostruktura) a také s ohledem na cíl studia těchto materiálů. Podle povahy chování světelného paprsku v kterékoliv krystalické fázi lze rozlišit minerály opticky izotropní a opticky anizotropní. U minerálů izotropních nedochází při průchodu světelného paprsku libovolným směrem k tzv. dvojlomu. Naopak u anizotropních minerálů při průchodu světelného svazku k dvojlomu dochází a tyto minerály se dále dělí na opticky jednoosé a dvojosé (Gregerová et al. 2002).

Polarizační mikroskopie může být efektivně doplněna o katodoluminiscenční mikroskopii. Princip katodoluminiscenční mikroskopie je založen na interakci proudu elektronů emitovaných wolframovým vláknem s povrchem vzorku, při níž můžeme pomocí různých katodoluminiscenčních barev pozorovat struktury, které nemusí být viditelné pomocí optické mikroskopie. Jedná se například o kompoziční zonalitu, strukturní defekty a prostorovou distribuci jednotlivých minerálních fází (např. Pagel et al. 2000; Götze 2012).

ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA

Skenovací elektronový mikroskop je přístroj využívající svazek vysokoenergetických elektronů, které při střetu s povrchem vybudují druhotné jevy nesoucí informace o morfologii, složení a krystalické struktuře (Reimer 1998). Pro podrobné pozorování mikrostruktur v petrografických výbrusech nebo na leštěných či přírodních površích mohou být použity buď elektrony odražené od povrchu vzorku (*back-scattered electrons* – zpětně odražené elektrony), nebo druhotné elektrony (*secondary electrons*), které byly vyzářeny povrchem vzorku. Pomocí zpětně odražených elektronů lze velice dobře studovat prostorové rozmístění minerálů horniny, kdežto druhotné elektrony umožňují zobrazit vnější morfologii.

Speciálním typem skenovacího elektronového mikroskopu pro analytické účely je elektronová mikrosonda (Obr. 1). Obvykle bývá vybavena energiově disperzním spektrometrem (EDS) a třemi či více vlnově disperzními spektrometry (WDS), sloužícími k prvkové mikroanalýze.

2.2 VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

Odpovědí hornin na působení vnějších sil jsou jejich mechanické vlastnosti (např. Parker 2003). Schopnost hornin odolávat porušení vyjadřuje jejich pevnost, zatímco schopnost hornin měnit pod zatížením tvar a objem určuje míra jejich přetvárnosti (Záruba a Mencl 1974). Mechanické vlastnosti můžeme dělit také na pevnostní, indexové, deformační

a reologické (např. Horák 2001; Horák et al. 2005; ISRM 2007). Následující podkapitoly se věnují stručnému popisu vybraných mechanických vlastností, které jsou v práci studovány.



Obr. 1: Ukázka elektronové mikrosondy CAMECA SX100. Foto: ugv.sci.muni.cz 2018.

2.2.1 SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST

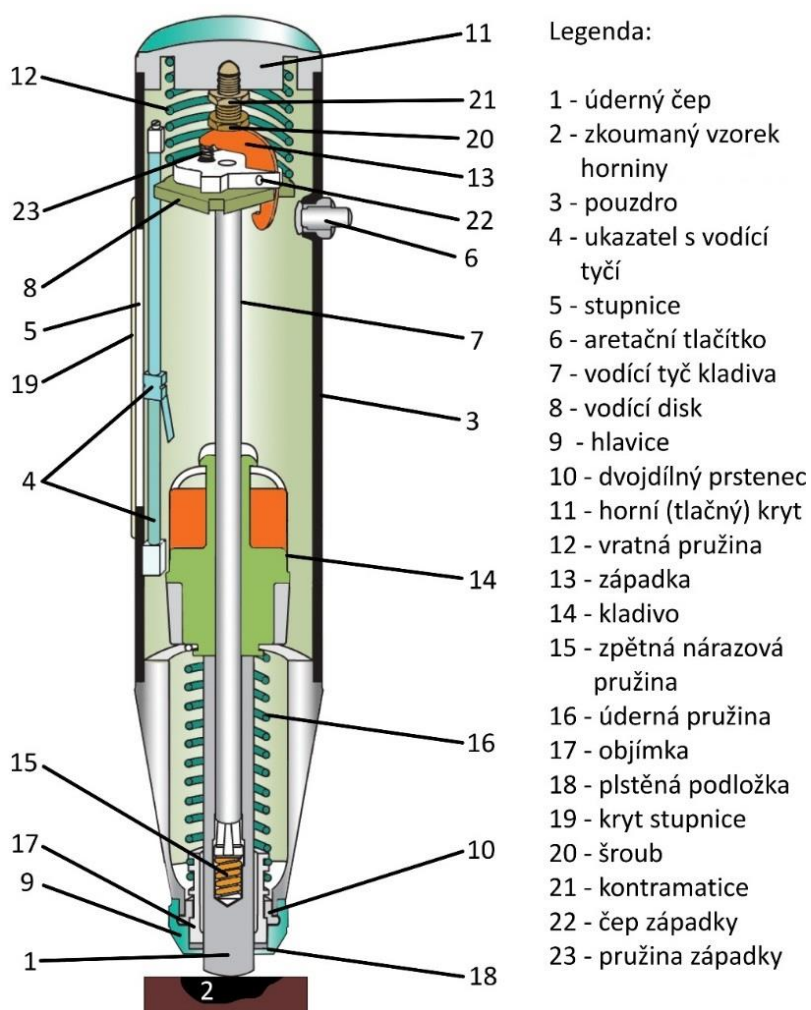
Skleroskopická tvrdost neboli vzpruživost je jedna z nejvíce známých a využívaných vlastností v mechanice hornin. Stanovuje se indexovou zkouškou, která je založena na pružném odrazu závaží (kladiva), jež dopadlo na zkoušené těleso z předepsané výšky, nebo které je vrženo na těleso energií vyvolanou pružinou zkušebního zařízení (Obr. 3). Fyzikální princip tohoto procesu je podrobně popsán v práci Hajna (2011). U testování hornin nárazovým kladívkem se jedná o nedokonale pružný náraz dvou těles, kde první těleso je vlastní závaží kladívka a druhé je pevná strana horniny. Při každém rázu vznikají v obou tělesech deformace, skrz které vznikají deformační síly. Princip měření skleroskopické tvrdosti pak spočívá ve srovnání energie před nárazem a po nárazu kladiva.



Obr. 2: Terénní studium skleroskopické tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka typu L.

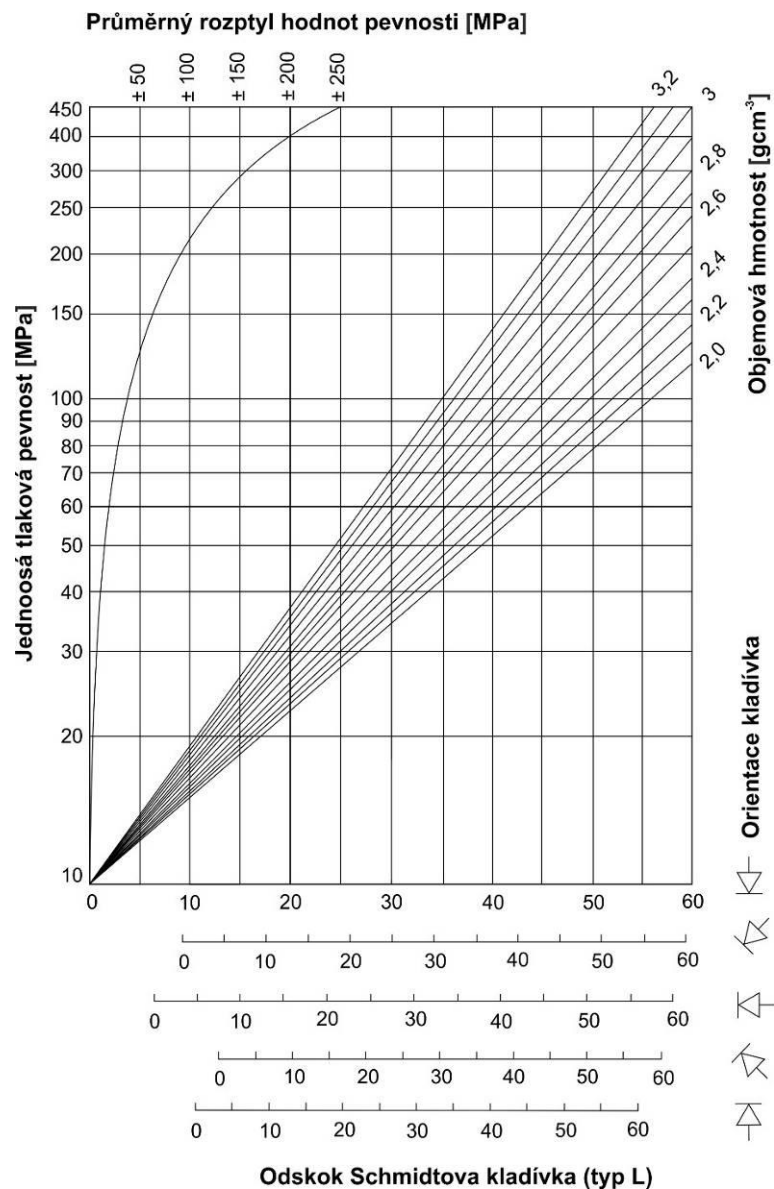
SCHMIDTOVO Kladívko

Skleroskopická tvrdost se v rámci této práce zjišťuje pomocí tzv. Schmidtova kladívka. Princip zkoušky je v měření velikosti odrazu závaží přístroje od zkoušeného povrchu, ze které se stanoví tvrdost (Aydin 2015). Kladívko se skládá z pouzdra, ve kterém se na vodící tyči pohybuje úderné závaží (kladívko). Kladivo je po uvolnění západky hnáno smrštěním pružiny na úderný čep, opírající se o povrch testovaného tělesa. Závaží se po dopadu na čep odrazí vlivem dynamické pružnosti horniny. Při tomto zpětném pohybu je společně se závažím unášen i ukazatel stupnice, který následně zůstává v odrazové výšce (Obr. 2 a 3).



Obr. 3: Podélný řez Schmidtovým kladívkem. Upraveno podle manuálu výrobce modelu H-2987 (Humboldt Mfg. Co., USA).

Zkouška Schmidovým kladívkem je nedestruktivní metoda používaná zejména pro zkoušení hotových betonových konstrukcí či sledování tvrdnutí betonu, a také pro testování hornin. Kladivo je vyráběno v několika variantách, přičemž se mezi sebou liší velikostí nárazové energie. V mechanice hornin se používají především typy L a N. Empiricky je možné ověřit existenci pozitivní korelace mezi hodnotami jednoosé tlakové pevnosti a hodnotami stanovenými pomocí Schmidova kladívka. Velikost tvrdosti naměřené Schmidovým kladívkem je navíc závislá na orientaci kladívka vůči vzorku i na objemové tíze horniny (Obr. 4).



Obr. 4: Korelační závislost mezi odskokem Schmidova kladívka typu L a jednoosou tlakovou pevností horniny. Překresleno podle Bieniawského (1984).

Schmidtovo kladívko typu L (*Leicht*) má nižší rázovou energii, a tím i malou aktivní zónu. Je vhodné zejména pro testování horninových vzorků v laboratoři. Nárazová energie kladiva typu L je rovna 1/3 základního typu N a má hodnotu 0,74 J. Při měření s tímto kladívkem je nutná pevná fixace horninového vzorku.

Schmidtovo kladívko typu N (*Normal*) je ideální pro terénní testování tvrdosti jednotlivých horninových bloků. Nárazová energie přístroje dosahuje hodnoty až 2,207 J. Při předpokladu, že je horninový masiv tvořen petrograficky jednotnou horninou, je možné terénním měřením vymežit oblasti obdobných mechanických vlastností. V terénu naměřené hodnoty odskoku Schmidtova kladívka typu N je nutné nejprve korigovat na vodorovný směr nárazu (Pavlík 1973).

2.2.2 PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU

Pevnost v jednoosém (prostém) tlaku je klíčový laboratorní parametr sledovaný v mechanice hornin (např. ASTM 1995; ISRM 2007). Tato pevnost odpovídá velikosti síly, kterou zkušební těleso snese při namáhání jednoosým tlakem. Jednoosá tlaková pevnost je zjišťována na pravidelných tělesech (hranol či válec) pomocí testovacího lisu (Obr. 5). Ideální zkušební těleso by mělo mít poměr výšky a šířky (štíhlostní poměr) mezi hodnotami 2 a 3. Těleso je při zkoušce namáháno jednoosým tlakem σ_1 , který se postupně zvyšuje až do porušení testovaného vzorku, kdy druhá dvě napětí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (Goodman 1989). Výslednou pevnost lze stanovit následovně (ČSN EN 1926:2000):

$$\sigma_c = \frac{F_{tlak}}{A} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

kde: F_{tlak} ... maximální osová síla v době tlakového porušení vzorku [N]

A ... počáteční průřezová plocha [cm^2]

S ohledem na mechanické vlastnosti hornin je třeba zmínit, že pevnost v jednoosém tlaku je sama o sobě klasifikací (Tab. 2).

Tab. 2 – Klasifikace hornin podle pevnosti v jednoosém tlaku podle ČSN EN ISO 14689-1:2004.

Termín	Polní identifikace	Jednoosá tlaková pevnost [MPa]
Extrémně měkká ^a	Lze vytvořit rýhy nehtem.	< 1
Velmi měkká	Rozpad po jednom úderu geologickým kladivem, lze škrábat nožem.	1 až 5
Měkká	Lze obtížně škrábat kapesním nožem, vzniká mělká jamka po jednom úderu špice geologického kladiva.	5 až 25
Středně pevná	Nelze škrábat kapesním nožem, vzorek může být rozbit jedním silným úderem geologického kladiva.	25 až 50
Pevná	Pro rozbití vzorku je nutný více než jeden úder geologickým kladivem.	50 až 100
Velmi pevná	Pro rozbití vzorku je nutné použít mnoha úderů geologickým kladivem.	100 až 250
Extrémně pevná	Vzorek může být geologickým kladivem pouze otlučený.	> 250

^a *Některé extrémně měkké horniny chovající se jako zeminy mohou být popsány jako zeminy podle ČSN EN ISO 14688-1:2003.*

2.2.3 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU (BRAZILSKÁ ZKOUŠKA)

Pro stanovení pevnosti v příčném tahu se v mechanice hornin nejčastěji používá tzv. „brazilská zkouška“ (Carneiro 1943). Jde o metodu, kdy je na zkušební těleso aplikováno zatížení ve dvou protilehlých liniích. Detailní popis této metody přináší ve své souborné publikaci autoři Li a Wong (2013).

Obecně lze konstatovat, že výstupy pevností v příčném tahu jsou srovnatelné s výsledky pevnosti v jednoosém tahu (Tab. 3, srov. Mellor a Hawkes 1971; Andreev 1991a, 1991b).

Tab. 3 – Srovnání výsledků pevností v příčném tahu s výsledky pevností v jednoosém tahu různých horninových typů (Li a Wong 2013 – upraveno).

Hornina	Pevnost v jednoosém tahu [MPa]	Pevnost v příčném tahu (brazilská zkouška) [MPa]	Poměr pevností v příčném a jednoosém tahu	Zdroj
Trachyt	13,72	12,00	0,87	Jaeger (1967)
Pískovec	3,59	3,72	1,04	Jaeger (1967)
Mramor	6,90	8,72	1,27	Jaeger (1967)
Granit	13,45	14,34	1,07	Mellor a Hawkes (1971)
Vápenec	5,86	6,21	1,06	Mellor a Hawkes (1971)
Pískovec	2,96 ± 0,51	7,8 ± 0,3	2,64	Pandey a Singh (1986)
Syenit	20,50	20,05	1,03	Andreev (1991a, 1991b)
Šedý sádrovec	1,75	1,99	1,14	Andreev (1991a, 1991b)
Bílý sádrovec	1,42	1,29	0,91	Andreev (1991a, 1991b)
Mramor	5,90 ± 2,66	6,90 ± 1,24	1,17	Efimov (2009)
Pískovec	6,49 ± 0,22	10,68 ± 0,7	1,65	Fuenkajorn a Klanphumesri (2011)
Mramor	6,33 ± 0,62	8,02 ± 0,25	1,27	Fuenkajorn a Klanphumesri (2011)
Vápenec	9,31 ± 0,65	10,9 ± 0,19	1,17	Fuenkajorn a Klanphumesri (2011)

Při zkoušce v příčném tahu je testovací těleso horniny namáháno mezi dvěma ocelovými čelistmi. V rámci tohoto tělesa (nejčastěji válcového tvaru), na které působí tlak čelistí, dochází k vektorovému rozkladu tlakové síly na sílu tahovou. Porušení tělesa nastává při překročení pevnosti v tahu, a to v předem dané rovině, vymezené spojnicí protilehlých zatěžujících čelistí. Podle tvaru testovacích vzorků může mít brazilská zkouška několik

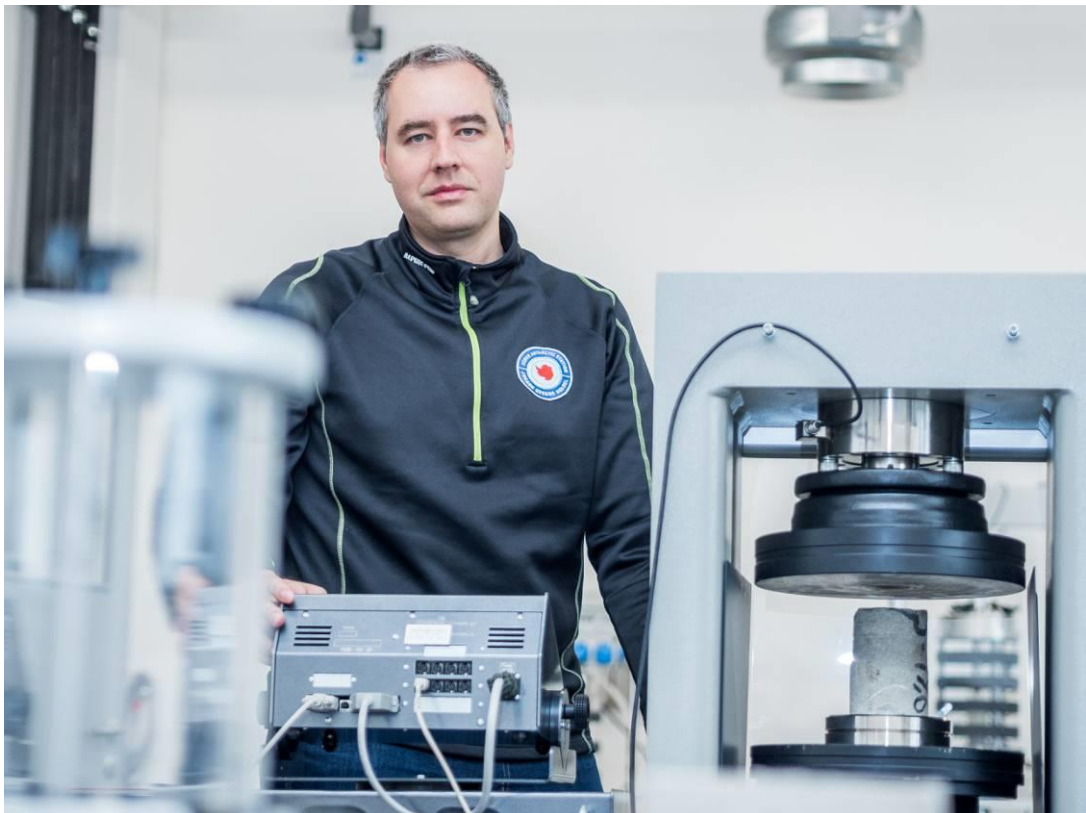
modifikací. Výpočet pevnosti v příčném tahu pro válcovité zkušební těleso určuje následující vzorec (ČSN EN 12390-6:2001):

$$\sigma_t = \frac{2F_{tah}}{\pi dt} [\text{MPa}] \quad (3)$$

kde: F_{tah} ... maximální osová síla dosažená při porušení vzorku příčným tahem [N]

d ... průměr válcového zkušebního tělesa [mm]

t ... tloušťka válcového zkušebního tělesa [mm].



Obr. 5: Příprava na testování pevnosti v jednoosém tlaku pomocí laboratorního lisu ADVANTEST 9 ROCK.

2.2.4 TRIAXIÁLNÍ PEVNOST

Zatímco jednoosá tlaková pevnost charakterizuje mechanické vlastnosti horniny v jejím aktuálním stavu, triaxiální pevnost ji popisuje ve stavu, v němž by hornina teoreticky mohla být v určité hloubce v rámci horninového masivu. Díky této zkoušce se dá lépe předvídat chování hornin v hloubkovém profilu za účelem plánování podzemních staveb. Při

této metodě není předurčená deformační plocha, takže se vzorek poruší vždy v nejslabším místě. Dále díky trojosé napjatosti dochází ke zpevnění materiálu a na rozdíl od prosté tlakové zkoušky, kde se většina hornin porušuje křehce, mohou se zde více rozvinout plastické deformace. Měření triaxiální pevnosti je velmi užitečná metoda pro mechaniku hornin a navzdory náročné přípravě a nákladnému měřicímu zařízení se stále více využívá.

Požadavky na rozměry a tvar zkušebního tělesa se víceméně shodují se zkouškou v prostém tlaku. Výška zkušebního tělesa je doporučována opět jako dvoj- až trojnásobek průměru a průměr se volí dle použitého jádrového vrtáku. Doporučován je vrták typu NX, jehož vnitřní průměr je 54 mm. Nejmenší rozměr tělesa by měl být alespoň desetinásobek délky největšího zrna zkoumaného vzorku horniny a dále je potřeba dbát na hladkost a rovinnost stěn zkušebního tělesa (Ulusay a Hudson 2007).

3 PROBLEMATIKA HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

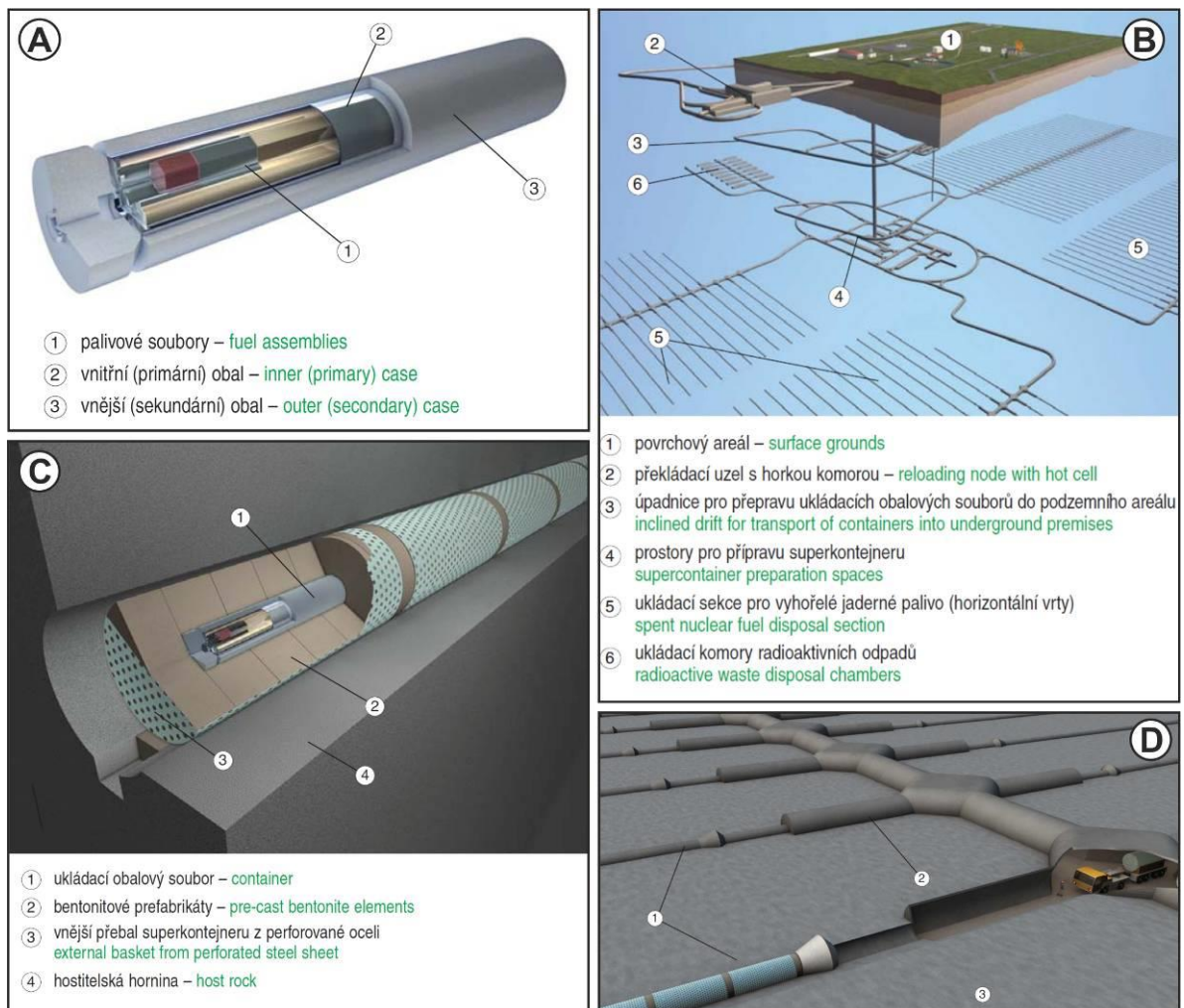
Stejně jako každá lidská činnost, také výroba jaderné energie a jiné průmyslové procesy produkují odpad. V České republice je již několik let Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) vytipováno v Českém masivu sedm perspektivních lokalit pro vybudování hlubinného úložiště vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva a další dvě nedávno přibyly 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. 6), 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. Podle geologických možností daného státu, tedy dostatečných objemů hostitelské horniny (v ČR se předpokládají krystalinické horniny podobně jako ve Finsku, Švédsku a Japonsku; např. ve Francii a Švýcarsku jsou zvažovány jílovcové horniny; IAEA 2009) a legislativních požadavků, vznikla modifikovaná technická řešení hlubinného úložiště pro ČR (SÚRAO 2016c; SÚRAO 2018b,c).

Finsko je první zemí na světě, která dokončí budování finálního hlubinného úložiště radioaktivního odpadu v krystalinických horninách, a tak lze využít zkušeností z finského projektu pro optimalizaci postupů při plánování a budování tuzemského hlubinného úložiště. Z tohoto důvodu došlo k podepsání memoranda o spolupráci s generálním ředitelem zhotovitelské finské společnosti Posiva Oy v Praze v roce 2015 (protext.cz 2015), se kterou již v minulosti proběhly konzultace ohledně výběru lokality a komunikace s dotčenými obcemi.

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).

Pokud jde o Švédsko, tak to je s výběrem finální lokality rozhodnuto rovněž. Jedná se 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. 6: 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. 7). Materiál z horninových typů vyskytujících se na těchto lokalitách je předmětem studia této disertační práce. 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 nepochází 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 4).

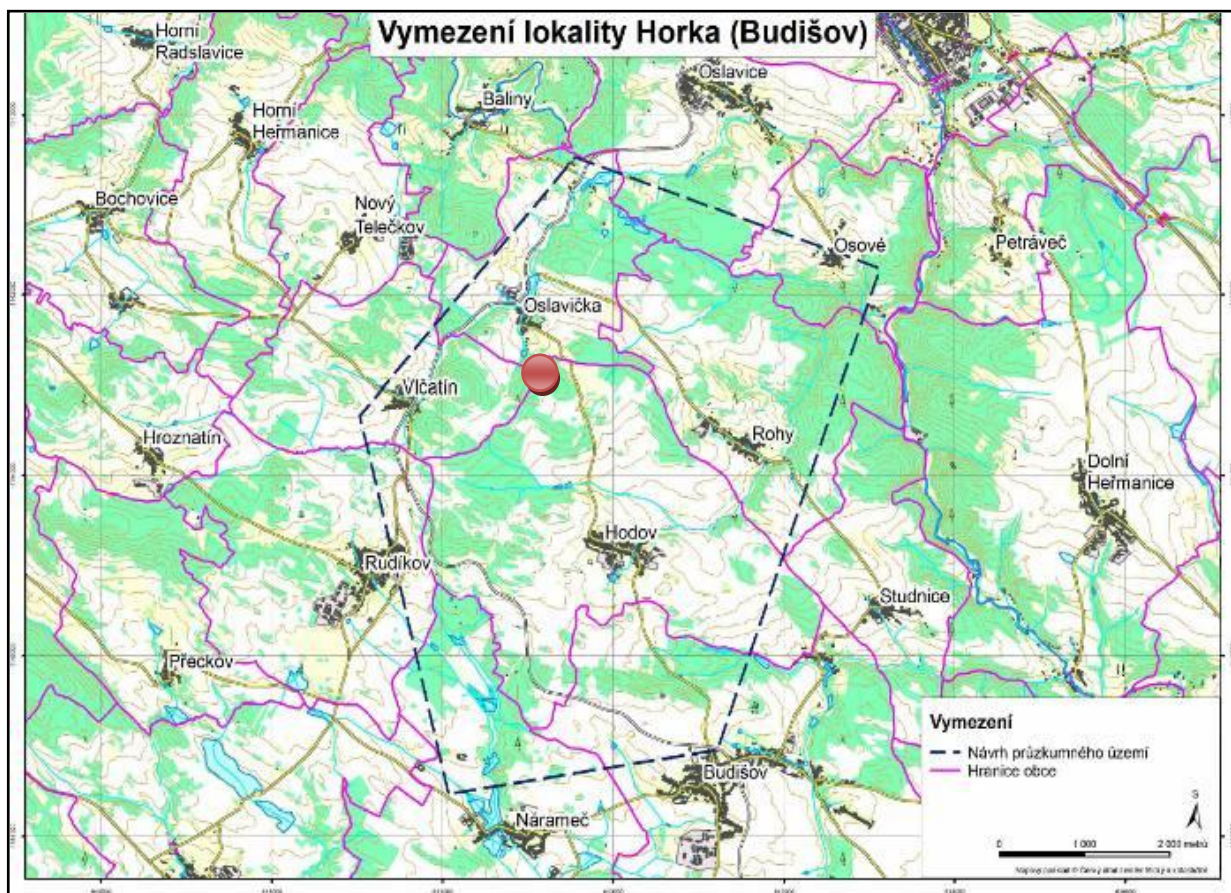


Obr. 7: Hlavní uvažované lokality pro výstavbu hlubinného úložiště mimo lokalit v bezprostředním okolí jaderných elektráren. Zdroj: Český rozhlas (2016).

4 STUDOVANÉ LOKALITY

4.1 HORKA

Lokalita byla pojmenována podle Hodovské Horky (581 m n. m. – červený bod na mapě na Obr. 8), která je druhým nejvyšším bodem průzkumného území pro budoucí úložiště. Toto území SÚRAO vymezi jako nepravidelný pětiúhelník zasahující do devíti obcí s plochou cca 28 km² a obec Hodov tvoří jeho pomyslný střed (Obr. 8). Území spadá do okresu Třebíč v kraji Vysočina. Geologicky území náleží třebíčskému masivu.



Obr. 8: Topografická situace lokality Horka (Holub et al. 2012).

4.2 TŘEBÍČSKÝ MASIV

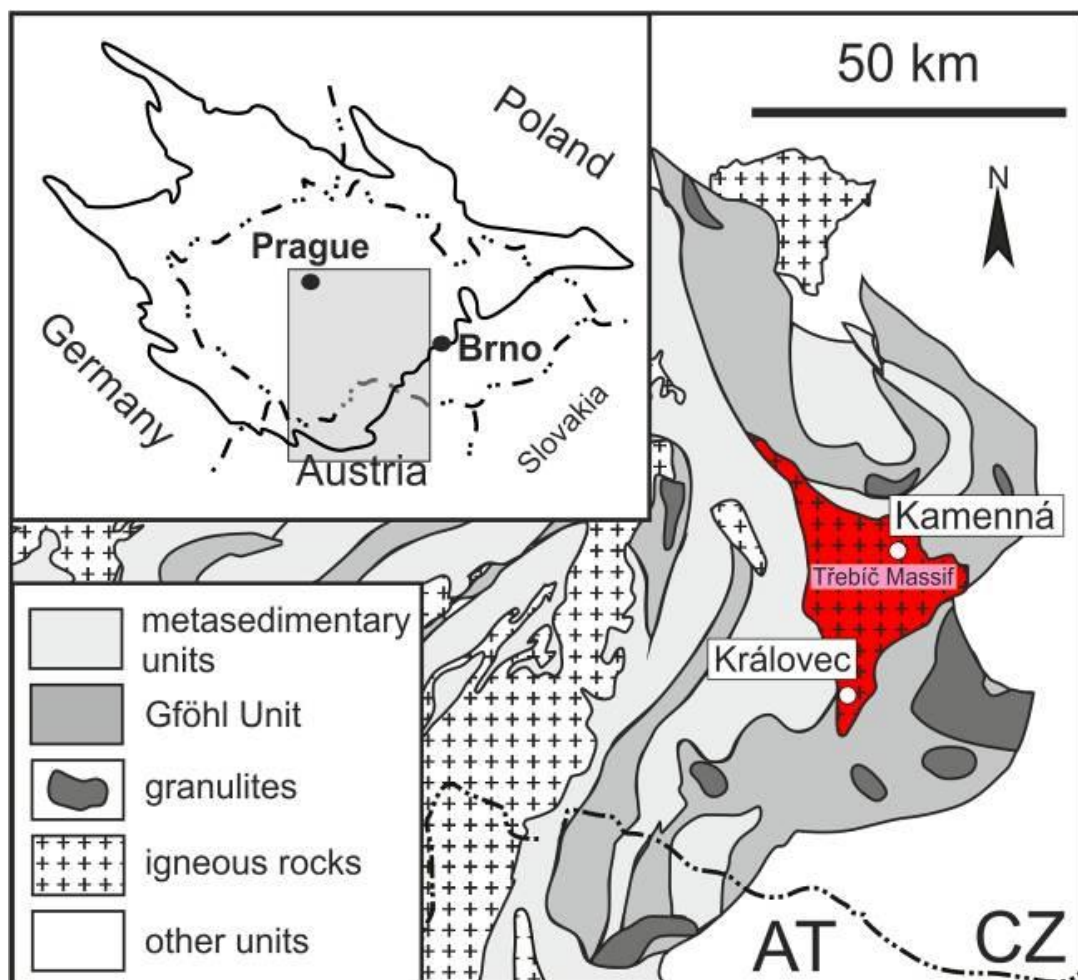
Třebíčský masiv je z geologického hlediska součástí moldanubické jednotky Českého masivu (Obr. 9) a je pozdně variského stáří (~335 Ma). Jeho vmístění mezi pestrá a gřohlskou skupinu moldanubika souviselo s rychlým výstupem části zemské kůry ve spodním karbonu (Kotková et al. 2010). Jedná se o největší těleso durbachitů (500 km²) 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). Zejména v severní části masivu, kde nejsou horniny tolik tektonicky porušené, jsou těženy jako surovina pro kamenickou výrobu (např. lom Kamenná).

4.2.1 LOM KAMENNÁ

Lokalita, kde autorka odebírala čerstvou surovinu vhodnou ke studiu, leží 7,8 km vzdušnou čarou od Hodovské Horky. Jedná se o aktivní třítážový 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. 10).



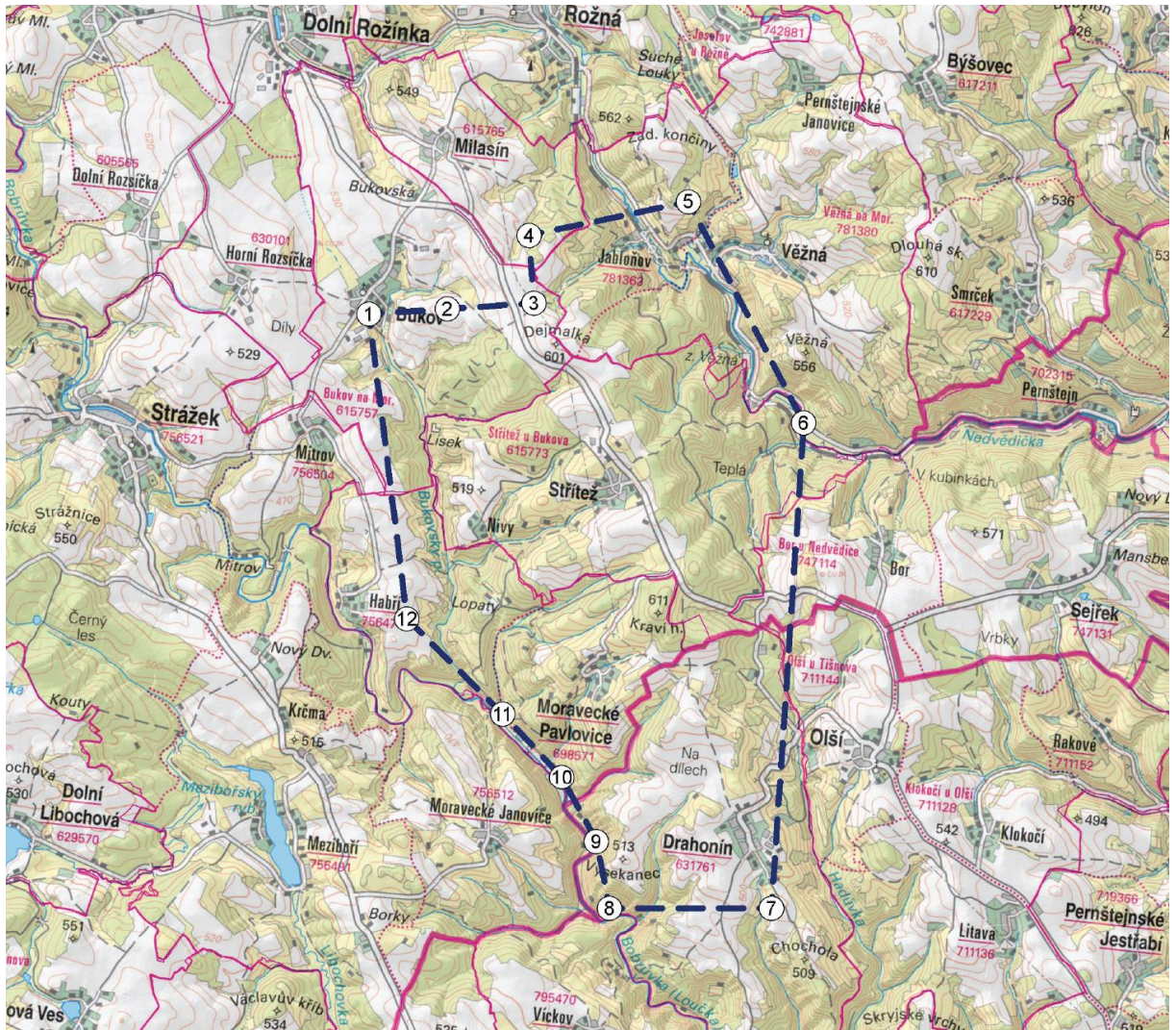
Obr. 9: Poloha třebíčského masivu v jv. části Českého masivu s vyznačením polohy lomu Kamenná a referenční lokality lomu Královec (viz kapitola 5) – Šujanská et al. (2018).



Obr. 10: Bloky částečně opracovaných durbachitů (syenitů) těžených v lomu Kamenná.

4.3 KRAVÍ HORA

Tato lokalita dostala svůj název podle nejvyšší kóty Kraví hora (611 m n. m.) v rámci průzkumného území ve tvaru dvanáctiúhelníku (Obr. 11) s rozlohou cca 17 km². SÚRAO vymeziilo tento prostor zahrnující 8 obcí, z nichž pomyslný střed je v obci Strítěž (Obr. 11).



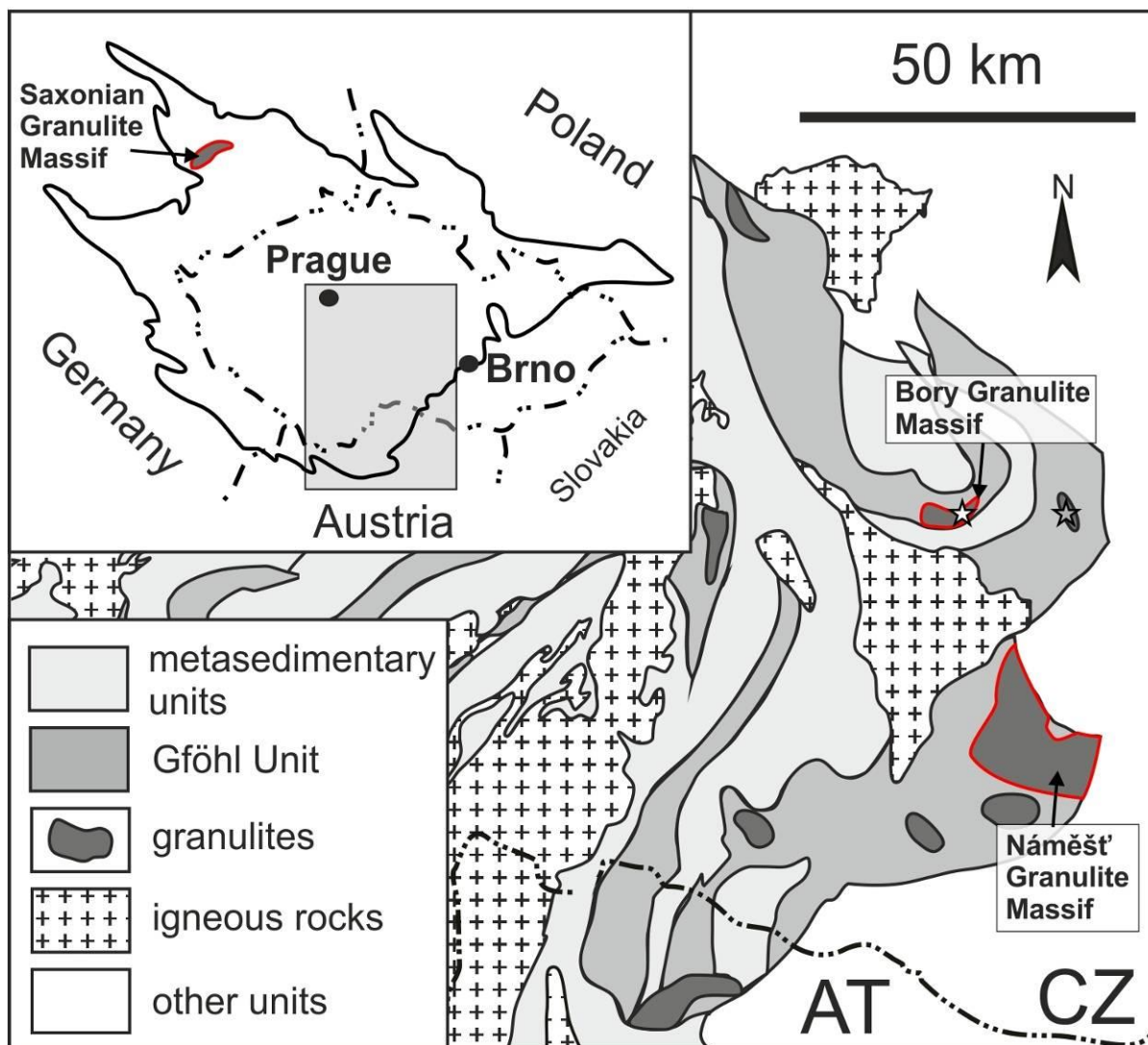
Obr. 11: Topografická situace na lokalitě Kraví hora (SÚRAO 2018a).

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.

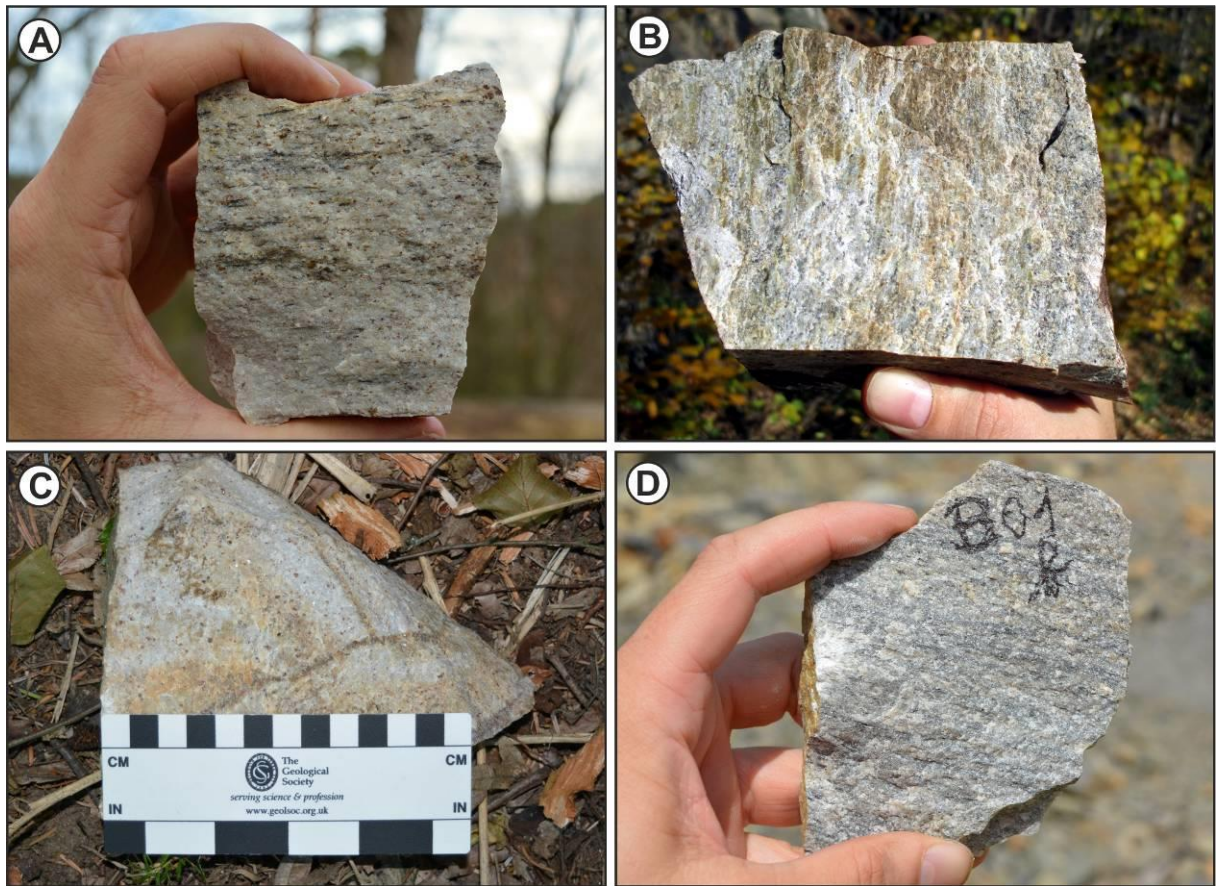
4.4 STRÁŽECKÉ MOLDANUBIKUM

Strážecké moldanubikum představuje geologickou jednotku vystupující severně od třebíčského masivu (Obr. 12). Podloží lokality Kraví hora je tvořeno přeměněnými horninami – granulity a migmatity, představující těleso čočkovitého 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.

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. 12) 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. 13). Granulity z Českého masivu nověji charakterizovali např. Rötzler a Romer (2001), O'Brien (2006), Kotková (2007) nebo Sagawe et al. (2016). Tato vysokotlaká a vzácně těž mikrodiamantonosná hornina (e.g., Kotková et al. 2011), která má potenciál zaznamenat teplotně-tlakové podmínky svého vzniku hluboko v zemské kůře, byla zvolena jako jeden z nejslibnějších horninových typů pro konstrukci hlubinného úložiště jaderného odpadu v České republice (Kováčik at al. 2016; Bukovská et al. 2019; SÚRAO 2016b).



Obr. 12: 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 (Kraví hora) pro konstrukci podzemního úložiště jaderného odpadu je označena šedou hvězdičkou. Upraveno podle Krmíčka et al. (2011) a Havlíčkové et al. (2019).



Obr. 13: Příklad felsických (světlých) granulitů z Českého masivu. **A** – Vzorek granulitu z Justiho typové lokality – Lamberk v náměšťském granulitovém masivu; **B** – Charakteristický granulit ze saského granulitového masivu (lokality Sachsenburg); **C** – Zvětralý granulit z oblasti Kraví hory, jedné z potenciálních lokalit pro vybudování podzemního úložiště jaderného odpadu; **D** – Úlolek granulitu ze zkoumaných větších bloků vzorkovaných v aktivním kamenolomu Horní Bory (viz kapitola 4.4.1). Havlíčková et al. (2019).

4.4.1 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. 14B, 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 Bobruvka v katastru obce Habří (Obr. 14A).



Obr. 14: A – Terénní odběr vzorků granulitů u potoka Bobrůvka, obec Habří.; B, C – Granulity odkryté v lomu v Horních Borech. Foto: L. Krmíček.

5 PŘEDCHOZÍ STUDIUM FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HORNIN V OKOLÍ VYBRANÝCH LOKALIT

V rámci podzemního výzkumného pracoviště (PVP) Bukov jsou prováděny experimentální výzkumy *in-situ* a získávány tak poznatky pro plánované budování úložiště. PVP Bukov je navíc situováno v těsné blízkosti uvažované lokality Kraví hora. Obec Bukov spadá do sz. okraje průzkumného území této lokality (Obr. 11 bod 1) a PVP Bukov, jehož výstavba byla zahájena v roce 2013, je realizováno v jižním křídle uranového ložiska Rožná. Důlní díla pracoviště jsou situována na 12. patře jámy Bukov-1, v hloubce cca 600 m pod povrchem. Výstavba PVP Bukov byla dokončena v roce 2016 a následně zde započaly laboratorní a terénní práce (Souček 2016, Souček et al. 2017). Nejnovější studii podloží PVP Bukov společně s jeho 3D vizualizací přináší práce Bukovské at al. (2019).

Horninový masiv v oblasti PVP Bukov je tvořen poměrně monotónním komplexem metamorfovaných hornin, reprezentovaným různě intenzivně migmatizovaným petrografickým sledem biotitických rul a migmatitů, přes amfibolické, amfibol-biotitické ruly až po amfibolity. Vzácněji byly zastíženy polohy vápenato-silikátových hornin (erlánů) a drobné vložky amfibolických nebo slídnatých pegmatitů. Místy je na PVP Bukov patrná mylonitizace či katakláza zastížných horninových sekvencí, které mohou být také v různé míře postiženy sekundárními přeměnami, jako jsou sericitizace, kaolinizace, hematizace a lokálně také projevy draselné metasomatózy nebo epidotizace.

I když jsou kóta Kraví hora a PVP Bukov od sebe vzdáleny cca 4 km a vystupují zde odlišné typy hornin, jsou výsledky experimentálních výzkumů na PVP Bukov velmi důležité, protože zohledňují chování hornin v reálném stavu v hloubce budoucího úložiště. Shrnutí hlavních výsledků studia mechanických vlastností je uvedeno v Tab. 4. Obecně lze z předchozích studií formulovat tyto závěry:

- 1) Většina testovaných hornin vykazuje průměrné tlakové pevnosti (UCS) v rozmezí cca 130–180 MPa a lze je tak zařadit mezi třídy hornin s vysokou až velmi vysokou pevností.
- 2) Poměr modulů přetvárnosti a pružnosti je možno považovat za jeden z ukazatelů anizotropie hornin. U hornin s výraznou foliační stavbou se hodnoty tohoto poměru zpravidla pohybují v rozmezí 0,80–0,90, u hornin bez zjevné plošně paralelní stavby jsou hodnoty poměru obecně vyšší (0,95–0,99).

- 3) Anizotropní chování se projevuje především u tahových pevností, které reagují na strukturu hornin citlivěji než např. pevnosti tlakové. Pevnost v příčném tahu, analyzovaná kolmo na foliaci, dosahuje často polovičních hodnot než u směru paralelního s duktilní stavbou.
- 4) Hodnoty pórovitosti se v závislosti na velikosti vzorku pohybují v rozmezí 0,17–0,43 %. Vzhledem k laboratorně stanoveným hodnotám koeficientu filtrace lze horniny v neporušeném stavu charakterizovat jako nepatrně propustné.
- 5) Z vyhodnocení parametru RQD („*Rock Quality Designation*”) vyplývá, že průměrná kvalita horninového masivu se nalézá v kategorii „dobrá”, průměrné hodnoty tohoto parametru se pohybují mezi 70–80 %. V oblastech bez tektonických poruch je výrazně zastoupena i kategorie „výborná” (RQD 90–100 %), naopak ve vrtech, procházejících výraznější tektonikou, dosahuje RQD hodnot pouze kolem 50 %, což odpovídá kategorii „střední” až „nízké”.
- 6) Z naměřených hodnot modulů přetvárnosti získaných *in-situ* lze konstatovat, že tyto hodnoty jsou nejčastěji zastoupeny v intervalu 15 až 20 GPa, u vrtu S-7 pak 10 až 15 GPa.
- 7) Zjištěné směry větší hlavní horizontální složky napětí jsou přednostně orientovány ve směru S–J až SSV–JJZ. Hodnoty minimálního horizontálního napětí se pohybují v rozmezí 10–17 MPa, maximální horizontální napětí se pohybuje v rozmezí 16,5–31 MPa.

Z výše uvedených zjištění Souček (2016) a Souček et. al. (2017) vyvozují, že se v oblasti PVP Bukov jedná o stabilní masiv s vysokou pevností a velmi nízkou propustností základních prvků – hornin. Nespojivosti v masivu představují tektonické poruchy a pukliny, které významně ovlivňují pevnostní, deformační a filtrační charakteristiky prostředí *in-situ*. Zásadním rysem sledovaného horninového masivu je stavební anizotropie metamorfovaných hornin, ovlivňující konkrétní hodnoty jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Svou stavbou a vlastnostmi umožňuje studovaný horninový masiv realizaci široké škály experimentů plánovaných k získání poznatků důležitých pro definitivní volbu podzemního úložiště vysoceaktivních odpadů v ČR.

Tab. 4 – Střední hodnoty vybraných mechanických vlastností hornin na PVP Bukov. Převzato ze Součka et al. (2017).

Property	biotite gneiss to stromatic migmatite	biotite – amphibole gneiss	amphibolite	altered rocks (mainly gneisses)
Uniaxial compressive strength [MPa]	126	169	174	98
Young's modulus [GPa]	38	50	50	37
Poisson's ratio [-]	0.13	0.15	0.16	0.18
Splitting tensile strength [MPa] - tensile load \perp to foliation	9.4	12.0	9.2	6.7

Mechanické vlastnosti granulitu z Kraví hory byly publikovány v novější studii Petružálka (2017). Autoři studovaný materiál odebírali v Moravských Pavlovicích (N49°25'00.9" E16°15'09.6"), tedy z jz. okraje území vymezeného úřadem SÚRAO (viz Obr. 11 v kapitole 4.3) v dostupných povrchových výchozech. Zkušební tělesa ve formě válců o průměru 50 mm byla vyvrtána z odebraných bloků. Naměřená data ze zkoušek v prostém tlaku jsou shrnuta v Tab. 5. Fyzikální vlastnosti studovaných hornin jsou uvedeny v Tab. 6. Směrodatné odchylky pro nasycenou a suchou objemovou hmotnost byly menší než 0,02 g.cm⁻³. Směrodatné odchylky pro specifickou objemovou hmotnost nepřesahují 0,005 g.cm⁻³ (Petružálek 2017).

Tab. 5 – Výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granulitu z lokality Kraví hora (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval [MPa]	Pevnost [MPa]	
Kraví hora granulit	KH41	4-329/56	0	Of	101.38	50.38	52.94	21.57	0.23	32.35	48.6	97.0	242.7
	KH51	5-229/34	0	Of	101.48	50.45	48.17	20.46	0.18	24.88	47.3	94.7	236.9
	KH52A	5-229/34	0	Of	102.45	49.02	48.78	20.71	0.18	25.24	40.7	81.6	203.8
	KH53B	5-229/34	90	90f	101.37	50.34	58.83	24.2	0.22	34.47	44.3	88.5	221.1
	KH61	6-310/50	45	45f	84.3	50.38	40.13	17.37	0.16	19.39	34.5	68.9	172.3
							49.8±6.1	20.9±2.2	0.19±0.03	27.3±5.5			215.3±25.4

Tab. 6 – Fyzikální vlastnosti granulitu z lokality Kraví hora (Petružálek 2017). Suchá objemová hmotnost ρ_{DRY} , nasycená objemová hmotnost ρ_{SAT} , specifická objemová hmotnost ρ_{SPEC} , celková pórovitost N_C a efektivní pórovitost N_{EF} .

lokality	typ horniny	ρ_{SAT} [g/cm ³]	ρ_{DRY} [g/cm ³]	ρ_{SPEC} [g/cm ³]	N_C [%]	N_{EF} [%]
Kraví hora	granulit	2,662	2,655	2,692	1,37	0,75

Podle vztahů uvedených na dalších řádcích byly z naměřených rychlostí seismických vln (v_p rychlost podélné vlny, v_s rychlost příčné vlny) a suché objemové hmotnosti (ρ_{DRY}) spočteny dynamické elastické parametry: Youngův modul E_d , smykový modul μ_d , objemový modul K_d a poissonův poměr ν_d (Petružálek 2017).

$$E_d = \frac{\rho_{DRY} v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad \nu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (4)$$

$$\mu_d = \rho_{DRY} v_s^2 \quad K_d = \rho_{DRY} (v_p^2 - 4/3 v_s^2)$$

Všechny elastické parametry uvedené ve zprávě Petružálka (2017) jsou počítány za předpokladu, že testovaná hornina představuje homogenní izotropní prostředí. Výsledky rychlosti seismických vln a z nich vypočtené dynamické moduly jsou sumarizovány v Tab. 7. Vzhledem k tomu, že granulit z Kraví hory je viditelně strukturně anizotropní, bylo by nezbytné k popisu jeho elastického chování více než dvou nezávislých elastických parametrů, které jsou dostatečné v případě izotropního prostředí. Pro jejich stanovení by ovšem bylo nezbytné provést ultrazvukové prozařování ve větším počtu nezávislých směrů (Petružálek 2017).

Tab. 7 – Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem \pm je směrodatná odchylka. Vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C. Převzato z práce Petružálka (2017).

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	v_P	v_S	ρ_{DRY}	E_d	μ_d	ν_d	K_d
			[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
Kraví hora	granulit	10	4.049 ± 0.457	2.450 ± 0.292	2.655 ± 0.007	38.9 ± 8.7	16.2 ± 3.7	0.21 ± 0.04	22.5 ± 5.6

V následující tabulce (Tab. 8) jsou znázorněny výsledky triaxiálního testování granulitu z lokality Kraví Hora, přičemž za průměrnými hodnotami je vždy za znaménkem \pm uvedena směrodatná odchylka. Testované zkušební tělesa válcového průměru měly rozměr 100 × 50 mm. Plášťový tlak byl 13 MPa, což odpovídá litostatickému tlaku v hloubce úložiště (cca 500 m).

Na diskových zkušebních tělíscích o výšce 30 mm a průměru 50 mm byly rovněž provedeny zkoušky v příčném tahu (Tab. 9). Zkoušky byly realizovány na vysušených vzorcích, sušení probíhalo 24 hodin při teplotě 105 °C (Petružálek 2017).

Tab. 8 – Výsledky triaxiálních zkoušek granulitu z Kraví Hory (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval [MPa]		Pevnost [MPa]
Kraví hora granulit	KH42	4-329/56	0	0f	101.3	50.38	45.92	19.43	0.18	24.01	61.0	122.0	304.9
	KH43	4-329/56	0	0f	100.51	50.37	41.64	17.37	0.2	23	56.3	112.6	281.4
	KH54A	5-229/34	0	0f	100.23	50.36	60.31	24.76	0.22	35.64	74.0	148.0	369.8
	KH55	5-229/34	0	0f	101.4	50.37	57.41	24.21	0.19	30.44	66.5	133.1	332.8
	KH62	6-310/50	45	45f	98.18	50.39	46.73	19.79	0.18	24.39	52.0	104.1	260.1
							50.4 ± 7.2	21.1 ± 2.9	0.19 ± 0.01	27.5 ± 4.8			309.8 ± 38.6

Tab. 9 – Výsledky testování granulitů v příčném tahu pomocí tzv. brazilské zkoušky a porušené vzorky po této zkoušce (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	Fmax [kN]	BTS [MPa]	BTS [MPa]	DTS [MPa]
Kraví hora granulit	KH41	4-329/56	10	-	50.29	32.02	30.2	11.9		
	KH42	4-329/56	0	-	50.35	32.36	28.5	11.1		
	KH51	5-229/34	85	-	50.40	32.73	27.7	10.7	10.5 ± 1.0	9.5 ± 0.9
	KH52	5-229/34	80	-	50.42	31.33	24.3	9.8		
	KH62	6-310/50	20	-	50.38	33.67	23.8	8.9		



Pokud jde o druhou uvažovanou lokalitu Horka, tak práce Petružálka (2017), stejně jako u granulitu z Kraví hory, poskytuje data fyzikálně-mechanických vlastností durbachitu. Lokalita povrchového odběru vzorků durbachitu je v práci Petružálka (2017) označena jako Oslavička (souřadnice N49°20'16.0" E15°59'10.0"). Protože je metodika podrobněji rozebrána již u výsledků studia granulitů, v následujících tabulkách jsou pouze stručně shrnuty výstupy studia zájmových vlastností durbachitů (Tab. 10 až 14).

Tab. 10 – Fyzikální vlastnosti durbachitu (Petružálek 2017). Suchá objemová hmotnost ρ_{DRY} , nasycená objemová hmotnost ρ_{SAT} , specifická objemová hmotnost ρ_{SPEC} , celková pórovitost N_C a efektivní pórovitost N_{EF} .

lokality	typ horniny	ρ_{SAT} [g/cm ³]	ρ_{DRY} [g/cm ³]	ρ_{SPEC} [g/cm ³]	N_C [%]	N_{EF} [%]
Horka	durbachit	2,728	2,712	2,789	2,77	1,66

Tab. 11 – Výsledky zkoušek v prostém tlaku, durbachit z lokality Horka (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval [MPa]		Pevnost [MPa]
Horka durbachit	HO11	1-184/60	-	-	100.75	49.61	20.5	9.01	0.14	9.45	15.8	31.6	79.0
	HO12	1-184/60	-	-	100.16	49.47	21.03	9.28	0.13	9.55	16.2	32.5	81.1
	HO21	2-218/85	-	-	101.32	49.26	12.25	5.46	0.12	5.39	12.6	25.1	62.8
	HO23A	2-218/85	-	-	100.8	49.46	18.77	7.04	0.33	18.64	12.0	24.0	60.1
	HO32	3-276/86	-	-	101.27	49.31	26.88	11.33	0.19	14.29	17.1	34.2	85.5
							19.9 ± 4.7	08.4 ± 2.0	0.18 ± 0.08	11.5 ± 4.6			73.7 ± 10.3

Tab. 12 – Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem ± je směrodatná odchylka; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C (Petružálek 2017).

lokality	typ horniny	počet zkoušek	vP [km/s]	vS [km/s]	ρ_{DRY} [g/cm ³]	Ed [GPa]	ud [GPa]	vd	Kd [GPa]
Horka	durbachit	10	3.725 ± 0.328	2.143 ± 0.138	2.712 ± 0.021	31.3 ± 4.5	12.5 ± 1.7	0.25 ± 0.03	21.3 ± 4.9

Tab. 13 – Výsledky triaxiálních zkoušek durbachitu z Horky (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval [MPa]		Pevnost [MPa]
Horka durbachit	HO13	1-184/60	-	-	100.92	49.64	34.88	13.72	0.27	25.41	30.6	61.2	153.1
	HO14	1-184/60	-	-	101.28	49.47	32.17	12.27	0.31	28.31	29.5	59.1	147.6
	HO24	2-218/85	-	-	100.78	49.42	29.39	11.7	0.26	20.08	27.5	55.1	137.8
	HO31	3-276/86	-	-	100.47	49.27	36.02	14.59	0.23	22.56	30.8	61.4	153.7
	HO33	3-276/86	-	-	101.1	49.4	40.59	16.37	0.24	25.99	34.1	68.4	170.9
							34.6 ± 3.8	13.7 ± 1.7	0.26 ± 0.03	24.5 ± 2.9			152.6 ± 10.8

Tab 14 – Výsledky testování granulitů v příčném tahu pomocí tzv. brazilské zkoušky a porušené vzorky po této zkoušce (Petružálek 2017).

lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	Fmax [kN]	BTS [MPa]	BTS [MPa]	DTS [MPa]
Horka durbachit	HO11	1-184/60	-	-	49.63	32.61	9.2	3.6	3.4 ± 0.5	3.1 ± 0.4
	HO12	1-184/60	-	-	49.48	32.76	9.4	3.7		
	HO21	2-218/85	-	-	49.36	33.05	7.6	3.0		
	HO22	3-276/86	-	-	49.38	31.90	6.9	2.8		
	HO31	3-276/86	-	-	49.22	31.37	9.7	4.0		



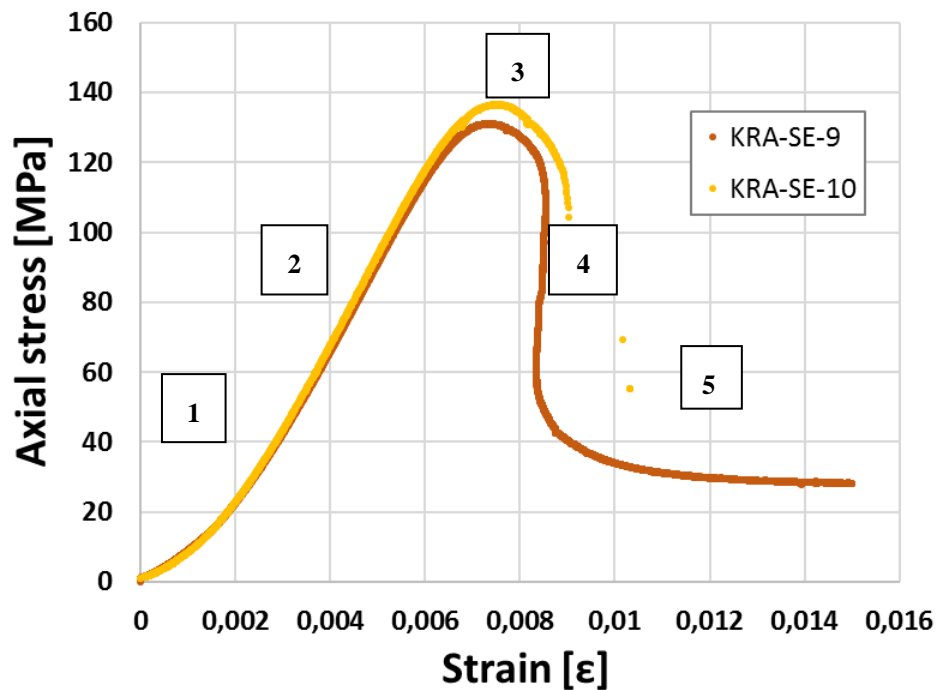
V širším okolí lokality Horka lze ke srovnání využít data ze studia fyzikálně-mechanických vlastností hornin třebíčského masivu, která publikoval Krmíček (2016), Krmíček et al. (2017) a Krmíček a Závacký (2017). Práce se obecně zabývají vlivem mafických mikrogranulárních enkláv dioritového složení uzavřených v durbachitech na mechanické vlastnosti kompozitního geomateriálu hornina–enkláva z lomu Kamenná a Královec. Lokalita Královec představuje činný lom, který je situován v obci Příštpo asi 2 km jv. od Jaroměřic nad Rokytnou. Tato lokalita je od lokality Kamenná vzdálena cca 35 km (Obr. 9). Za účelem zjištění pevnostních charakteristik jednotlivých složek kompozitního geomateriálu byly provedeny různé série laboratorních testů. Výsledky překvapivě ukázaly, že enklávy a dokonce i kontaktní zóny mezi enklávami a mateřskou horninou nemají negativní vliv na celkovou pevnost systému. Enklávy, i když jsou přednostně tvořeny tmavými minerály s výbornou štěpností, v systému hornina–enkláva představují „koncentrátory napětí“, tj. pevnější partie, ve kterých se při deformaci systému hornina–enkláva hromadí napětí, a to až do okamžiku, než dojde k porušení enkláv, které se většinou projeví při laboratorním testování malou „explozí“ a tomu odpovídajícím zvukovým efektem. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v Tab. 15 a 16 a ukázka pracovního diagramu z triaxiální zkoušky je na Obr. 15.

Tab. 15 – Objemová hmotnost [ρ], pevnost v odskoku [R], odvozená jednoosá tlaková pevnost [UCS] a nepřímá pevnost v tahu [σ_t] multikomponentních geomateriálů (převzato z práce Krmíčka a Závackého 2017).

	Parameter	Syenite	Enclave
Mass density	ρ [kg/m ³]	2780	2810
	Standard deviation [kg/m ³]	±15	±20
	Variation [%]	0.5	0.7
Rebound hardness	R [-]	32	38
	UCS [MPa] (correlated)	59	89
Indirect tensile strength	σ_t [MPa]	9.4	8.9

Tab. 16 – Trojosá tlaková pevnost [TCS], jednoosá tlaková pevnost [UCS] a moduly pružnosti hornin z třebíčského masivu (převzato z publikace Krmíčka a Závackého 2017).

		Parameter	Syenite	Enclave
Triaxial compressive strength	$\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [MPa]	129	169
	$\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [MPa]	165	210
	$\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [MPa]	222	248
TCS - contact syenite/enclave	$\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [MPa]	131	
	$\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$	$\sigma_{1 \text{ max}}$ [MPa]	137	
Uniaxial compressive strength	UCS	σ_c [MPa]	99	126
	Young's modulus	E [GPa]	34	61
	Poisson ratio	ν [-]	0,22	0.21



Obr. 15: Pracovní diagram z průběhu triaxiální zkoušky dvou kompozitních vzorků syenit–enkláva při komorovém tlaku 5 MPa. Převzato z publikace Krmíčka a Závackého (2017). V pracovním diagramu je možné rozlišit několik fází chování testovaného geomateriálu: Fáze 1 – materiál se chová nelineárně a dochází k postupnému zpevňování. V důsledku toho roste tuhost materiálu a křivka pracovního diagramu se napřimuje. To je způsobeno z části mineralogickým složením, kdy minerály obsahují velké množství vnitřních defektů a z části také mikrotrhlinami v hornině. Fáze 2 – Po zpevnění se materiál začne chovat lineárně až do oblasti těsně před porušením. Fáze 3 – Jedná se o oblast maximální pevnosti, kde dochází k porušení vzorku. V této oblasti se materiál chová nelineárně a dochází zde k velkému

přírůstku deformací za relativně malého přírůstku napětí. Fáze 4 – Po porušení dochází ke změkčování materiálu, které je způsobeno postupným rozvojem trhlin. Pevnost se zvolna ustaluje na své reziduální hodnotě. Fáze 5 – Je dosaženo reziduální pevnosti. Při této pevnosti již napětí není závislé na deformaci a jeho hodnota zůstává konstantní při libovolně velkém přetvoření.

6 METODIKA

6.1 PETROGRAFICKÝ POPIS HORNIN

6.1.1 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 v Laboratoři optické mikroskopie GLÚ AV ČR s využitím polarizačního mikroskopu OLYMPUS BX51. Zde také proběhla fotodokumentace výbrusů pomocí software QuickPHOTO MICRO 3.0.

6.1.2 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 žilců.

6.1.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE A MIKROANALÝZA

Vzorky hornin v této práci byly studovány pomocí elektronové mikrosondy CAMECA SX100 v Laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, provozované společně Masarykovou univerzitou a Českou geologickou službou (Obr. 1 v kap. 2.1.2). 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).

6.2 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU

6.2.1 SKLERSKOPICKÁ TVRDOST

Skleroskopická tvrdost byla v disertační práci měřena Schmidovým kladivem typu L (Obr. 2 v kap. 2.2.1) 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, Obr. 4).

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. V následující kapitole 6.3 je tedy metodika pro skleroskopickou tvrdost vynechána.

6.2.2 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).

6.2.3 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. 16). 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. 17).



Obr. 16: Ukázka testovaného tělesa durbachitu z lokality Kamenná (třebíčský masiv).



Obr. 17: Měřicí přístroj ADVANTEST 9 ROCK od italského výrobce Controls Group využívaný v laboratoři vědecko-výzkumného centra AdMaS. Foto: www.controls-group.com.

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:

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{ax}} = \frac{\sigma_{1,max} - \sigma_{1,min}}{\varepsilon_{ax,max} - \varepsilon_{ax,min}} \quad (5)$$

kde σ_1 je axiální napětí, ε_{ax} je axiální poměrné přetvoření a indexy $_{min}$ a $_{max}$ značí vrcholy odlehčovací smyčky. Poissonovo číslo bylo stanoveno podle následujícího vzorce:

$$\nu = \frac{E}{\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{rad}}} = \frac{E}{\frac{\sigma_{1,max} - \sigma_{1,min}}{\varepsilon_{rad,max} - \varepsilon_{rad,min}}} \quad (6)$$

kde E je modul pružnosti, σ_1 je axiální napětí, ε_{rad} je radiální poměrné přetvoření a indexy $_{min}$ a $_{max}$ značí vrcholy odlehčovací smyčky.

STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ BRAZILSKÉ ZKOUŠKY A UCS

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 soubory dat těchto dvou zkoušek byl použit tento postup:

Pro odhad polohy byla použita tzv. pivotová polosuma:

$$P_L = \frac{x_D + x_H}{2} \quad (7)$$

Prvním krokem této robustní metody, po seřazení hodnot od nejmenší po největší, je vyčíslení hloubky pivotu H pro $n =$ liché:

$$H = \text{int} \frac{(n + 1) / 2}{2} \quad (8)$$

Nebo pro $n =$ sudé:

$$H = \text{int} \frac{\frac{(n + 1)}{2} + 1}{2} \quad (9)$$

Dolní pivot je poté definován jako:

$$x_D = x(H) \quad (10)$$

A horní pivot jako:

$$x_H = x(n + 1 - H) \quad (11)$$

95% interval spolehlivost střední hodnoty je pak definován jako:

$$P_L - R_L \times T_{L0,975(n)} \leq \mu \leq P_L + R_L \times T_{L0,975(n)} \quad (12)$$

Kde R_L je tzv. pivotové rozpětí (charakterizující míru rozptýlení):

$$R_L = x_H - x_D$$

a $T_{L,1-\alpha/2(n)}$ jsou kvantily T_L rozdělení, viz Tab. 17.

Tab. 17 – Kvantily rozdělení T_L . Převzato z práce Pokorného (2010).

$1 - \alpha$	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
n					
4	0,477	0,555	0,738	1,040	1,331
5	0,869	1,370	2,094	3,715	5,805
6	0,531	0,759	1,035	1,505	1,968
7	0,451	0,550	0,720	0,978	1,211
8	0,393	0,469	0,564	0,741	0,890
9	0,484	0,688	0,915	1,265	1,575
10	0,4	0,523	0,668	0,878	1,051
11	0,363	0,452	0,545	0,714	0,589
12	0,344	0,423	0,483	0,593	0,697
13	0,389	0,497	0,608	0,792	0,945
14	0,348	0,437	0,525	0,661	0,776
15	0,318	0,399	0,466	0,586	0,685
16	0,299	0,374	0,435	0,507	0,591
17	0,331	0,421	0,502	0,637	0,774
18	0,300	0,380	0,451	0,555	0,650
19	0,288	0,361	0,423	0,502	0,575
20	0,266	0,337	0,397	0,464	0,519

6.2.4 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 osové 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:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (14)$$

kde σ_1 a σ_3 – hlavní napětí, σ_{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.

6.3. 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 štíhlostním poměrem (L:D) 2,0 pro testování pevnosti v jednoosém (UCS) a trojosém tlaku (Obr. 18). Testování bylo zaměřeno na pozorování anizotropie mechanického chování, čemuž byla uzpůsobena i příprava orientovaných vzorků (Obr. 19). 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. 18.

Tab. 18 – Testované vzorky granulitu z lokality Horní Bory (viz Obr. 19).

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

6.3.1 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.

6.3.2 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.

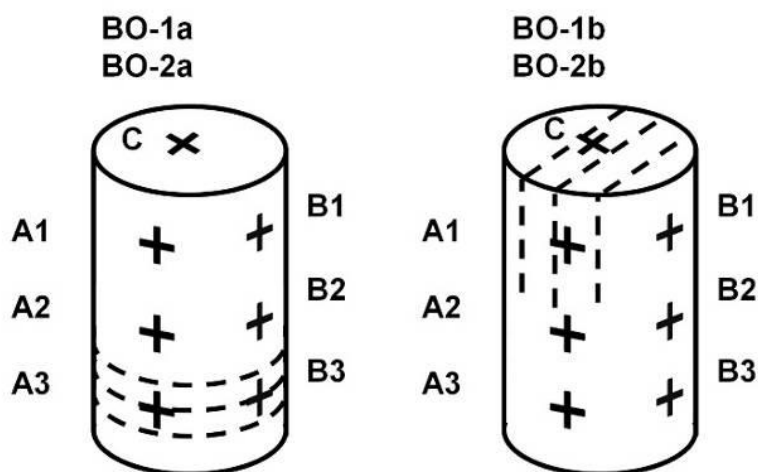
6.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

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. 14; Hoek a Brown 2019). Hodnoty parametrů byly zjištěny výpočtem v tabulkovém procesoru. Hodnoty σ_{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.



Obr. 18: Ukázka testovaného tělesa granulitu z lokality Horní Bory (strážecké moldanubikum).

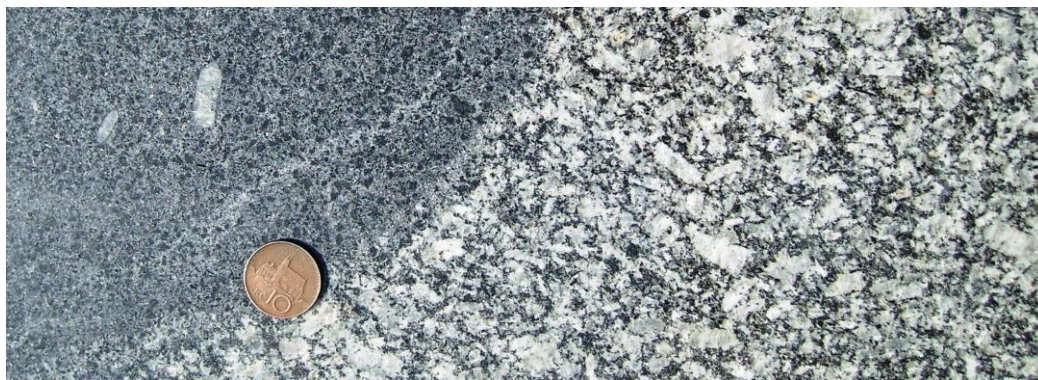


Obr. 19: Orientace zkušebních vzorků vůči foliaci (Havlíčková et al. 2019).

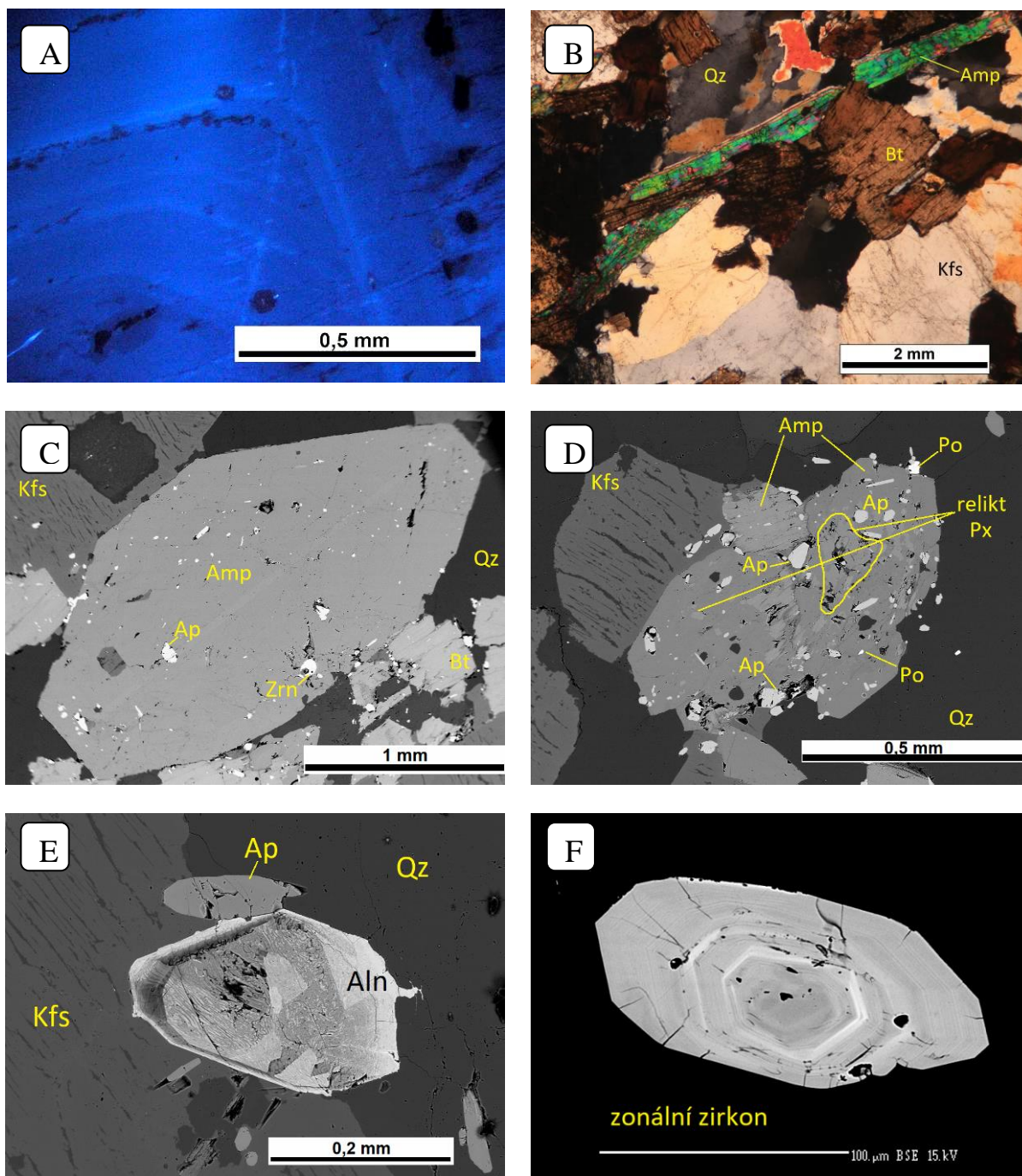
7 VÝSLEDKY

7.1 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ DURBACHITU

Vyrostlice draselných živců (až 3 cm) v durbachitu z lomu Kamenná jsou lokálně proudově usměrněny (Obr. 20). 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 luminiscentních zón (Obr. 21A). Uvedená zonalita je dokladem míšení mafické a felsické taveniny v průběhu růstu jednotlivých krystalů (např. Slaby a Götze 2004) a je v souladu s přítomností mafických enkláv na dané lokalitě. K-živce uzavírají podél růstových zón starší tmavé slídy. 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 (Obr. 22A, Tab. 19). Tmavé slídy chemismem odpovídají Mg – biotitu (Obr. 22B, Tab. 20). Ten může být v některých případech chloritizován. Mimo slíd je v rámci durbachitu zastoupen také amfibol (vytváří až 2–3 mm velké krystaly; Obr. 21B a C), který svým složením odpovídá aktinolitu až magnesiohornblendu (Obr. 22C, Tab. 21). Vzácně se objevují také pseudomorfózy po pyroxenu (Obr. 21D) nebo amfibolu. Tmavé minerály často uzavírají akcesorické minerály, např. apatit, zirkon, pyrhotin (Obr. 21C a D), 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. 21E a F). Křemen je přítomný pouze jako menší xenomorfní zrna v základní hmotě a jeho obsah zpravidla nepřevyšuje cca obj. 5 %.

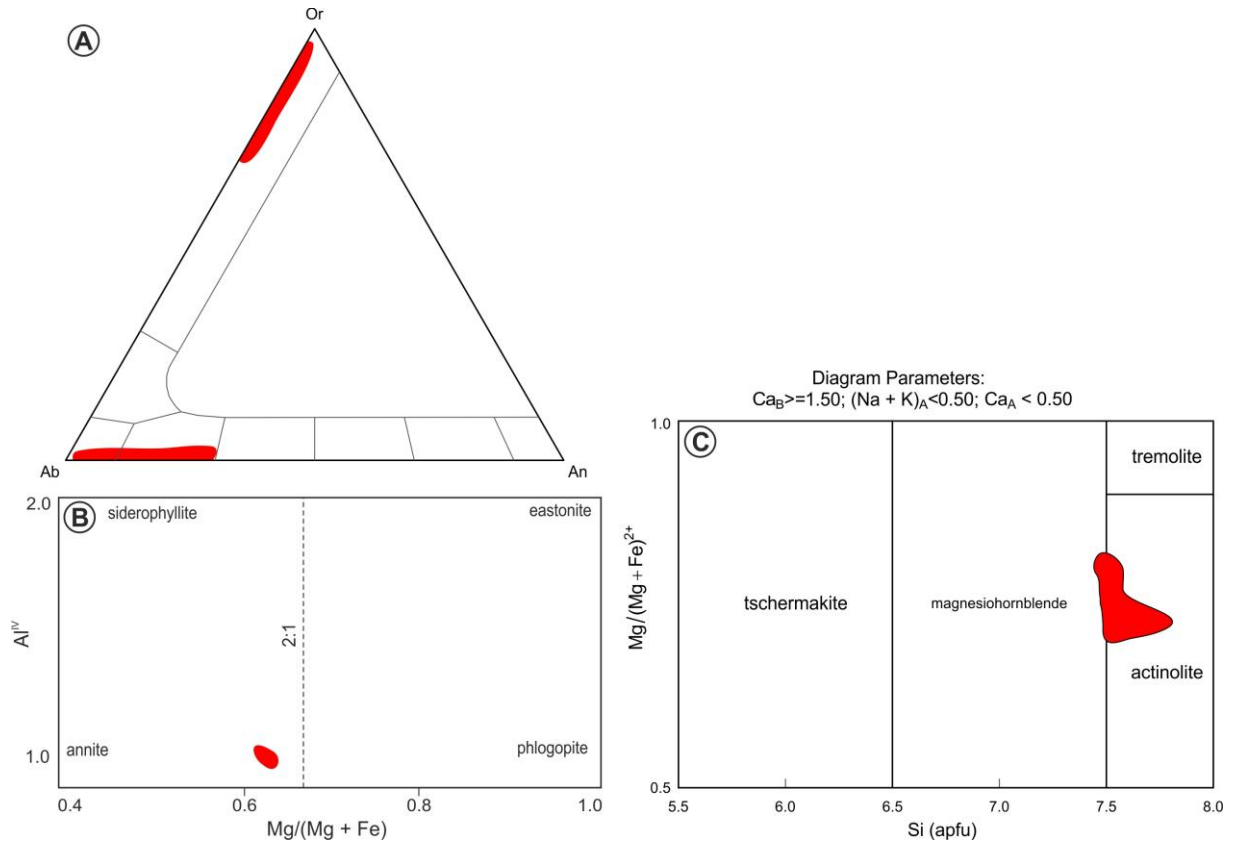


Obr. 20: Ukázka kontaktu mafické enklávy a syenitu s vyrostlicemi K-živců z lokality Kamenná. Foto: L. Krmíček.



Obr. 21: **A** – Zonalita draselného živce je zvýrazněna střídáním tmavě a světle modře luminescentních zón (CL; Kamenná). **B** – Celkový charakter durbachitu z Kamenné – převažují K-živce (Kfs), hojně je zastoupený biotit (Bt) a amfibol (Amp), v menším množství se objevuje křemen (Qz); foto ve zkřížených nikolech (XPL). **C** – 2 mm velký zdvojitý amfibol (Amp) s inkluzemi apatitu (Ap) a zirkonu (Zrn). **D** – Amfibol (Amp) s relikty staršího pyroxenu (Px) obklopený křemenem (Qz) a K-živcem (Kfs) a s inkluzemi pyrrhotinu (Po) a apatitu (Ap). Foto ve zpětně odražených elektronech. **E** – Zonální allanit (Aln) s okolními

zrny apatitu (Ap) obklopený K-živcem (Kfs) a křemenem (Qz). **F** – Střídající se zóny v krystalu zirkonu. Tyto akcesorické minerály s Th a U jsou hlavním zdrojem zvýšené radioaktivity durbachitů třebečského masivu. Foto ve zpětně odražených elektronech.



Obr. 22: **A** – Pozice živců v durbachitu z Kamenné v ternárním klasifikačním diagramu. **B** – Pozice tmavých slíd v durbachitu z Kamenné v klasifikačním diagramu Riedera et al. (1998). **C** – Pozice amfibolů v durbachitu z Kamenné v klasifikačním diagramu Leakeho et al. (1997).

Tab. 19 – Reprezentativní složení živců v testovaném durbachitu.

Analýza	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hornina	durbachit	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Na ₂ O	3,21	0,50	1,23	8,20	9,40	11,52	1,17	1,31	0,88
SiO ₂	65,95	64,51	65,08	61,20	64,31	68,25	64,87	64,70	64,64
Al ₂ O ₃	18,79	18,02	18,33	24,22	22,22	19,84	18,37	18,47	18,38
K ₂ O	12,06	16,18	14,88	0,33	0,26	0,20	15,11	14,81	15,73
CaO	0,06	0,00	0,08	5,96	3,56	0,50	0,01	0,06	0,03
FeO	0,05	0,00	0,04	0,04	0,04	0,00	0,02	0,03	0,07
PbO	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,05
Total	100,21	99,31	99,65	99,96	99,83	100,32	99,65	99,50	99,87

Empirický vzorec na bázi 8 kyslíků.

Si	3,00	2,93	2,96	2,78	2,92	3,10	2,95	2,94	2,94
Al	1,01	0,97	0,98	1,30	1,19	1,06	0,98	0,99	0,98
Ca	0,00	0,00	0,00	0,29	0,17	0,02	0,00	0,00	0,00
Na	0,28	0,04	0,11	0,72	0,83	1,02	0,10	0,12	0,08
K	0,70	0,94	0,86	0,02	0,02	0,01	0,88	0,86	0,91
O	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Or	71	96	89	2	1	1	89	88	92
Ab	29	4	11	70	81	97	11	12	8
An	0	0	0	28	17	2	0	0	0

Fe, P, Rb, Sr, Pb, Ba jsou pod detekčním limitem.

Or, Ab, An = zastoupení ortoklasové, albitové a anortitové komponenty (mol. %).

Tab. 20 – Reprezentativní složení tmavých slíd v testovaném durbachitu.

Analýza	1	2	3	Empirický vzorec na bázi 11 kyslíků.			
Hornina	durbachit	durbachit	durbachit	Si	2,87	2,90	2,89
Na ₂ O	0,07	0,10	0,11	Ti	0,20	0,22	0,22
SiO ₂	38,47	39,12	38,95	Al ^{IV}	1,13	1,10	1,11
Al ₂ O ₃	13,29	13,29	13,27	Al	1,17	1,16	1,16
MgO	14,49	14,40	14,47	Al ^{VI}	0,05	0,06	0,06
Cl	0,02	0,02	0,00	Mg	1,61	1,59	1,60
TiO ₂	3,57	3,88	3,89	Mn	0,01	0,01	0,01
BaO	0,13	0,17	0,22	Fe	1,01	0,96	0,96
Cr ₂ O ₃	0,27	0,15	0,13	Na	0,01	0,01	0,02
K ₂ O	8,74	9,37	9,26	K	0,83	0,89	0,88
CaO	0,28	0,00	0,00	OH	1,87	1,85	1,86
FeO	16,13	15,46	15,48	F	0,13	0,15	0,14
MnO	0,23	0,20	0,19	O	10,1	10,1	10,1
F	0,53	0,63	0,61	Mg/(Mg+Fe)	0,62	0,62	0,62
Total	96,22	96,79	96,57	V, Cr, Ba, Zn, Ca a Cl jsou pod detekčním limitem.			

Tab. 21 – Reprezentativní složení amfibolů v testovaném durbachitu.

Analýza	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hornina	durbachit	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Na ₂ O	0,82	0,72	0,76	0,55	0,76	0,72	0,72	0,77	0,70
SiO ₂	53,06	53,85	52,96	54,37	53,49	53,24	53,64	53,02	53,49
Al ₂ O ₃	3,60	3,17	3,59	2,35	3,56	3,68	3,28	3,78	3,31
MgO	15,72	16,37	15,32	16,15	16,66	16,56	16,22	16,30	16,28
TiO ₂	0,59	0,60	0,60	0,46	0,52	0,54	0,59	0,61	0,63
Cr ₂ O ₃	0,19	0,08	0,11	0,08	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
K ₂ O	0,34	0,32	0,33	0,22	0,29	0,35	0,33	0,37	0,34
CaO	12,82	12,52	13,24	12,58	11,76	11,87	12,30	12,17	12,28
FeO	11,59	11,32	10,86	10,71	10,93	11,29	11,28	11,17	11,04
MnO	0,38	0,30	0,36	0,40	0,31	0,37	0,29	0,34	0,36
F	0,318	0,308	0,314	0,266	0,355	0,365	0,344	0,352	0,314
Total	99,41	99,55	98,44	98,23	98,71	99,05	99,08	98,96	98,83

Empirický vzorec na bázi T + C = 13.

Si	7,55	7,59	7,65	7,77	7,53	7,48	7,59	7,50	7,58
Ti	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
Al ^{IV}	0,45	0,41	0,35	0,23	0,47	0,52	0,41	0,50	0,42
Al	0,60	0,53	0,61	0,40	0,59	0,61	0,55	0,63	0,55
Al ^{VI}	0,16	0,12	0,27	0,17	0,12	0,09	0,14	0,13	0,13
Fe ^{+III}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,30	0,00	0,11	0,02
Mg	3,34	3,44	3,30	3,44	3,49	3,47	3,42	3,44	3,44
Ca	1,95	1,89	2,05	1,93	1,77	1,79	1,87	1,84	1,86
Mn	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
Fe ^{tot}	1,38	1,33	1,31	1,28	1,29	1,33	1,33	1,32	1,31
Fe ²⁺	1,38	1,33	1,31	1,28	1,02	1,02	1,34	1,21	1,29
Na	0,23	0,20	0,21	0,15	0,21	0,20	0,20	0,21	0,19
K	0,06	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06
OH	1,86	1,86	1,86	1,88	1,84	1,84	1,85	1,84	1,86
F	0,14	0,14	0,14	0,12	0,16	0,16	0,15	0,16	0,14
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,71	0,72	0,72	0,73	0,77	0,77	0,72	0,74	0,73

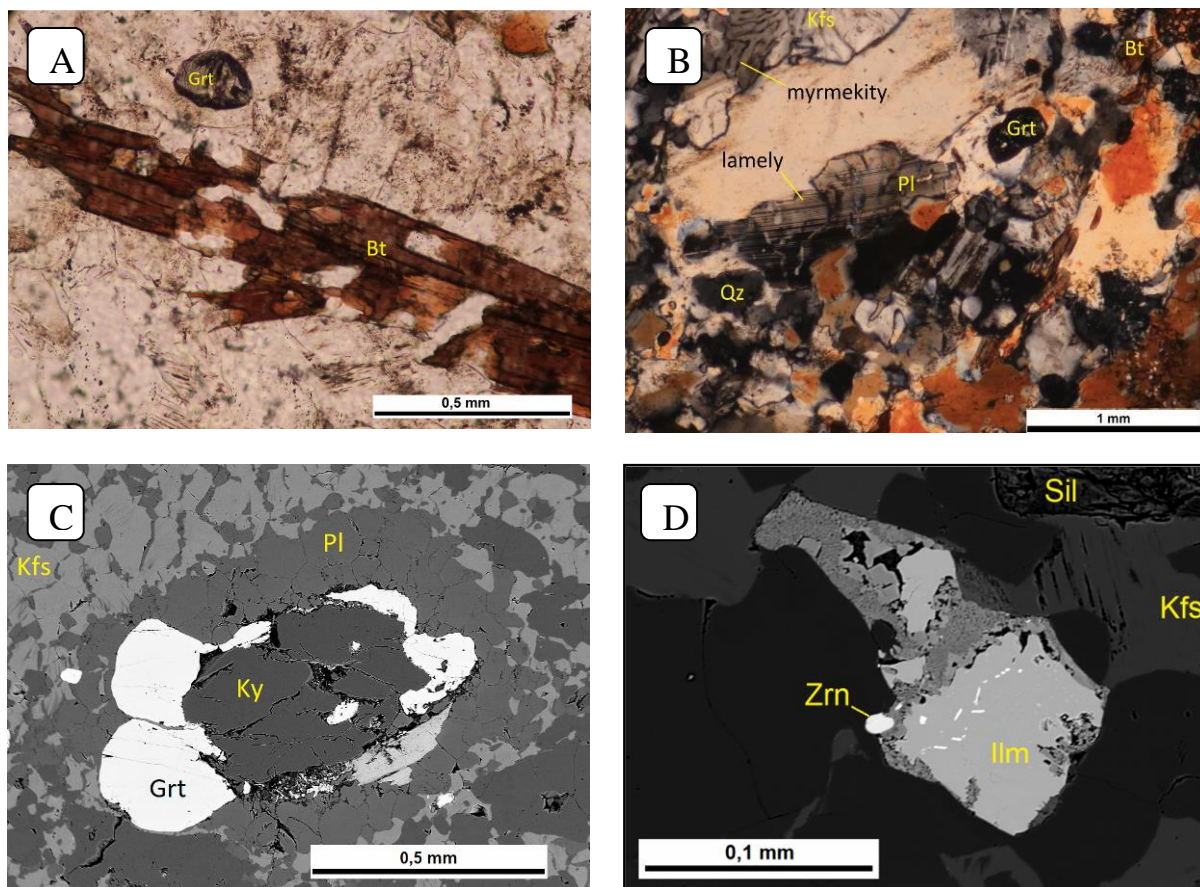
Cl, V, Cr jsou pod detekčním limitem.

7.2 PETROGRAFICKÉ SLOŽENÍ GRANULITU

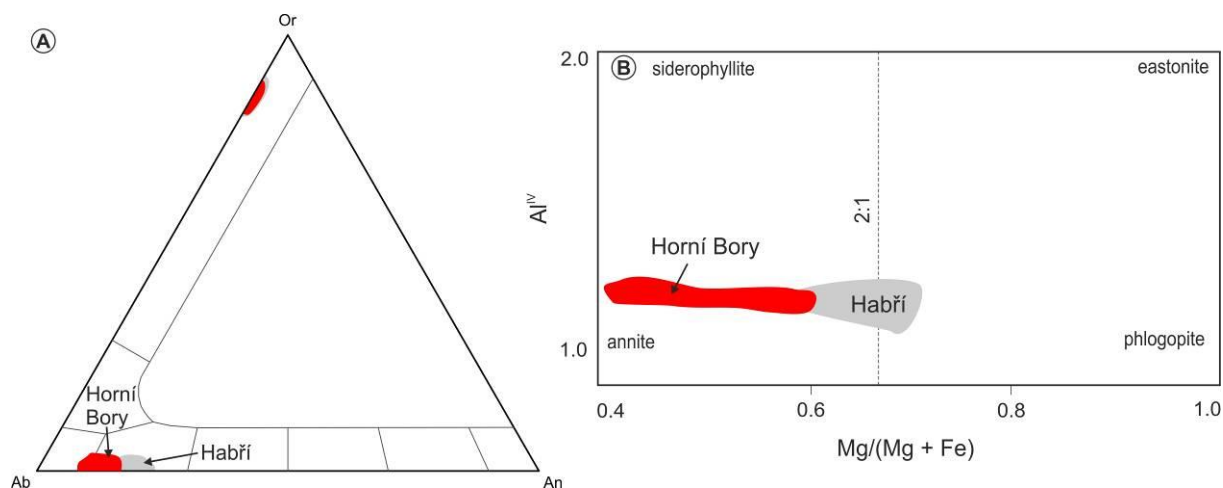
Granulity z lomu v Horních Borech i z lokality Habří jsou petrograficky velmi podobné a jsou charakterizované drobnými porfyroblasty granátu a granoblastickou mikrostrukturou (Obr. 23 a 24). Na obou lokalitách výrazně převládá páskovaný typ granulitu s nápadnou foliací, kdy se střídají polohy s tmavou slídou a bez ní, nad světlým nepáskovaným typem (Obr. 23). Základní mineralogické složení studovaných granulitů je křemen, K-živec, který převažuje nad plagioklasem (Tab. 22), 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 (Obr. 25A). Plagioklas se objevuje jen ojediněle a složením odpovídá především oligoklasu. Na kontaktu živců mohou být patrné tzv. myrmekity (Obr. 24B). Zatímco v granulitu z lomu v Horních Borech odpovídá tmavá slída biotitu, tmavá slída z lokality Habří odpovídá svým složením Mg-biotitu až flogopitu (Obr. 25B, Tab. 23). Porfyroblasty granátu tvoří zaoblená, bezbarvá zrna, která bývají často silně rozpraskaná. Granát je charakterizován převahou almandinové komponenty (Tab. 24). Vedlejším minerálem je kyanit (Obr. 24C), 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. 24D). Apatit na obou lokalitách vystupuje v podobě protáhlých zrn a drobných inkluzí v granátu.



Obr. 23: Celkový pohled na distribuci minerálů v granulitu z Horních Borů (PPL).



Obr. 24: **A** – Biotit (Bt) z Horních Borů, Grt = granát, 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.



Obř. 25: **A** – Pozice řivců ve vzorčích granulitu z Horních Borů a Habří v ternárním klasifikačním diagramu. **B** – Pozice tmavých slíd ve vzorčích granulitů z Horních Borů a Habří v klasifikačním diagramu Riedera et al. (1998).

Tab. 22 – Reprezentativní složení řivců v testovaném granulitu.

Analýza	1	2	3	4	5
Hornina	granulit	granulit	granulit	granulit	granulit
Na ₂ O	10,44	1,37	10,12	1,56	10,37
SiO ₂	65,76	63,74	65,05	63,43	65,20
Al ₂ O ₃	21,17	18,89	21,76	19,11	21,75
K ₂ O	0,20	15,12	0,17	14,93	0,39
CaO	1,92	0,04	2,40	0,02	2,28
FeO	0,00	0,00	0,14	0,00	0,05
P ₂ O ₅	0,22	0,33	0,38	0,73	0,42
PbO	0,03	0,00	0,07	0,00	0,00
Total	99,74	99,49	100,09	99,81	100,45

Empirický vzorec na bázi 8 kyslíků.

P	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02
Si	2,99	2,90	2,96	2,88	2,96
Al	1,13	1,01	1,17	1,02	1,17
Ca	0,09	0,00	0,12	0,00	0,11
Fe	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Na	0,92	0,12	0,89	0,14	0,91
K	0,01	0,88	0,01	0,87	0,02
O	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Or	1	88	1	86	2
Ab	90	12	88	14	87
An	9	0	11	0	11

Rb, Sr, Pb, Ba jsou pod detekčním limitem.

Tab. 23 – Reprezentativní složení tmavých slíd v testovaném granulitu.

Analýza	1	2	3
Hornina	granulit	granulit	granulit
Na ₂ O	0,14	0,13	0,09
SiO ₂	36,07	35,84	35,56
Al ₂ O ₃	18,91	19,03	18,85
MgO	7,86	7,76	7,46
Cl	0,03	0,04	0,04
TiO ₂	2,86	3,18	3,47
BaO	0,00	0,08	0,07
K ₂ O	9,53	9,52	9,50
FeO	20,72	20,78	20,92
MnO	0,08	0,10	0,07
F	1,03	0,98	0,93
Total	97,23	97,42	96,95

Empirický vzorec na bázi 11 kyslíků.

Si	2,73	2,71	2,71
Ti	0,16	0,18	0,20
Al ^{IV}	1,27	1,29	1,29
Al	1,69	1,70	1,69
Al ^{VI}	0,42	0,41	0,40
Mg	0,89	0,88	0,85
Mn	0,01	0,01	0,00
Fe	1,31	1,32	1,33
Na	0,02	0,02	0,01
K	0,92	0,92	0,92
OH	1,75	1,76	1,77
F	0,25	0,23	0,22
O	10,1	10,1	10,1
Mg/(Mg + Fe)	0,40	0,40	0,39

V, Cr, Ba, Cl, Ca a Zn jsou pod detekčním limitem.

Tab. 24 – Reprezentativní složení granátů v testovaném granulitu.

Analýza	1	2	3	4
Hornina	granulit	granulit	granulit	granulit
SiO ₂	37,05	37,09	37,11	37,10
Al ₂ O ₃	21,07	20,86	20,90	21,07
MgO	3,37	3,34	3,52	3,35
CaO	0,70	0,53	0,57	0,45
FeO	36,05	35,96	36,08	36,16
MnO	2,16	2,18	2,20	2,27
P ₂ O ₅	0,28	0,13	0,18	0,15
Total	100,67	100,08	100,54	100,54

Empirický vzorec na bázi 12 kationtů a 8 kyslíků.

P	0,02	0,01	0,01	0,01
Si	2,97	2,99	2,98	2,98
Al ^{IV}	0,03	0,01	0,02	0,02
Al	1,99	1,98	1,97	1,99
Al ^{VI}	1,96	1,97	1,95	1,97
Fe ^{III}	0,02	0,01	0,04	0,02
Mg	0,40	0,40	0,42	0,40
Ca	0,06	0,05	0,05	0,04
Mn	0,15	0,15	0,15	0,15
Fe ^{III}	2,40	2,41	2,38	2,40
Fe ^{tot}	2,42	2,42	2,42	2,43

Y, Ti, Cr, K, Na a F jsou pod detekčním limitem.

7.3 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY DURBACHITU

7.3.1 SKLERSKOPICKÁ TVRDOST

Skleroskopická tvrdost durbachitů z Kamenné byla měřena na reprezentativních horninových blocích. V následující tabulce (Tab. 25) jsou uvedena data odečtená ze Schmidtova kladiva typu L společně s vyznačeným sklonem k měřené ploše horniny, přičemž z každého souboru dat pro daný blok byly vyloučeny minimální a maximální hodnoty (v tabulce jsou přeškrtnuté). Odečtené hodnoty R byly korigovány pomocí koeficientu zjištěného dle postupu uvedeného v metodické části disertační práce a pro každý horninový blok tak byla vypočtena průměrná hodnota $R_{\text{korigovaná}}$. V Tab. 26 je shrnutí průměrných hodnot $R_{\text{korig.}}$ pro jednotlivé bloky horniny a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS₀).

Tab. 25 – Hodnoty skleroskopické tvrdosti durbachitů z Kamenné s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

DURBACHIT KAMENNÁ								
Horninový blok								
KA1			KA2			KA3		
počet měření	R	$R_{\text{korigovaná}}$	počet měření	R	$R_{\text{korigovaná}}$	počet měření	R	$R_{\text{korigovaná}}$
1	62	68	1	32	35	1	65	72
2	59	65	2	40	44	2	62	68
3	55	61	3	37	41	3	62	68
4	56	62	4	33	36	4	60	66
5	56	62	5	50	55	5	62	68
6	58	64	6	50	55	6	61	67
7	60	66	7	30	33	7	60	66
8	63	69	8	35	39	8	63	69
9	55	61	9	36	40	9	60	66
10	53	58	10	52	57	10	62	68
11	54	59	11	46	51	Průměrná hodnota		68
12	61	67	12	35	39			
13	47	52	13	50	55			
14	49	54	14	38	42			
15	38	42	15	37	41			
16	52	57	16	37	41			
17	56	62	17	33	36			
18	44	48	18	43	47			
19	42	46	19	40	44			
20	54	59	20	41	45			
21	43	47	Průměrná hodnota		44			
22	49	54						
Průměrná hodnota		59						

Tab. 26 – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti ($R_{\text{korigovaná}}$) durbachitu a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS_0) podle Bieniawského (1984; Obr. 4).

Parametr	Jednotka	Durbachit Kamenná		
		KA1	KA2	KA3
Horninový blok				
Objem. hmotnost ρ	[kg/m ³]	2680		
$R_{\text{korigovaná}}$	[-]	59	44	68
UCS_0	[MPa]	270	125	475

Statistické vyhodnocení pomocí 5% kvantilu rozdělení pro soubor naměřených dat skleroskopické tvrdosti je uvedeno v tabulce níže (Tab. 27).

Tab. 27 – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u hodnoty $R_{\text{korigované}}$ pro durbachit.

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

7.3.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Charakter tahového porušení vzorků durbachitu z Kamenné po testování pomocí brazilské zkoušky je vyobrazen na Obr. 26.



Obr. 26: Ukázka tahového porušení vzorků durbachitu z Kamenné.

Získaná data jednoosé tlakové pevnosti a pevnosti v příčném tahu jsou v průměrných hodnotách prezentována v následující tabulce (Tab. 28). V tabulce je rovněž uvedena suchá objemová hmotnost a statistické údaje o jednotlivých zkouškách včetně směrodatných odchylek.

Tab. 28 – 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 ³	15	26 kg/m ³

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/m³.

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 (viz kap. 6.2.3) 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: $82 \leq \mu \leq 139$.

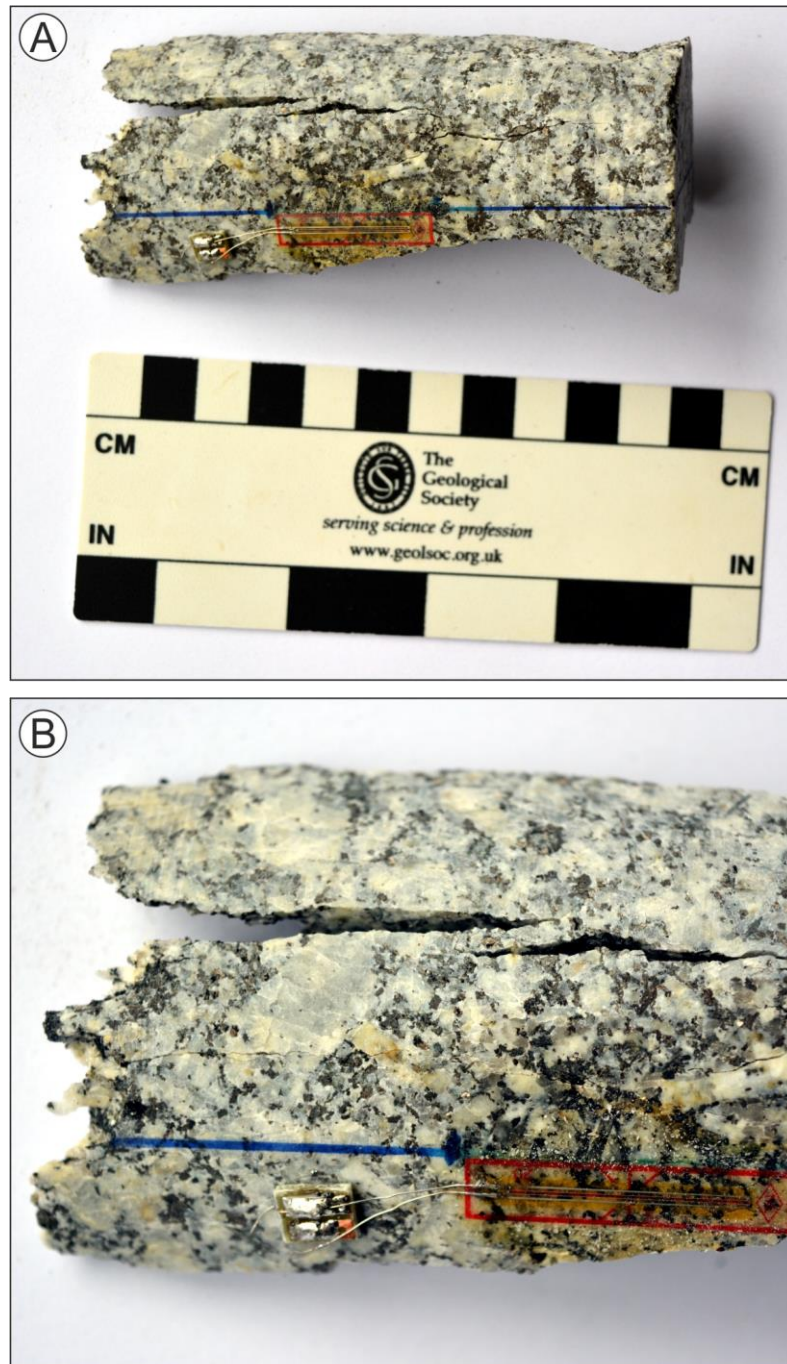
Výsledné hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla pro durbachit z Kamenné jsou uvedeny v Tab. 29.

Tab. 29 – Hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla.

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

7.3.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Vzorky durbachitu z Kamenné po testování trojosé tlakové pevnosti jsou porušovány systémem střížných trhlin, které často vykazují kulisovitě uspořádání typu *en echelon* (Obr. 27).



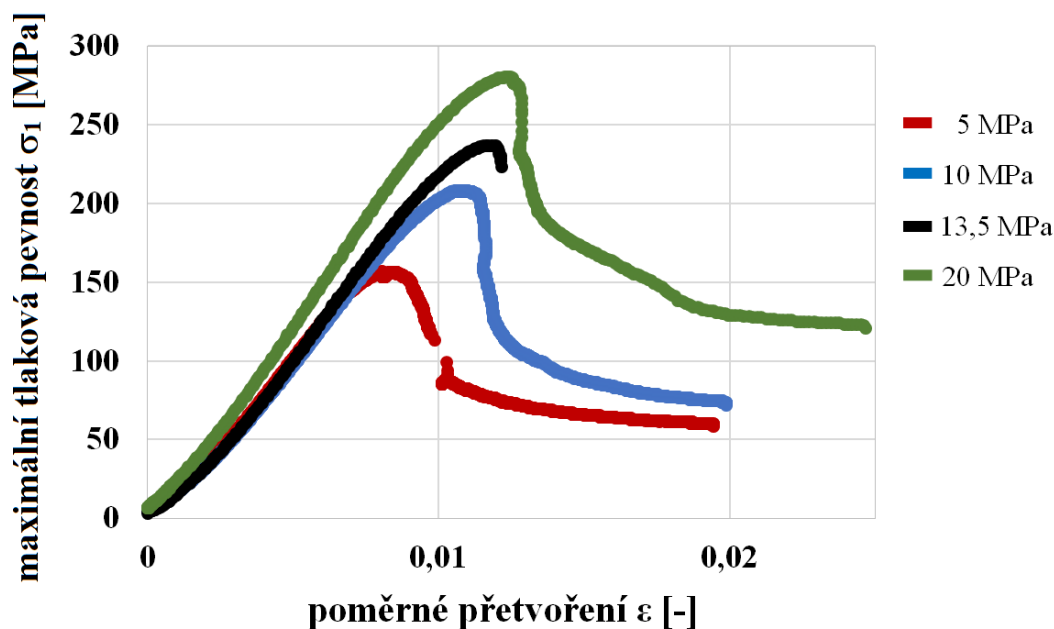
Obr. 27: **A** – Porušení vzorku durbachitu z Kamenné po triaxiální zkoušce; **B** – Detail střížných trhlin s kulisovitým uspořádáním typu *en echelon* (např. Davis et al. 2011).

Průměrné hodnoty získané z triaxiálních testů jsou shrnuty v Tab. 30. Z naměřených hodnot je zřejmé, že napětí σ_1 roste úměrně komorovému tlaku σ_3 . Při maximálním komorovém tlaku 20 MPa vykazuje durbachit z Kamenné přibližně 2,5× vyšší pevnost oproti pevnosti stanovené v prostém tlaku.

Tab. 30 – Hodnoty naměřené při triaxiálním testování durbachitů.

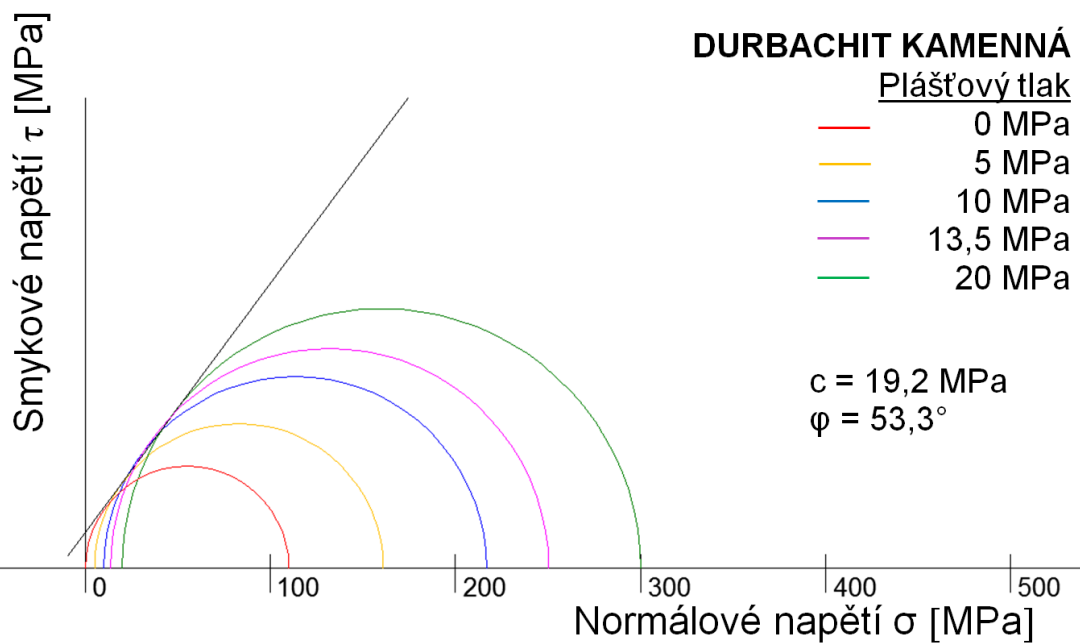
	Kamenná	
Komorový tlak σ_3 [MPa]	Maximální tlaková pevnost σ_1 [MPa]	Reziduální tlaková pevnost σ_1 [MPa]
5	156	60
10	207	73
13,5	237	-
20	280	118

Výsledky triaxiálních zkoušek jsou graficky prezentovány na Obr. 28, kde osa x představuje osovou deformaci (poměrné přetvoření) ε [-] a osa y odpovídá napětí σ_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. 28: Pracovní diagram z průběhu triaxiálních zkoušek durbachitů z Kamenné (Šujanská et al. 2018 – upraveno). Podrobná interpretace jednotlivých fází pracovního diagramu je uvedena v popisu Obr. 15.

Prezentaci výsledků triaxiálních zkoušek ve vztahu k definovaným kritériím porušení přináší Tab. 31, Obr. 29 a 30.

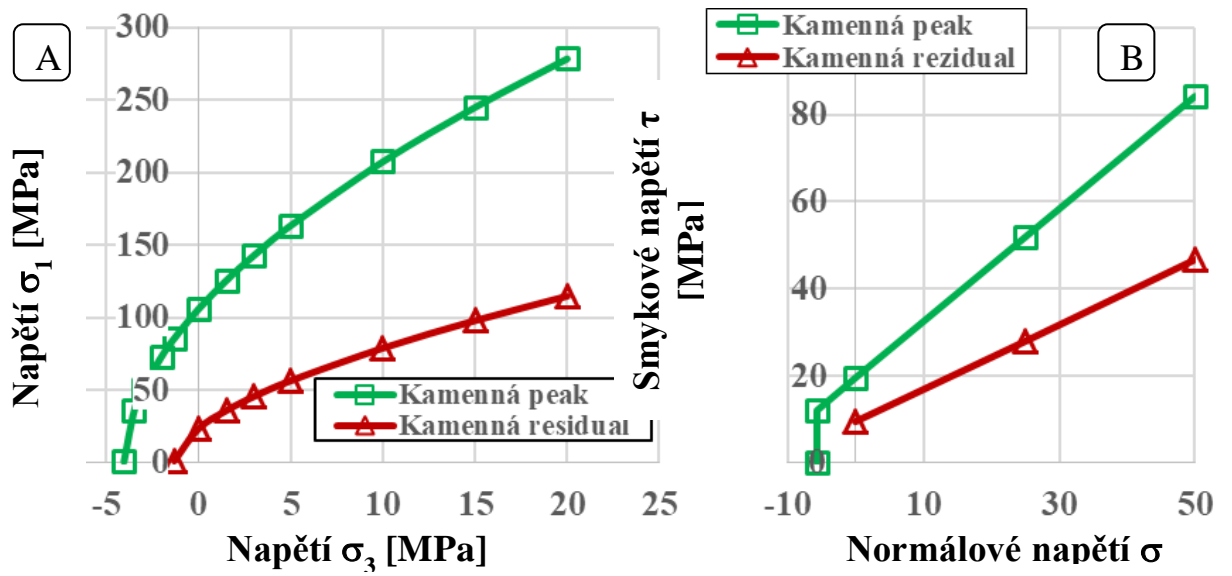


Obr. 29: Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek durbachitu z Kamenné, kde c = soudržnost, φ = úhel vnitřního tření.

Tab. 31 – 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)	
	σ_{ci} [MPa]	m_i [-]	s [-]	a [-]	c [MPa]	φ [°]
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

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



Obr. 30: Grafy čar porušení H-B (Hoek-Brown) (A) a M-C (Mohr-Coulomb) (B) kritéria. Upraveno podle Šujanské et al. (2018).

7.4 PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY GRANULITU

7.4.1 SKLERSKOPICKÁ TVRDOST

Postup při testování skleroskopické tvrdosti granulitů byl shodný jako u durbachitu (viz pevnostní charakteristika durbachitu). Následující tabulky (Tab. 32, 33) přináší prezentaci získaných dat skleroskopické tvrdosti granulitů z Horních Borů a Habří. V Tab. 34 jsou pak shrnuty průměrné hodnoty $R_{\text{korig.}}$ pro jednotlivé bloky horniny a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS_0).

Tab. 32 – Skleroskopická tvrdost granulitů z Horních Borů s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

GRANULIT HORNÍ BORY									
Horninový blok									
BO1			BO2			BO3			
počet měření	R ↙	$R_{\text{korig.}}$	počet měření	R ↙	$R_{\text{korigovaná}}$	počet měření	R ↘	$R_{\text{korig.}}$	
1	47	52	1	60	66	1	60	66	
2	48	53	2	58	64	2	59	65	
3	46	51	3	50	55	3	59	65	
4	52	57	4	59	65	4	52	57	
5	49	54	5	52	57	5	53	58	
6	49	54	6	56	62	6	54	59	
7	46	51	7	60	66	7	61	67	
8	49	54	8	58	64	8	47	52	
9	45	50	9	56	62	9	47	52	
10	44	45	10	55	61	10	50	55	
11	44	48	Průměrná hodnota			62	11	52 ↙	57
12	54	59				12	45	50	
13	48	53				13	42	46	
14	48	53				14	44	48	
15	48	53				15	45	50	
16	45	50				16	50	55	
17	45	50				17	53	58	
18	53	58				18	52	57	
19	48	53				19	42	46	
20	52	57				20	40	44	
Průměrná hodnota		53					Průměrná hodnota		55

Tab. 33 – Skleroskopická tvrdost granulitů z Habří s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

GRANULIT		
Horninový blok HA1		
počet měření	R ↓	$R_{\text{korigovaná}}$
1	52	57
2	47	52
3	48	53
4	55	61
5	51	56
6	42	46
7	49	54
8	55	61
9	47	52
10	47	52
11	47 ↙	52
12	57	63
13	50	55
14	51	56
15	54	59
16	53	58
17	45	50
18	49	54
19	49	54
20	51	56
Průměrná hodnota		55

Tab. 34 – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti granulitů ($R_{\text{korigovaná}}$) a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS_o) podle Bieniawského (1984; Obr. 4).

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

Statistické vyhodnocení pomocí 5% kvantilu rozdělení je pro soubor dat skleroskopické tvrdosti uvedeno v následující tabulce (Tab. 35).

Tab. 35 – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u $R_{\text{korigované}}$ pro vzorky z lokality Horní Bory a Habří.

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

7.4.2 JEDNOOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Přehled hlavních mechanických parametrů a jejich variace vůči rozdílné orientaci foliace je uveden v Tab. 36. 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 7.2). Ukázka porušení testovaných vzorků granulitu z Horních Borů je vyobrazena na Obr. 31 a Obr. 32.



Obr. 31: Ukázka tahového porušení vzorků granulitu z Horních Borů.



Obr. 32: Ukázka křehkého porušení vzorků granulitu z Horních Borů po jednoosé zkoušce.

Tab. 36 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti testovaného granulitu z lokality Horní Bory. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

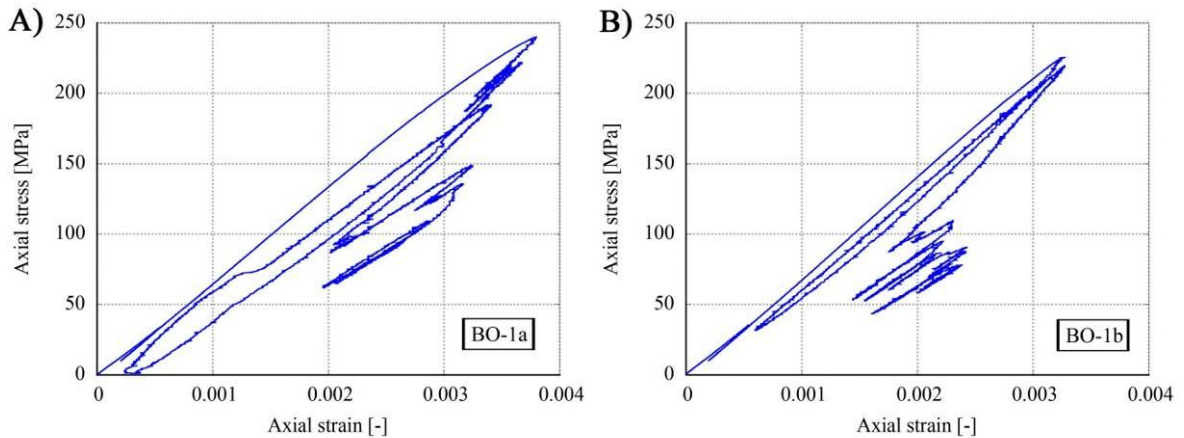
Orientace vůči foliaci:	kolmo	paralelně	Jednotky:
Objemová hmotnost	2640		kg/m ³
UCS	240	225	MPa
E_{def}	62,6	64,8	GPa
E	70,3	71,6	GPa
v	0,19	0,14	-
Pevnost v tahu*	15,1		MPa

* 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/m³.

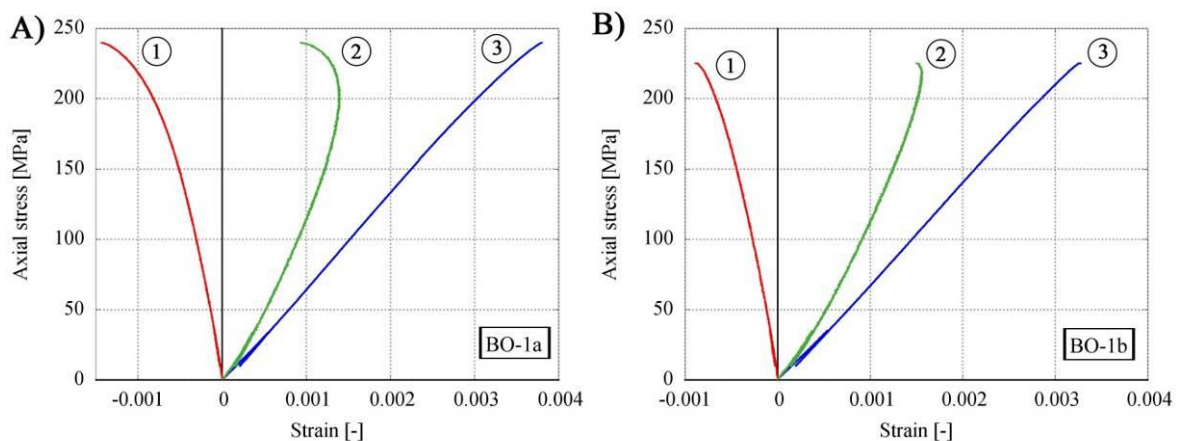
Testovaný granulit z lokality Horní Bory vykazoval relativně vysokou jednoosou tlakovou pevnost (více než 200 MPa). Vyšší hodnoty UCS byly zaznamenány při zatížení kolmo na foliaci. Naopak, v případě zatížení paralelně s foliací se hornina na základě zjištěných parametrů deformovatelnosti zdála být mírně 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.

33A). Na druhou stranu, pokles na křivce napětí–deformace se objevil bezprostředně po dosažení maximální hodnoty pevnosti (Obr. 33B), kdy se vytvořila masivní trhлина podél jedné z ploch foliace.



Obr. 33: Diagramy napětí–deformace UCS testů s vynesenu deformací s fází po porušení. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

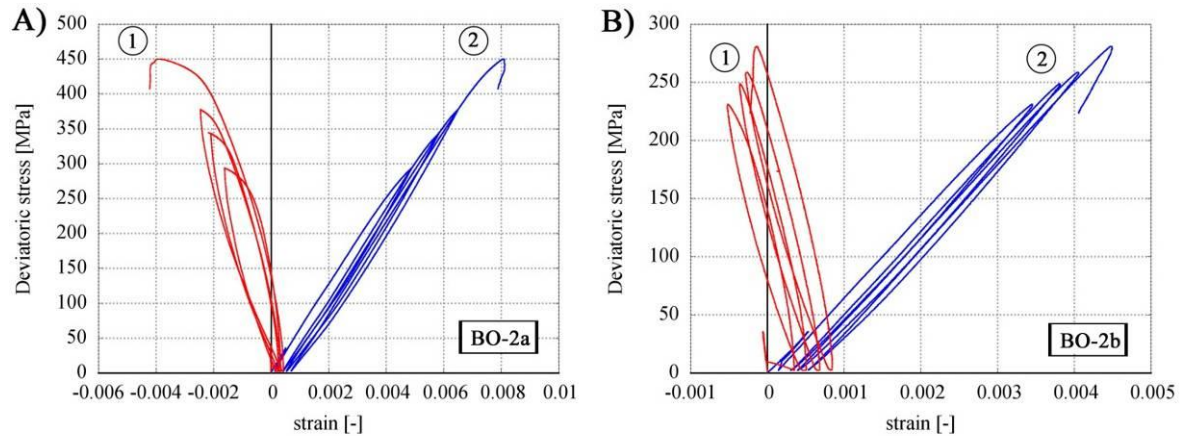
Variabilita procesu porušení byla rovněž dokumentována detailní deformační analýzou (Obr. 34). Nejvýraznější kontrast se objevil na objemové deformaci (Obr. 34 – křivka 2). Minimální objem vzorku BO-1a byl dosažen při 206 MPa (86 % UCS). Minimální objem vzorku BO-1b byl dosažen při 219 MPa (97 % UCS), tedy značně blízko maximální pevnosti.



Obr. 34: Diagramy napětí–deformace UCS testů s rozlišenými komponentami deformace vynesené vůči maximální osově pevnosti. Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – objemová deformace; křivka „3“ – osová deformace. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

7.4.3 TROJOSÁ TLAKOVÁ PEVNOST

Hodnoty maximálních osových napětí dosažené během trojosých tlakových testů granulitů jsou uvedeny v Tab. 37. Vzorek BO-2a vykazuje vyšší pevnost v testech trojosé tlakové pevnosti oproti vzorku BO-2b (Obr. 35A). 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. 35B).



Obr. 35: Vztah poměrného přetvoření a napětí granulitu u trojosých testů u vzorků BO-2a (A) a BO-2b (B). Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – osová deformace. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Tab. 37 – Maximální napětí dosažená během trojosých testů granulitu z Horních Borů. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Plášťový tlak σ_3 [MPa]	Maximální osová napětí σ_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

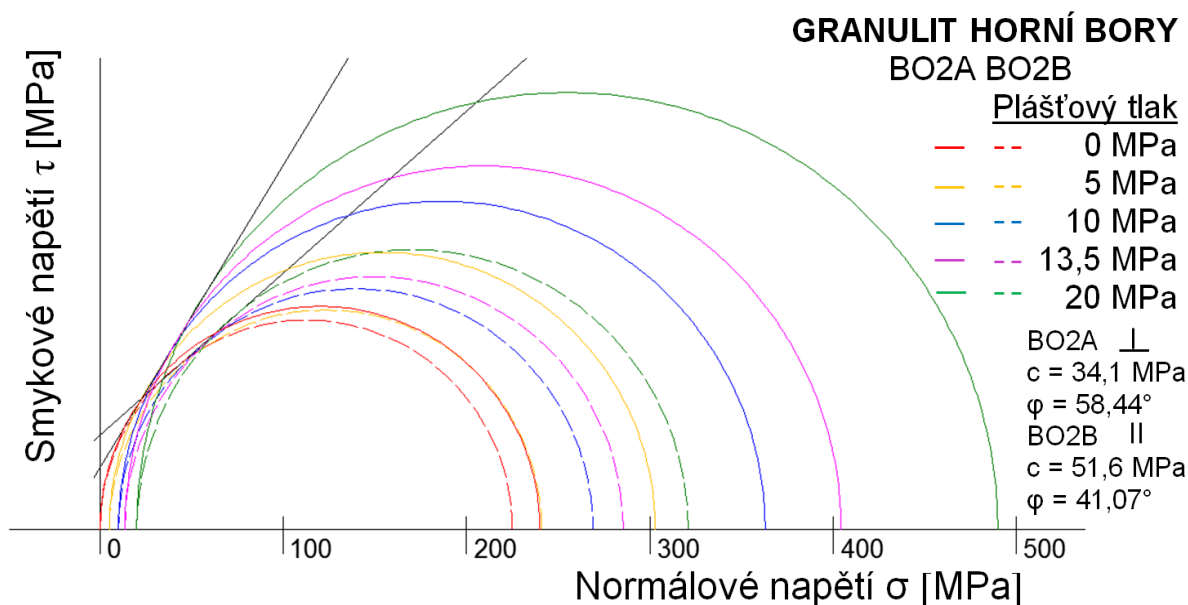
Získaná data byla následně analyzována za účelem zjištění hodnot parametrů Hoek-Brownova (Tab. 38) a Mohr-Coulombova (Obr. 36) kritéria porušení.

Tab. 38 – 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	σ_{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	σ_t	7,90	33,5	MPa

Parametr σ_{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 σ_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. 36: Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek granulitu – Horní Bory, kde c = soudržnost, φ = úhel vnitřního tření. Vzorek BO2A – kolmý k foliaci, BO2B – rovnoběžný s foliací.

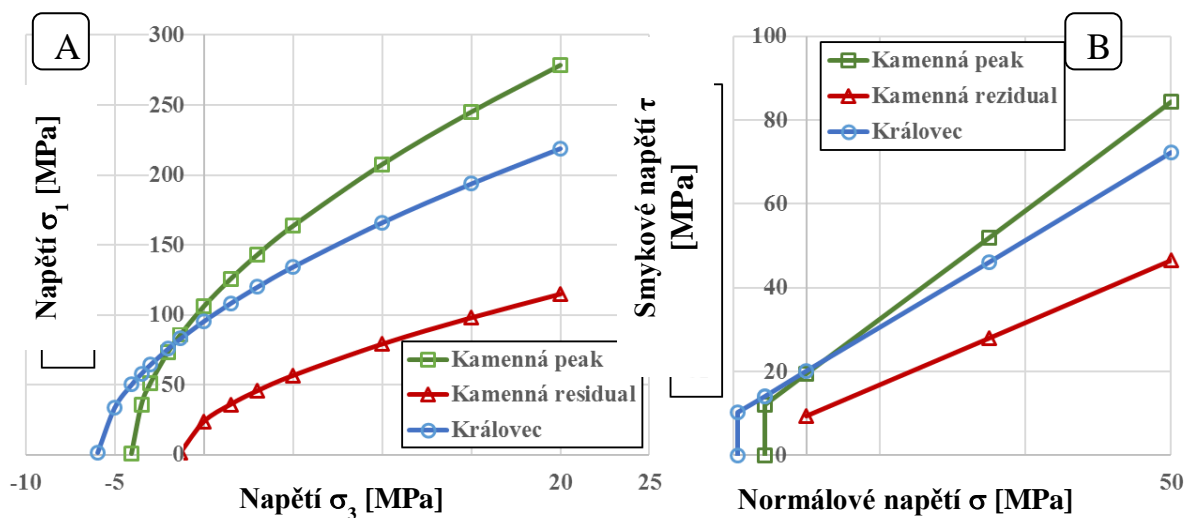
8 DISKUZE

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 sensitivní 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 pevností v příčném tahu na straně druhé. Toto je možné interpretovat v kontextu pozorovaného vyššího zastoupení přednostně orientovaných vyrostlic draselných živců s výbornou štěpností na lokalitě Kamenná (srov. kap. 7.1). 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. 37). Je ovšem třeba zdůraznit, že tyto parametry charakterizují pouze tektonicky neporušenou horninu, nikoliv celý horninový masiv s diskontinuitami.



Obr. 37: 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. 8 v kapitole 4.1).

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 $109,7 (\pm 5,5)$

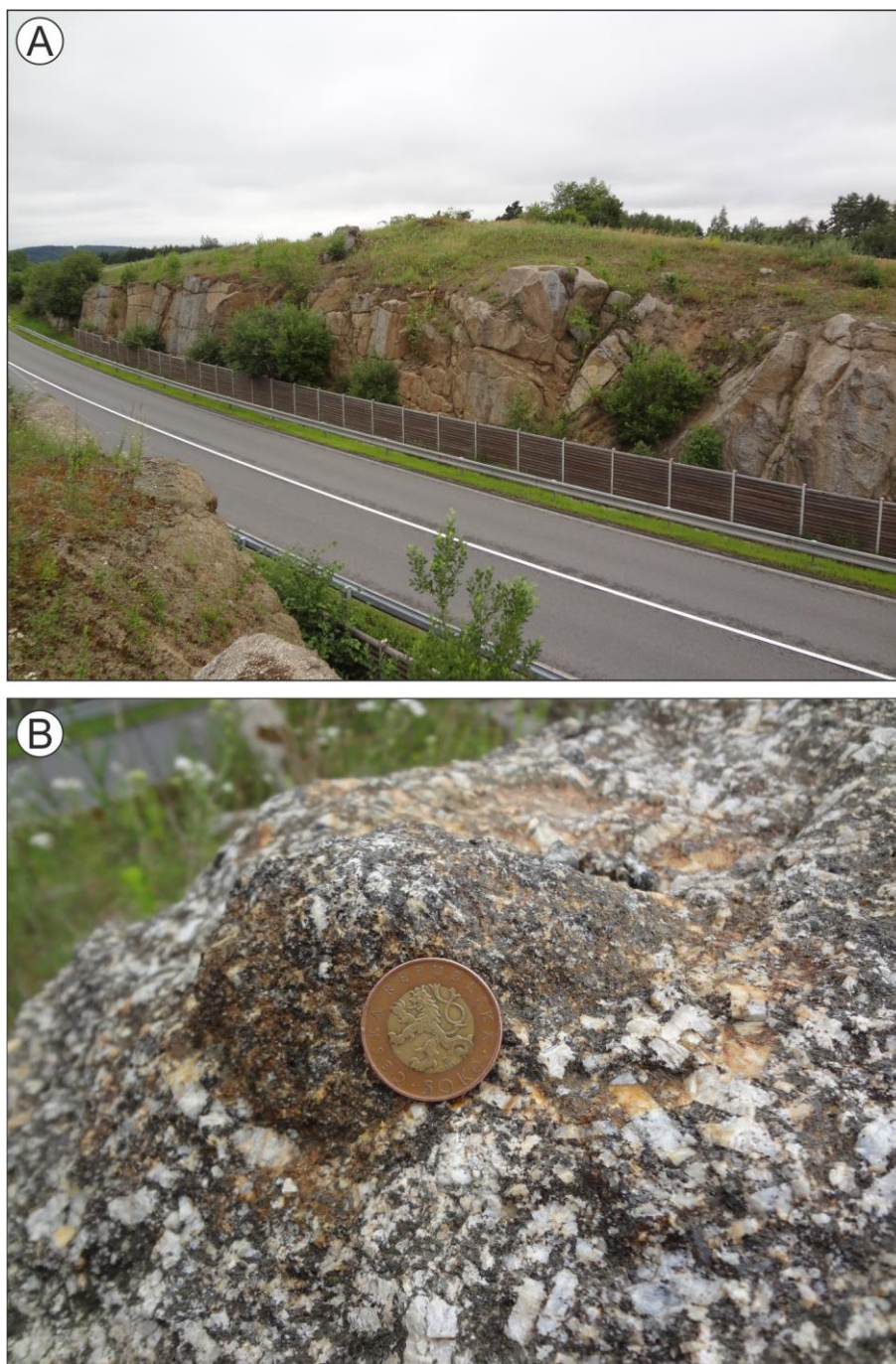
MPa, zatímco u vzorků z Oslavičky je to 73,7 ($\pm 10,3$) MPa. Modul pružnosti a Poissonovo číslo je $E = 55,2$ GPa; $\nu = 0,31$ (Kamenná) a $E = 19,9$ GPa; $\nu = 0,18$ (Oslavička). Pevnost v příčném tahu vyšla v průměru 5,7 ($\pm 0,96$) MPa (Kamenná) a 3,4 ($\pm 0,5$) MPa (Oslavička). Výrazný rozdíl 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 (srov. Tab. 1), zejména data pro UCS z práce Petružálka (2017) pravděpodobně korelují s navětráním testovaného materiálu (Obr. 38). 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.

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).



Obr. 38: **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 (srov. Petružálek et al. 2017). Autorka disertační práce se na základě provedeného studia domnívá, že tato lokalita není dostatečně reprezentativní. Foto: L. Krmíček.

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. 36). 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 ISRM (1978), 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. 37). 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 σ_t byla také vysoká (76 %), avšak v opačném trendu – parametr byl vyšší ve směru paralelním s foliací (srov. Tab. 38). Porovnáme-li parametry přetvárnosti, jsou mírně vyšší v případě, kdy je foliace orientována paralelně se zatížením. Oproti tomu, Poissonovo číslo ν je o 26 % nižší při stejné orientaci (srov. Tab. 36). Na základě zjištěných dat je tedy očekávaná anizotropie mechanických vlastností relativně nízká, s výjimkou parametrů m_i a σ_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 ν 0,19, maximální pevnost v podmínkách trojosého tlaku 310 MPa při plášťovém tlaku σ_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.

- Vzorok z Kraví hory jsou silně foliované (viz prezentované obrázky v práci Petružálka 2017) a více melanokrání, než je charakteristické pro typické felsické granulity. Vyšší obsah tmavých minerálů v hornině z Kraví hory může být indikován vyšší hustotou (2655 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.

9 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 hlubinné 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 foliáci.

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 vyrostlic 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 σ_1 roste úměrně komorovému tlaku σ_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 σ_{ci} v kritériu H-B (Hoek-Brown) byl snížen na 23 % a úhel tření φ 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 popsaná kvantifikace anizotropie horniny měla být považována spíše za přibližnou.

10 LITERATURA

ALTINDAG, R.; GÜNEY, A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. In: *Scientific Research and Essays*, 2010, 5, p. 2107–2118.

ANDREEV, G. E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: calculation formula. In: *International Journal of Mining Science and Technology*, 1991a, 13, p. 445–456.

ANDREEV, G. E. A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part II: contact conditions. In: *International Journal of Mining Science and Technology*, 1991b, 13, p. 457–465.

ASTM. Annual book of ASTM standards. Soil and rocks (I). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2004, D 420–5611.

ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Soil and Rock, Building Stones. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1984.

ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995, D 2938–2986.

AYDIN, A. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Cham: Springer international publishing Switzerland, 2015, p. 25–33.

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.

CARNEIRO, F. L. L. B. A new method to determine the tensile strength of concrete. In: *Proceedings of the 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, Section 3*, 1943, p. 126–129.

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 12390-6. Zkoušení ztvrdlého betonu – část 6: pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2001, 12 s.

ČSN EN 1926. Zkušební metody přírodního kamene – stanovení pevnosti v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2000, 11 s.

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 14688-1. Geotechnický průzkum a zkoušení – pojmenování a zařídování hornin – část 1: pojmenování a popis. Praha: Český normalizační institut, 2003, 16 s.

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.

EFIMOV, V. P. The rock strength in different tension conditions. In: *Journal of Mining Science*, 2009, 45, p. 569–575.

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

FUENKAJORN, K.; KLANPUHMEESRI, S. Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks. In: *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34, p. 1–6.

GOODMAN, R. E. Introduction to rock mechanics. New York: Wiley, 1989, 576 p.

GÖTZE, J. Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences. In: *Microscopy and Microanalysis*, 2012, 18, p. 1270–1284. DOI: 10.1017/S1431927612001122.

GREGEROVÁ, M.; FOJT, B.; VÁVRA, V. Mikroskopie horninotvorných a technických minerálů. Brno: Moravské zemské muzeum, 2002, 315 s.

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.
- HAJN, J. Tvrdoměrné metody v mechanice hornin. – *Bakalářská práce*. Brno: FAST VUT, 2011, 118 s.
- 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.
- HORÁK, V. Experiment v mechanice hornin a jeho realizace. – *Teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2001, 23 s.
- HORÁK, V.; PASEKA, A.; POSPÍŠIL, P. Inženýrská geologie a mechanika hornin. – *Učební text*. Brno: FAST VUT, 2005, 303 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.
- IAEA. Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. No. NW-T-1.19. In: *IAEA nuclear energy series*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. ISSN: 1995-7807.
- ISRM. Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon press, 1981, 211 p.
- ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Ankara: International Society for Rock Mechanics, 2007, 628 p.

ISRM. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Cham: Springer international publishing Switzerland, 2015, 94 p.

JAEGER, J. C. Failure of rocks under tensile conditions. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1967, 4, p. 219–227.

KOTKOVÁ, J. High-pressure granulites of the Bohemian Massif: recent advances and open questions. In: *Journal of Geosciences*, 2007, 52 (1-2), p. 45–71. DOI: 10.3190/jgeosci.006.

KOTKOVÁ, J., O'BRIEN, P. J. and ZIEMANN, M. Diamond and coesite discovered in Saxony-type granulite: Solution to the Variscan garnet peridotite enigma. In: *Geology*, 2011, 39, p. 667–670. DOI: 10.1130/G31971.1.

KOTKOVÁ, J.; SCHALTEGGER, U.; LEICHMANN, J. Two types of ultrapotassic plutonic rocks in the Bohemian Massif – Coeval intrusions at different crustal levels. In: *Lithos*, 2010, 115 (1), p. 163–176. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.11.016.

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.; HORÁK, V.; KUBOUŠKOVÁ, S.; PETRUŽÁLEK, M. Behaviour of multicomponent geomaterials: pilot experimental study in rock mechanics, *Procedia Engineering*, In: *Elsevier*, 2017, 191, Amsterdam, p. 31–35. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.150.

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. Posouzení vlivu přítomnosti kompozičně odlišných enkláv na fyzikálně-mechanické vlastnosti základových hornin z žulového a syenitového masivu: pilotní studie z ČR. Brno: VUTIUM, 2016. s. 1-38. 1. ISBN 978-80-214-5310- 4.

- 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.
- LEAKE, B. E.; WOOLLEY, A. R.; ARPS, C. E.; BIRCH, W. D.; GILBERT, W. D.; GRICE, J. D.; HAWTHORNE, F. C.; KATO, A.; KISCH, H. J.; KRIVOVICHEV V. G. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. In: *Mineralogical Magazine*, 1997, 61, p. 295–321. DOI: 10.1180/minmag.1997.061.405.13.
- 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.
- LI, D.; WONG, L. N. Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. In: *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46, p. 269–287. DOI: 10.1007/s00603-012-0257-7.
- MACKENZIE, W. S.; DONALDSON, C. H.; GUILFORD, C. *Atlas of igneous rocks and their textures*. New York: Longman, 1997, 148 p.
- MELLOR, M.; HAWKES, I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli. In: *Engineering Geology*, 1971, 5 (3), p. 173–225. DOI: 10.1016/0013-7952(71)90001-9.
- 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.
- O'BRIEN, P. J. Type-locality granulites: high-pressure rocks formed at eclogite-facies conditions. In: *Mineral. Petrol.*, 2006, 86, p. 161–175. DOI: 10.1007/s00710-005-0108-2.
- PAGEL, M.; BARBIN, V.; BLANC, P.; OHNENSTETTER, D. Cathodoluminescence in geosciences: an introduction. In: *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin: Springer, 2000, p. 1–21.
- PANDEY, P.; SINGH, D. P. Deformation of a rock in different tensile tests. In: *Engineering Geology*, 1986, 22, p. 281–292.
- PARKER, S. P. *Dictionary of Earth Science 2nd Edition*, New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2003, 468 p.

PAVLÍK, J. Srovnání tvrdosti hornin zjištěných Schmidovým kladívkem in situ s některými laboratorními zkouškami. – *Nepublikovaná zpráva*. Brno: GEOTEST, 1973, 27 s.

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

PETRUŽÁLEK, M.; LOKAJÍČEK, T.; SVITEK, T.; JECHUMTÁLOVÁ, Z.; KOLÁŘ, P.; ŠÍLENÝ, J. Fracturing of Migmatite Monitored by Acoustic Emission and Ultrasonic Sounding. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (1), p. 47–59. DOI:10.1007/S00603-018-1590-2.

POKORNÝ, M. Matematické metody vyhodnocování experimentů: Modul: Exaktní metody řešení projektů VaV. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010, 58 s. ISBN 987-80-87240-29-8.

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

REIMER, L. Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis. Berlin: Springer, 1998, 527 p.

RIEDER M.; CAVAZZINI, G.; D'YAKONOV, Y. S.; FRANK-KAMENETSKII, V. A.; GOTTARDI, G.; GUGGENHEIM, S.; KOVAL, V.; MOLLER, G.; NEIVA, A. M. R.; RADOSLOVICH, E. W.; ROBERT, J. L.; SASSI, F. P.; TAKEDA, H.; WEISS, Z.; WONES, D. R. Nomenclature of the micas. In: *Clays and clay minerals*, 1998, 46, p. 586–595.

RÖTZLER, J.; ROMER, R.L. P–T–t evolution of ultrahightemperature granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany, Part I: Petrology. In: *J. Petrol.*, 2001, 42. DOI: 10.1093/petrology/42.11.2015.

SAGAWA, A. Exotic crustal components at the northern margin of the Bohemian Massif—Implications from U–Th–Pb and Hf isotopes of zircon from the Saxonian Granulite Massif. In: *Tectonophysics*, 2016, 681, p. 234–249. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.04.013.

SŁABY, 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.

ULUSAY, R.; HUDSON, J. A. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. April 2007 ed. Ankara, Turkey: Commission on Testing Methods, International Society of Rock Mechanics, 2007. ISBN 9789759367541.

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.; DIEDERICHS, 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.

YAŞAR, E.; ERDOĞAN, Y. Estimation of rock physicommechanical properties using hardness methods. In: *Engineering Geology*, 2004, 71, p. 281–288. DOI: 10.1016/S0013-7952(03)00141-8.

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

ZÁRUBA, Q.; MENCL, V. Inženýrská geologie. Praha: Academia, 1974, 511 s.

ZAVORAL, J; CINK, R. Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. III. Mechanika hornin. Praha: Český geologický úřad, 1987, 90 s.

Internetové zdroje:

CONTROLS-GROUP: Rock mechanics. Photo. 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 [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

PROTEXT: SÚRAO a finská Posiva podepsaly memorandum o spolupráci. *Tisková zpráva*. www.protext.cz [online]. Praha, 2015. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.protext.cz/zprava.php?id=24191>

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

SÚRAO: Lokalita Kraví hora, topogr. situace, 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 [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 [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 [online]. Praha, 2018d. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/zkoumane-lokality>

ÚGV PřF MU. www.ugv.sci.muni.cz [online]. 2018. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://ugv.sci.muni.cz/veda-a-vyzkum/sluzby/pracoviste-elektronove-mikroskopie-a-mikroanalyzy>

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ukázka elektronové mikrosondy CAMECA SX100. Foto: ugv.sci.muni.cz 2018.

Obr. 2: Terénní studium skleroskopické tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka typu L.

Obr. 3: Podélný řez Schmidtovým kladívkem. Upraveno podle manuálu výrobce modelu H-2987 (Humboldt Mfg. Co., USA).

Obr. 4: Korelační závislost mezi odskokem Schmidtova kladívka typu L a jednoosou tlakovou pevností horniny. Překresleno podle Bieniawského (1984).

Obr. 5: Příprava na testování pevnosti v jednoosém tlaku pomocí laboratorního lisu ADVANTEST 9 ROCK.

Obr. 6: 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.

Obr. 7: Hlavní uvažované lokality pro výstavbu hlubinného úložiště mimo lokalit v bezprostředním okolí jaderných elektráren. Zdroj: Český rozhlas (2016).

Obr. 8: Topografická situace lokality Horka (Holub et al. 2012).

Obr. 9: 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).

Obr. 10: Bloky částečně opracovaných durbachitů (syenitů) těžných v lomu Kamenná.

Obr. 11: Topografická situace na lokalitě Kraví hora (SÚRAO 2018a).

Obr. 12: 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 (Kraví hora) pro konstrukci podzemního úložiště jaderného odpadu je označena šedou hvězdičkou. Upraveno podle Krmíčka et al. (2011) a Havlíčkové et al. (2019).

Obr. 13: Příklad felsických (světlých) granulitů z Českého masivu. **A** – Vzorek granulitu z Justiho typové lokality – Lamberk v náměšťském granulitovém masivu; **B** – Charakteristický granulit ze saského granulitového masivu (lokality Sachsenburg); **C** – Zvětralý granulit z oblasti Kraví hory, jedné z potenciálních lokalit pro vybudování podzemního úložiště jaderného odpadu; **D** – Úlomek granulitu ze zkoumaných větších bloků vzorkovaných v aktivním kamenolomu Horní Bory (viz kapitola 4.4.1). Havlíčková et al. (2019).

Obr. 14: **A** – Terénní odběr vzorků granulitů u potoka Bobruvka, obec Habří.; **B, C** – granulity odkryté v lomu v Horních Borech. Foto: L. Krmíček.

Obr. 15: Pracovní diagram z průběhu triaxiální zkoušky dvou kompozitních vzorků syenit–enkláva při komorovém tlaku 5 MPa. Převzato z publikace Krmíčka a Závackého (2017). V pracovním diagramu je možné rozlišit několik fází chování testovaného geomateriálu: Fáze 1 – materiál se chová nelineárně a dochází k postupnému zpevňování. V důsledku toho roste tuhost materiálu a křivka pracovního diagramu se napřimuje. To je způsobeno z části mineralogickým složením, kdy minerály obsahují velké množství vnitřních defektů a z části také mikrotrhlinami v hornině. Fáze 2 – Po zpevnění se materiál začne chovat lineárně až do oblasti těsně před porušením. Fáze 3 – Jedná se o oblast maximální pevnosti, kde dochází k porušení vzorku. V této oblasti se materiál chová nelineárně a dochází zde k velkému přírůstku deformací za relativně malého přírůstku napětí. Fáze 4 – Po porušení dochází ke změkčování materiálu, které je způsobeno postupným rozvojem trhlin. Pevnost se zvolna ustaluje na své reziduální hodnotě. Fáze 5 – Je dosaženo reziduální pevnosti. Při této pevnosti již napětí není závislé na deformaci a jeho hodnota zůstává konstantní při libovolně velkém přetvoření.

Obr. 16: Ukázka testovaného tělesa durbachitu z lokality Kamenná (třebíčský masiv).

Obr. 17: Měřicí přístroj ADVANTEST 9 ROCK od italského výrobce Controls Group využívaný v laboratoři vědecko-výzkumného centra AdMaS. Foto: www.controls-group.com.

Obr. 18: Ukázka testovaného tělesa granulitu z lokality Horní Bory (strážecké moldanubikum).

Obr. 19: Orientace zkušebních vzorků vůči foliaci (Havlíčková et al. 2019).

Obr. 20: Ukázka kontaktu mafické enklávy a syenitu s vyrostlicemi K-živců z lokality Kamenná. Foto: L. Krmíček.

Obr. 21: **A** – Zonalita draselného živce je zvýrazněna střídáním tmavě a světle modře luminescentních zón (CL; Kamenná). **B** – Celkový charakter durbachitu z Kamenné – převažují K-živce (Kfs), hojně je zastoupený biotit (Bt) a amfibol (Amp), v menším množství se objevuje křemen (Qz); foto ve zkřížených nikolech (XPL). **C** – 2 mm velký zdvojitý amfibol (Amp) s inkluzemi apatitu (Ap) a zirkonu (Zrn). **D** – Amfibol (Amp) s relikty staršího pyroxenu (Px) obklopený křemenem (Qz) a K-živcem (Kfs) a s inkluzemi pyrhotinu (Po) a apatitu (Ap). Foto ve zpětně odražených elektronech. **E** – Zonální allanit (Aln) s okolními zrny apatitu (Ap) obklopený K-živcem (Kfs) a křemenem (Qz). **F** – Střídající se zóny v krystalu zirkonu. Tyto akcesorické minerály s Th a U jsou hlavním zdrojem zvýšené radioaktivity durbachitů třebíčského masivu. Foto ve zpětně odražených elektronech.

Obr. 22: **A** – Pozice živců z durbachitu z Kamenné v ternárním klasifikačním diagramu. **B** – Pozice tmavých slíd z durbachitu z Kamenné v klasifikačním diagramu Riedera et al. (1998). **C** – Pozice amfibolů z durbachitu z Kamenné v klasifikačním diagramu Leakeho et al. (1997).

Obr. 23: Celkový pohled na distribuci minerálů v granulitu z Horních Borů (PPL).

Obr. 24: **A** – Biotit (Bt) z Horních Borů, Grt = granát, 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 jemnozrnější 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.

Obr. 25: **A** – Pozice živců ve vzorcích granulitu z Horních Borů a Habří v ternárním klasifikačním diagramu. **B** – Pozice tmavých slíd ve vzorcích granulitů z Horních Borů a Habří v klasifikačním diagramu Riedera et al. (1998).

Obr. 26: Ukázka tahového porušení vzorků durbachitu z Kamenné.

Obr. 27: **A** – Porušení vzorku durbachitu z Kamenné po triaxiální zkoušce; **B** – Detail střížných trhlin s kulisovitým uspořádáním typu *en echelon* (např. Davis et al. 2011).

Obr. 28: Pracovní diagram z průběhu triaxiálních zkoušek durbachitů z Kamenné (Šujanská et al. 2018 – upraveno). Podrobná interpretace jednotlivých fází pracovního diagramu je uvedena v popisu Obr. 15.

Obr. 29: Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek durbachitu z Kamenné, kde c = soudržnost, φ = úhel vnitřního tření.

Obr. 30: Grafy čar porušení H-B (Hoek-Brown) (**A**) a M-C (Mohr-Coulomb) (**B**) kritéria. Upraveno podle Šujanské et al. (2018).

Obr. 31: Ukázka tahového porušení vzorků granulitu z Horních Borů.

Obr. 32: Ukázka křehkého porušení vzorků granulitu z Horních Borů po jednoosé tlakové zkoušce.

Obr. 33: Diagramy napětí–deformace UCS testů s vnesenou deformací s fází po porušení. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Obr. 34: Diagramy napětí–deformace UCS testů s rozlišenými komponentami deformace vnesené vůči maximální osově pevnosti. Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – objemová deformace; křivka „3“ – osová deformace. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Obr. 35: Vztah poměrného přetvoření a napětí granulitu u trojosých testů u vzorků BO-2a (**A**) a BO-2b (**B**). Křivka „1“ – radiální deformace; křivka „2“ – osová deformace. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Obr. 36: Diagram s vnesenými Mohrovými kružnicemi pro data z triaxiálních zkoušek granulitu – Horní Bory, kde c = soudržnost, φ = úhel vnitřního tření. Vzorek BO2A – kolmý k foliaci, BO2B – rovnoběžný s foliací.

Obr. 37: 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).

Obr. 38: 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 (srov. Petružálek et al. 2017). Autorka disertační práce se na základě provedeného studia domnívá, že tato lokalita není dostatečně reprezentativní. Foto: L. Krmíček.

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Ukázka stanovení hodnot objemové hmotnosti pro horniny východní granitoidní zóny brněnského masivu. Upraveno z práce Hanáka a Horáka (1988).

Tab. 2 – Klasifikace hornin podle pevnosti v jednoosém tlaku podle ČSN EN ISO 14689-1:2004.

Tab. 3 – Srovnání výsledků pevností v příčném tahu s výsledky pevností v jednoosém tahu různých horninových typů (Li a Wong 2013 – upraveno).

Tab. 4 – Střední hodnoty vybraných mechanických vlastností hornin na PVP Bukov. Převzato ze Součka et al. (2017).

Tab. 5 – Výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granulitu z lokality Kraví hora (Petružálek 2017).

Tab. 6 – Fyzikální vlastnosti granulitu z lokality Kraví hora (Petružálek 2017). Suchá objemová hmotnost ρ_{DRY} , nasycená objemová hmotnost ρ_{SAT} , specifická objemová hmotnost ρ_{SPEC} , celková pórovitost N_C a efektivní pórovitost N_{EF} .

Tab. 7 – Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem \pm je směrodatná odchylka. Vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C. Převzato z práce Petružálka (2017).

Tab. 8 – Výsledky triaxiálních zkoušek granulitu z Kraví Hory (Petružálek 2017).

Tab. 9 – Výsledky testování granolitů v příčném tahu pomocí tzv. brazilské zkoušky a porušené vzorky po této zkoušce (Petružálek 2017).

Tab. 10 – Fyzikální vlastnosti durbachitu (Petružálek 2017). Suchá objemová hmotnost ρ_{DRY} , nasycená objemová hmotnost ρ_{SAT} , specifická objemová hmotnost ρ_{SPEC} , celková pórovitost N_C a efektivní pórovitost N_{EF} .

Tab. 11 – Výsledky zkoušek v prostém tlaku durbachitu z lokality Horka (Petružálek 2017).

Tab. 12 – Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem \pm je směrodatná odchylka; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C (Petružálek 2017).

Tab. 13 – Výsledky triaxiálních zkoušek durbachitu z Horky (Petružálek 2017).

Tab. 14 – Výsledky testování granolitů v příčném tahu pomocí tzv. brazilské zkoušky a porušené vzorky po této zkoušce (Petružálek 2017).

Tab. 15 – Objemová hmotnost [ρ], pevnost v odskoku [R], odvozená jednoosá tlaková pevnost [UCS] a nepřímá pevnost v tahu [σ_t] multikomponentních geomateriálů (převzato z práce Krmíčka a Závackého 2017).

Tab. 16 – Trojosá tlaková pevnost [TCS], jednoosá tlaková pevnost [UCS] a moduly pružnosti hornin z třebíčského masivu (převzato z publikace Krmíčka a Závackého 2017).

Tab. 17 – Kvantily rozdělení T_L . Převzato z práce Pokorného (2010).

Tab. 18 – Testované vzorky (viz Obr. 19).

Tab. 19 – Reprezentativní složení živců v testovaném durbachitu.

Tab. 20 – Reprezentativní složení tmavých slíd v testovaném durbachitu.

Tab. 21 – Reprezentativní složení amfibolů v testovaném durbachitu.

Tab. 22 – Reprezentativní složení živců v testovaném granulitu.

Tab. 23 – Reprezentativní složení tmavých slíd v testovaném granulitu.

Tab. 24 – Reprezentativní složení granátů v testovaném granulitu.

Tab. 25 – Hodnoty skleroskopické tvrdosti durbachitů z Kamenné s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

Tab. 26 – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti ($R_{\text{korigovaná}}$) durbachitu a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS_o) podle Bieniawského (1984; Obr. 4).

Tab. 27 – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u hodnoty $R_{\text{korigované}}$ pro durbachit.

Tab. 28 – Naměřená data pevnosti v příčném tahu a jednoosé tlakové pevnosti.

Tab. 29 – Hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla.

Tab. 30 – Hodnoty naměřené při triaxiálním testování durbachitů.

Tab. 31 – Parametry podmínek porušení H-B (Hoek-Brown) a M-C (Mohr-Coulomb).
Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Tab. 32 – Skleroskopická tvrdost granulitů z Horních Borů s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

Tab. 33 – Skleroskopická tvrdost granulitů z Habří s průměrnými korigovanými hodnotami odrazu kladívka ($R_{\text{korigovaná}}$).

Tab. 34 – Průměrné hodnoty skleroskopické tvrdosti granulitů ($R_{\text{korigovaná}}$) a z nich odvozené hodnoty jednoosé tlakové pevnosti (UCS_0) podle Bieniawského (1984; Obr. 4).

Tab. 35 – Hodnoty dolního 5% kvantilu rozdělení u $R_{\text{korigované}}$ pro vzorky z lokality Horní Bory a Habří.

Tab. 36 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti testovaného granulitu z lokality Horní Bory.
Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Tab. 37 – Maximální napětí dosažená během trojosých testů. Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).

Tab. 38 – Parametry Hoek-Brownova kritéria porušení s ohledem na orientaci foliace.
Upraveno podle Havlíčkové et al. (2019).