



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**STUDIUM PEVNOSTNÍCH CHARAKTERISTIK
GRANITOIDNÍCH HORNIN MOLDANUBICKÉHO
PLUTONU VE VZTAHU K PLÁNOVANÉMU
HLUBINNÉMU ÚLOŽIŠTI RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ**

MECHANICAL PROPERTIES OF GRANITOID ROCKS OF THE MOLDANUBIAN
BATHOLITH IN THE CONTEXT OF A PLANNED DEEP UNDERGROUND RADIOACTIVE
WASTE REPOSITORY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Brabec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LUKÁŠ KRMÍČEK, Ph.D.

BRNO 2022

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studium pevnostních charakteristik granitoidních hornin moldanubického plutonu ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 23. 5. 2022

Marek Brabec

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium pevnostních charakteristik granitoidních hornin moldanubického plutonu ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2022

Marek Brabec

autor práce



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Marek Brabec
Název	Studium pevnostních charakteristik granitoidních hornin moldanubického plutonu ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů
Vedoucí práce	doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ASTM. Annual book of ASTM standards. Soil and rocks (I). Philadelphia: American Society for Testing

and Materials, 2004, D 420–5611.

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

ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Ankara: International Society for Rock Mechanics, 2007, 628 s.

ISRM. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2015, 94 s.

ZANG, A.; STEPHANSSON, O. Stress field of the Earth's crust. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2009, 322 s.

ZÁVACKÝ, M.; ŠTEFAŇÁK, J. Geotechnická laboratoř ve výzkumném centru AdMaS. Tunel, 2018, 27, 4, 23–29.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Česká republika je zemí, která využívá jadernou energetiku. Jako taková nese také zodpovědnost za bezpečné nakládání s odpady, které vznikají. Za nejbezpečnější řešení, jak nejlépe izolovat tzv. vysokoaktivní odpady od životního prostředí, je považováno hlubinné úložiště. 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.

Cílem bakalářské práce bude zhodnocení pevnostních charakteristik hornin v širším okolí jedné ze čtyř uvažovaných lokalit – Hrádek na Jihlavsku. Z odebraných hornin budou zhotoveny jednak petrografické výbrusy, jednak horninové vývrty, které budou dále otestovány ultrazvukovou impulsovou metodou a následně podrobeny destruktivním zkouškám v rámci geotechnické laboratoře ve vědecko-výzkumném centru AdMaS.

Výsledky studia pevnostních charakteristik budou prezentovány formou přehledných tabulek a grafů a budou též náležitě okomentovány v textové části bakalářské práce.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Autor této práce provedl studium mechanických a fyzikálních vlastností granitů vystupujících jak na vrcholu Čeřínek, který představuje centrální část vytyčeného polygonu lokality pro hlubinné úložiště – Hrádek, tak v nedalekém aktivním lomu Rácov poblíž obce Růžená. V teoretické části práce je popsána geologie zkoumané lokality, a také metody použité při stanovení zkoumaných vlastností. V praktické části jsou uvedeny a diskutovány získané výsledky a výstupy provedených terénních a laboratorních měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mechanika hornin, moldanubický pluton, žula, laboratorní zkoušky, mechanické vlastnosti, triaxiální pevnost, jednoosá tlaková pevnost, skleroskopická tvrdost, ultrazvuková impulzová metoda, hlubinné úložiště, jaderný odpad

ABSTRACT

The author of this bachelor thesis carried out a study of the mechanical and physical properties of granites exposed both on Čeřínek hill, which represents the central part of the delineated polygon of the Hrádek site, and in the nearby active Rácov quarry near the village of Růžená. In the theoretical part of the thesis the author describes the geology of the investigated site and the methods used to determine the investigated properties. In the practical part of the thesis the results and outputs obtained from the measurements are mentioned and discussed. The practical part of the thesis presents and discusses the results and outputs obtained from field and laboratory measurements.

KEYWORDS

Rock mechanics, Moldanubian Batholith, granite, laboratory tests, mechanical properties, triaxial strength, uniaxial compressive strength, Schmidt hammer hardness, ultrasonic pulse velocity method, deep underground repository, radioactive waste

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Marek Brabec *Studium pevnostních charakteristik granitoidních hornin moldanubického plutonu ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů*. Brno, 2022. 66s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. RNDr. Lukáši Krmíčkoví, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a informace, vstřícný přístup a za umožnění práce na zajímavém tématu. Dále pak Ing. Martinovi Závackému, Ph.D. za pomoc při zaškolení a odborné rady ohledně provádění laboratorních zkoušek hornin, Ing. Tomáši Chorazymu, Ph.D. za umožnění práce v laboratoři ve výzkumném centru AdMaS, doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc. za realizaci ultrazvukové impulzové metody na horninových tělesech, doc. Ing. Vladislavu Horákovi CSc. za zapůjčení Schmidtova kladívka a poskytnutí cenných rad, Ing. Petru Žíttovi a doc. Ing. Petru Cikrlemu Ph.D. za vyčištění a kalibraci Schmidtova kladívka, a také Ing. Antonínu Ješinovi za prohlídku lomu Rácov a umožnění odběru vzorků. Rovněž bych rád poděkoval ostatním pracovníkům Ústavu geotechniky za cenné rady a vytvoření příjemného prostředí pro vypracování bakalářské práce. Velký dík patří také mé rodině a přátelům za morální oporu, pomoc a dobré podmínky pro studium.

V Brně dne 23. 5. 2022

Marek Brabec

autor práce

OBSAH

1 Úvod	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Problematika hlubinných úložišť jaderného odpadu	10
2.2 Geologická charakteristika studovaných lokalit.....	11
2.2.1 Čertův Hrádek.....	13
2.2.2 Lom Rácov.....	14
2.3 Měření radioaktivity hornin	15
2.4 Petrografický rozbor	16
2.4.1 Zvětrávání a alterace	16
2.4.2 Sericitizace živců.....	16
2.4.3 Chloritizace biotitu.....	16
2.5 Vybrané fyzikální vlastnosti	17
2.5.1 Objemová hmotnost	17
2.5.2 Nasákavost	17
2.6 Vybrané mechanické vlastnosti	18
2.6.1 Nedestruktivní metody	18
2.6.1.1 Ultrazvuková impulzová metoda	18
2.6.1.2 Skleroskopická tvrdost horniny	20
2.6.2 Destruktivní metody	23
2.6.2.1 Pevnost v jednoosém tlaku (UCS).....	23
2.6.2.2 Pevnost v příčném tahu.....	25
2.6.2.3 Triaxiální pevnost	26
3 Praktická část.....	28
3.1 Odběr vzorků a zhotovení zkušebních těles	28

3.2	Radioaktivita zkoumaných hornin	30
3.3	Petrografické studium výbrusů	31
3.4	Určení fyzikálních vlastností	35
3.4.1	Určení objemové hmotnosti.....	35
3.4.2	Orientační stanovení nasákavosti	36
3.5	Určení mechanických vlastností	37
3.5.1	Nedestruktivní metody	37
3.5.1.1	Ultrazvuková impulzová metoda	38
3.5.1.2	Skleroskopická tvrdost.....	39
3.5.2	Destruktivní metody	42
3.5.2.1	Pevnost v jednoosém tlaku.....	42
3.5.2.2	Pevnost v příčném tahu.....	46
3.5.2.3	Triaxiální pevnost	48
3.6	Mohr-Coulombova podmínka porušení	51
4	Shrnutí dosažených výsledků.....	52
5	Závěr	55
6	Použité zdroje	57
7	Seznam obrázků.....	60
8	Seznam tabulek	63
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	64
9.1	Seznam použitých zkratk	64
9.2	Seznam použitých symbolů.....	65

1 ÚVOD

Jedním z problémů jaderné energetiky je vznikající jaderný odpad. Aktuálně nejlepším a nejbezpečnějším způsobem, jak s vysokoaktivním odpadem finálně naložit, je uložit jej do hlubinného úložiště a tím jej izolovat od okolí. Nejprve je nutné najít vhodné horninové těleso s dostatečnou velikostí a s vyhovujícími pevnostními charakteristikami. Vzhledem k tomu, že úložiště by se mělo nacházet hloubce okolo 500 m pod povrchem, je jedním z důležitých kritérií vyhovující trojosá tlaková pevnost horniny. V České republice pro vybudování úložiště připadají v úvahu jak vyvřelé horniny (granitoidy, syenitoidy), tak metamorfované horniny (ruly, granulity). Aktuálně byl výběr zúžen na čtyři vhodné lokality, které budou podrobněji posuzovány. Jedná se o lokality Březový potok na Klatovsku, Horka na Třebíčsku, Hrádek na Jihlavsku a Janoch poblíž jaderné elektrárny Temelín. [1]

Předmětem této bakalářské práce je studium fyzikálních a mechanických vlastností hornin moldanubického plutonu nacházejících se na lokalitě Čertův Hrádek. Tato lokalita vystupuje v centrální části vytyčeného polygonu potenciální lokality pro hlubinné úložiště Hrádek. Pro srovnání byly rovněž studovány vzorky čerstvých hornin těžených v nedalekém aktivním lomu Rácov poblíž obce Růžená.

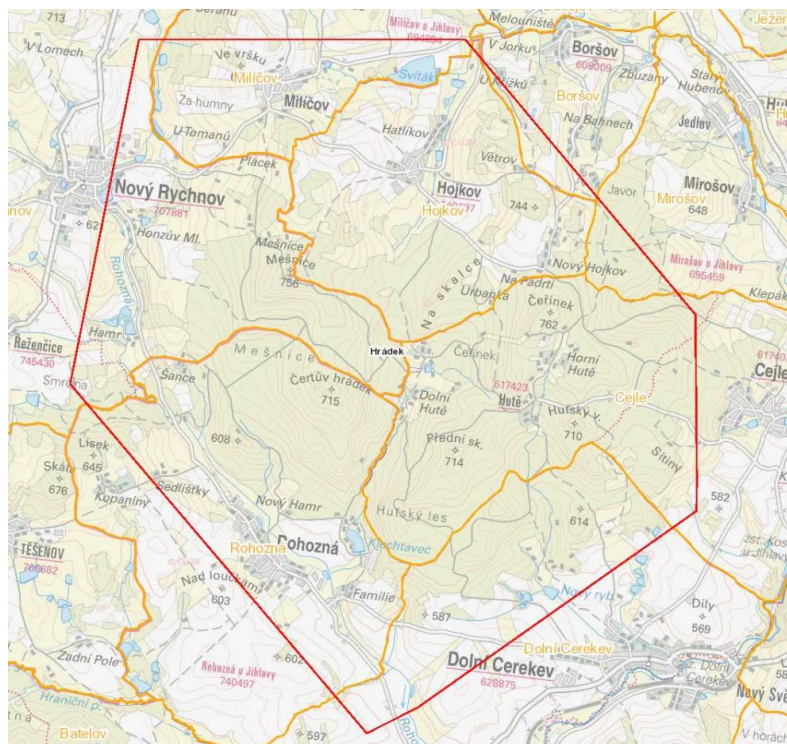
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Problematika hlubinných úložišť jaderného odpadu

Výstavbu hlubinného úložiště provází již od počátku velké množství výzev, které je třeba vyřešit. Kromě samotné výstavby úložiště je nezbytné zohlednit také jeho vliv na okolní obce, krajinu a životní prostředí. [1] Pro bezpečné fungování úložiště je tedy důležité vytvořit systém inženýrských a přírodních bariér.

Úložiště se skládá z nadzemní a podzemní části. Nadzemní část je tvořena povrchovým areálem, který zajišťuje zázemí nutné pro fungování celého úložiště, tzn. objekty pro přípravu odpadů, přípravu bentonitu (bentonit je pokládán za ideální jílovitý materiál k „utěsnění“ ukládacích obalových souborů v úložišti), dílny, sklady, administrativní budovy a objekty pro nakládání s vytěženou rubaninou. Podzemní část se skládá z konfirmační laboratoře a samotného úložného prostoru. Konfirmační laboratoř slouží k finálnímu potvrzení vlastností horninového masivu. Úložný prostor tvoří rozsáhlá síť podzemních chodeb určená pro ukládání a zapečetění jaderného odpadu.

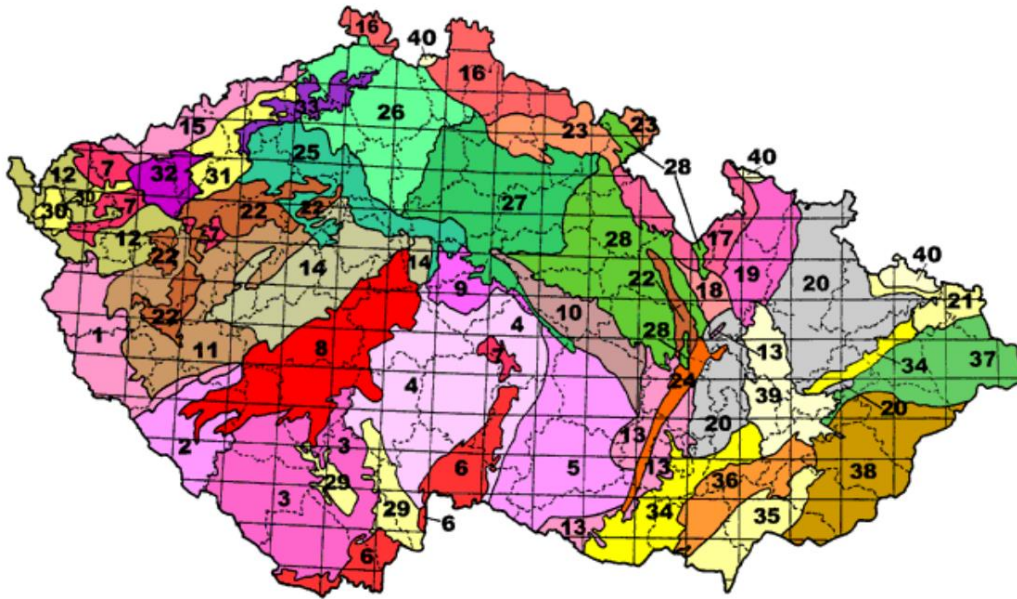
Hlubinné úložiště jako takové má čtyři fáze životního cyklu. V první fázi probíhá potřebná příprava pro realizaci jaderného úložiště, tzn. detailní průzkum horninového masivu, monitoring vody, místního klimatu, radonu a seismicity v dané oblasti a samozřejmě projektové řešení celého úložiště. Druhá fáze zahrnuje výstavbu nadzemní i podzemní části úložiště. Nejprve se vybuduje konfirmační laboratoř, po ověření vlastností horniny i v hloubce následuje ražba nejdůležitější části úložiště a to samotných chodeb pro uložení odpadu. V třetí fázi již dochází k postupnému plnění chodeb jaderným odpadem a jejich zapečetění. Po naplnění úložiště, odhadem po 100 letech, nastane čtvrtá fáze, uzavření úložiště. Dojde k uzavření veškerých chodeb a přístupových tunelů a k odstranění a rekultivaci povrchového areálu. Úložiště bude od této doby pasivně plnit svou funkci po další stovky tisíc let. [1]



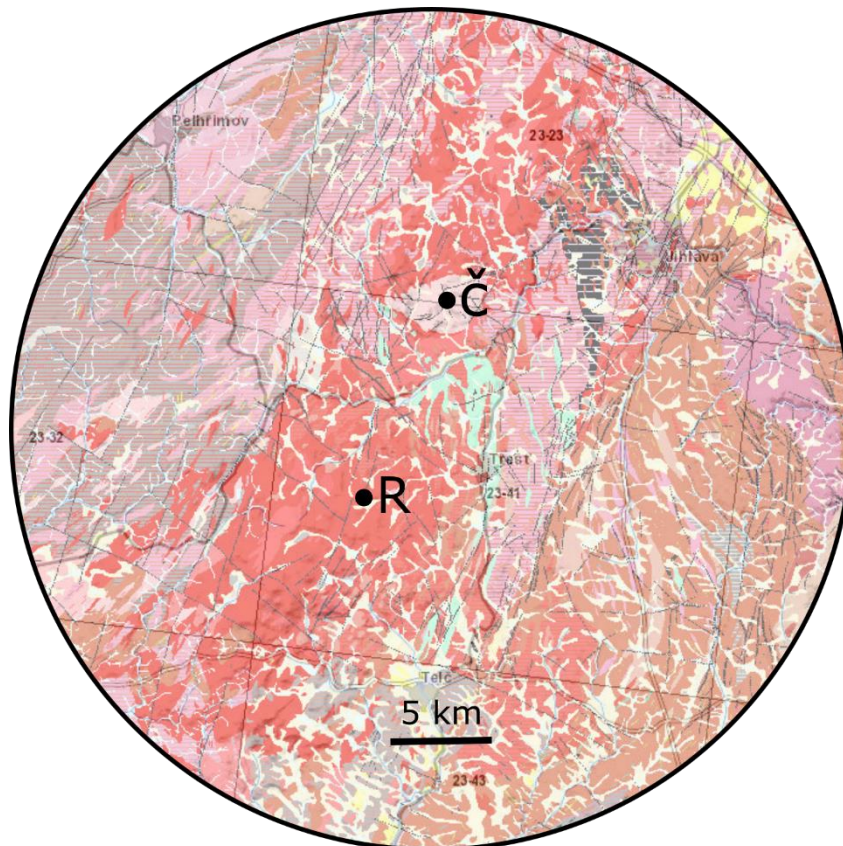
Obrázek 2-1: Vymezení vhodného polygonu na uvažované lokalitě Hrádek, převzato z [2]

2.2 Geologická charakteristika studovaných lokalit

Studované lokality Ráčov a Čertův Hrádek jsou součástí moldanubického plutonu, respektive moldanubického plutonického komplexu. [3] Jedná se o nejrozsáhlejší variský komplex vyvěřelých hornin v Českém masivu. Zabírá území o celkové rozloze 6000 km² a má přibližně podkovovitý tvar. [4] Jedna větev moldanubického plutonu vybíhá z Rakouska k SSV a tvoří střed Českomoravské vrchoviny (tzv. centrální větev), druhá větev směřuje k SZ na Šumavu a dále do Německa (tzv. šumavská větev). Hlavní litologickou náplň moldanubického plutonu představují různé typy granitoidních hornin. Nejrozšířenější jsou granity typu Eisgarn (u nás známé například jako mrákotínský nebo čiměřský typ). Jedná se o světlé dvojslídne žuly, většinou středně zrnité, s vyrostlicemi draselného živce. [5]



Obrázek 2-2: Zjednodušená geologická mapa ČR dle České geologické služby. Centrální větev moldanubického plutonu na mapě odpovídá číslu 6, převzato z [6]



Obrázek 2-3: Umístění studovaných lokalit v rámci centrální větve moldanubického plutonu (R = Rácov, Č = Čertův Hrádek), převzato a upraveno z [7]

2.2.1 Čertův Hrádek

Tato lokalita se nachází v centrální části moldanubického plutonu. Je tvořena hrubozrnným dvojslídovým granitem moldanubického plutonu typu Čeřínek, který někteří autoři považují za paralelu typu Landštejn. [8] V okolí se pak nachází také jemnozrnnější granity, křemenné žíly, migmatity a amfibolity. Žula, která obsahuje občasné vyrostlice, vykazuje charakteristickou lavicovitou odlučnost podle L-puklin. Díky přítomnosti příčných a podélných puklin (Q a S) se zde vyskytují četné puklinové jeskyně. [9] Některá ložiska této žuly jsou vhodná pro hrubou a ušlechtilou kamenickou výrobu. [10] V minulosti se zde těžilo stříbro, na což ukazuje přítomnost několika štol a propadlin, například štola Barbora nebo Prokop. Na lokalitě je možné pozorovat spoustu zajímavých geomorfologických jevů, jako jsou například mrazové sruby, skalní mísy a suťová pole [11].



Obrázek 2-4: Žulová skalní stěna mrazového srubu, Čertův hrádek, foto: autor



Obrázek 2-5: Ukázka puklinového systému, Čertův Hrádek, foto: autor

2.2.2 Lom Rácov

Jedná se o aktivní žulový lom o dvou etážích nacházející se asi 12 km jižně od Čertova Hrádku. Lom je geologicky součástí centrální větve moldanubického plutonu. Zdejší dvojslídňá žula, která je na rozdíl od Čertova Hrádku středně zrnitá až drobnozrná, bývá označována, jako typ Mrákotín. Kromě dalšího typu granitu (Řásná) se zde vyskytují také ostrohranné bloky migmatitů. Lokalita je geologicky velmi zajímavá, protože zachycuje proces vzniku a vývoje tělesa plutonu v závěru variského vrásnění. Docházelo zde k takzvanému magmatickému stopingu, tzn. pohlcování odlomených bloků horniny (v tomto případě migmatitu) vystupujícím magmatem. [12]



Obrázek 2-6: Pohled na dolní etáž lomu Rácov, foto: autor

2.3 Měření radioaktivity hornin

V horninách, respektive v jejich minerálech, se mohou vyskytovat přirozeně radioaktivní prvky, které vyzařují záření alfa, beta, gama i neutronové záření. Radioaktivita je u hornin nejčastěji určována pomocí spektrometrů měřením gama záření, jehož zdroji jsou hlavně draslík, uran a thorium. Radioaktivní draslík se v horninách vyskytuje ve formě izotopu ^{40}K , uran ve formě ^{238}U a ^{235}U a thorium ve formě ^{232}Th . Tyto izotopy uranu a thoria jsou také součástí dlouhých rozpadových řad, uran-radiové, uran-aktiniové a thoriové, do nichž také patří izotopy radonu. [13] Průměrné koncentrace radioaktivního draslíku se uvádí okolo 2,5%, uranu 2-3 ppm a thoria 8-12 ppm. [14]

Měření může probíhat buď v terénu, nebo v laboratoři. Pro terénní měření jsou výhodné přenosné gama spektrometry, které stačí jen usadit na horninový vzorek a aktivovat měření. Výsledkem měření pak je obsah radioaktivního draslíku, uranu a thoria. Z naměřených hodnot pak lze také stanovit hmotnostní aktivitu ekvivalentu ^{226}Ra [15]:

$$a_m = 12,35 \cdot U + (1,43 \cdot 4,06 \cdot Th) + (0,077 \cdot 313 \cdot K) \quad [\text{Bq/kg}] \quad (2.1)$$

kde: U ... naměřený obsah radioaktivního uranu, [ppm]

Th ... naměřený obsah radioaktivního thoria, [ppm]

K ... naměřený obsah radioaktivního draslíku, [%]



Obrázek 2-7: Gama spektrometr GR-130 (Exploranium), foto: autor

2.4 Petrografický rozbor

Jedná se o komplexní popis zkoumané horniny, zahrnuje makroskopický a mikroskopický popis horniny, její minerální složení a strukturu, případné porušení, zvětrání nebo alteraci horniny. V praxi se provádí mikroskopické studium horninových vzorků (pomocí binokulárního mikroskopu) a z nich zhotovených výbrusů (pomocí polarizačního mikroskopu). V případě studia pomocí polarizačního mikroskopu existují dva typy režimů, a to pozorování v lineárně polarizovaném světle (PPL) nebo se zkříženými polarizátory (XPL). Dále v této podkapitole jsou popsány vybrané procesy mající vliv na výslednou petrografickou charakteristiku granitů zkoumaných v této práci. [16]

2.4.1 Zvětrávání a alterace

Zvětráváním rozumíme veškeré změny v horninách a minerálech, které jsou následkem kontaktu s atmosférou a hydrosférou. Tyto změny probíhají výhradně jen v nejhornější vrstvě zemské kůry. Dochází zde ke kombinaci geologických, fyzikálních a chemických procesů s vlivem gravitace, klima, povrchové a podzemní vody a v neposlední řadě organismů. Podle typu činitele můžeme zvětrávání rozdělit na mechanické a chemické. [17]

Alterace na rozdíl od zvětrávání probíhá i pod povrchem, ať už při metamorfóze hornin, nebo vlivem hydrotermálních fluid. V průběhu dochází, podobně jako při zvětrávání, ke změně chemického složení minerálů.

2.4.2 Sericitizace živců

Jedná se o jeden z nejběžnějších typů hydrotermální alterace. [18] V jejím průběhu dochází k postupné přeměně živce na různé jílovité minerály. Sericitizace se projevuje nejprve zakalením, pak postupným tmavnutím živců v případě horninových výbrusů. Pokud je tvar původního živce zachován, hovoříme o pseudomorfóze.

2.4.3 Chloritizace biotitu

Jedná se o proces postupné náhrady biotitu minerálem chloritem, což lze ve výbrusech dobře pozorovat změnou barvy biotitu z hnědé na zelenou.

2.5 Vybrané fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti jsou takové vlastnosti, které blíže popisují horninu a vyjadřují vztahy mezi jednotlivými fázemi. Závisí zejména na minerálním složení, stavbě a struktuře horniny. Jsou obvykle členěny na základní neboli hmotové, hydrofyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti. [19]

2.5.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost určuje hmotnost pevné, kapalné i plynné fáze horniny v objemové jednotce. Na rozdíl od hustoty tedy zahrnuje i dutiny a póry. [19]

Objemová hmotnost se v mechanice hornin většinou stanovuje pro horniny s vlhkostí odpovídající dodanému stavu, případně pro horninu zcela nasycenou vodou a zřídka též pro horninu vysušenou. [19]

Objemová hmotnost je dána tímto vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg/m^3] \quad (2.2)$$

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

V ... objem vzorku, [m³]

Hmotnost vzorku se stanovuje vážením na laboratorních vahách. Objem vzorku lze stanovit více způsoby. Nejjednodušším způsobem je změření rozměrů pravidelného vzorku. Objem nepravidelných vzorků lze určit pomocí dvojího vážení (na suchu a ve vodě). Tyto vzorky je ale často nutné opatřit ochranou proti nasáknutí vodou, která by mohla způsobit i rozpad vzorku (poloskalní horniny). Pro tyto účely se používá obvykle parafín. Velmi měkké poloskalní horniny lze testovat i pomocí metodiky využívané v mechanice zemin. [19]

Výsledek bývá stanoven jako průměr z minimálně pěti měření. Objemová hmotnost má v geomechanice široké využití jak ve výpočtech, tak jako ukazatel kvality horniny. [19]

2.5.2 Nasákavost

Nasákavost udává množství vody, které je hornina schopna pojmout do otevřených pórů, vůči vysušenému stavu (105°C). Je dána vztahem [19]:

$$N = \frac{m_N - m_S}{m_S} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

kde: m_N ... hmotnost nasáklé horniny, [g]

m_S ... hmotnost vysušené horniny, [g]

Je několik způsobů, jak stanovit nasákavost horniny. Obvykle se stanovuje na vzorku ponořeném do vody na 48 hodin. Méně využívané metody jsou nasákání do ustálené hmotnosti, nasákání za varu nebo za sníženého atmosférického tlaku. [19]

Výsledná nasákavost se stanovuje jako průměr z minimálně tří měření. Nasákavost lze také použít jako ukazatel stavu horniny. U zdravých hornin se pohybuje v rozmezí 1 až 3 %. [19]

2.6 Vybrané mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti popisují chování horniny při působení vnějších sil. Udávají schopnost horniny odporovat porušení (tzn. pevnost) nebo měnit tvar a objem vlivem zatížení (tzn. přetvárnost). Mechanické vlastnosti lze rozdělit na indexové pevnostní a přetvárné [20]. Mechanické vlastnosti mohou být zjišťovány v různých směrech, a to například ve směru kolmém nebo vodorovném vůči přirozenému uložení horniny nebo ve směru kolmém nebo vodorovném vůči foliaci nebo vrstevnatosti horniny. Podle porušení vzorku dělíme metody testování mechanických vlastností na nedestruktivní a destruktivní. [19] [21] [22] [23] [24] [25]

2.6.1 Nedestruktivní metody

2.6.1.1 Ultrazvuková impulzová metoda

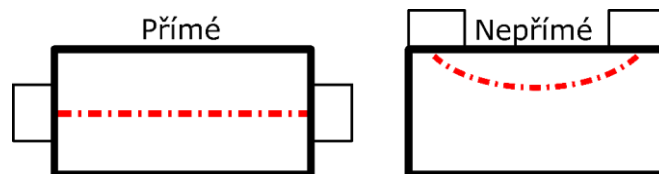
Ultrazvuková impulzová metoda je založena na principu měření doby průchodu ultrazvukového impulzu daným vzorkem. Z doby průchodu se stanoví rychlost šíření ultrazvuku ve vzorku, která je ovlivněna jak vlastnostmi materiálu, tak případnými trhlinami a defekty. Z rychlosti šíření lze odvodit dynamický modul pružnosti. Tato metoda je vhodnější pro zkoušení kompaktnějších materiálů. [26] Pro rychlost šíření ultrazvuku platí tento vztah [27]:

$$v_L = \frac{l}{t} \quad [m/s] \quad (2.4)$$

kde: l ... délka měřicí základny, [m]

t ... doba průchodu ultrazvuku, [s]

Vzorek je možné prozařovat buď přímo, nebo nepřímě.



Obrázek 2-8: Schéma způsobů prozvučování těles, vytvořil autor

Rychlost šíření je také ovlivněna rozměry prostředí, kterým daný impulz prochází. Podle poměru délky vlny k bočnímu rozměru tělesa rozlišujeme tři typy prostředí:

- jednorozměrné ... pruty, válce, trámce, nosníky
- dvojrozměrné ... desky
- trojrozměrné ... krychle, kvádry, válce

Typ prostředí je třeba zohlednit pomocí součinitele rozměrnosti prostředí [28]:

$$k_1 = 1 \quad k_2 = \sqrt{\frac{1}{(1-\nu^2)}} \quad k_3 = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (2.5)$$

kde: k_1 ... pro jednorozměrné prostředí

k_2 ... pro dvojrozměrné prostředí

k_3 ... pro trojrozměrné prostředí

ν ... Poissonovo číslo

Dynamický modul pružnosti lze pak stanovit podle následujícího vztahu [28]:

$$E_{dyn} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad [MPa; GPa] \quad (2.6)$$

kde: v_L ... rychlost impulzu, [km/s]

ρ ... objemová hmotnost materiálu, [kg/m³]

k ... součinitel rozměrnosti prostředí

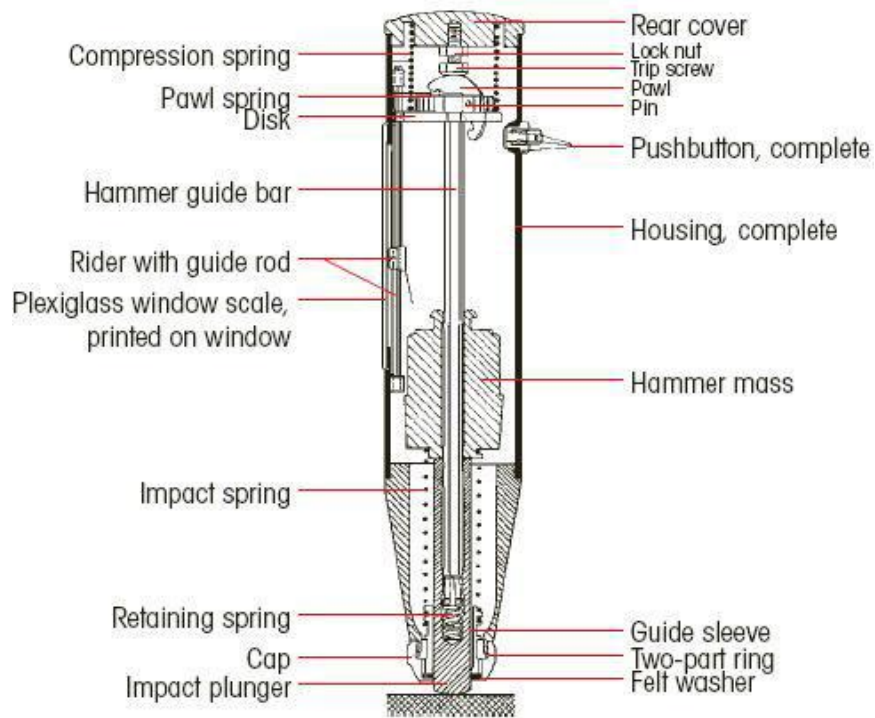


Obrázek 2-9: Ukázka přístroje Pundit 200 (Proceq) pro ultrazvukovou impulzovou metodu využitého v bakalářské práci, převzato z [29]

2.6.1.2 Skleroskopická tvrdost horniny

Jedná se o asi nejpropracovanější indexovou zkoušku, jejíž výhodou je možnost použití jak v laboratoři, tak v terénu. Je jednoduchá na provedení a rychlá, tudíž umožňuje mnohonásobné opakování. Řadí se mezi nedestruktivní zkoušky. [19]

V současnosti se nejvíce používá Schmidtovo kladívko, které je dobře přenosné a nenáročné na použití. Při aktivaci kladívka pružina uvnitř vymrští úderník, který se po nárazu do zkoušeného tělesa odrazí. Na stupnici je pak možné odečíst hodnotu odrazové tvrdosti tělesa. Pro laboratorní vzorky se nejčastěji používá typ L o nárazové energii 0,74 J, kdy je minimalizováno riziko uštípnutí části testovaného tělesa. [30]



Obrázek 2-10: Schéma Schmidtova kladívka, převzato z [31]

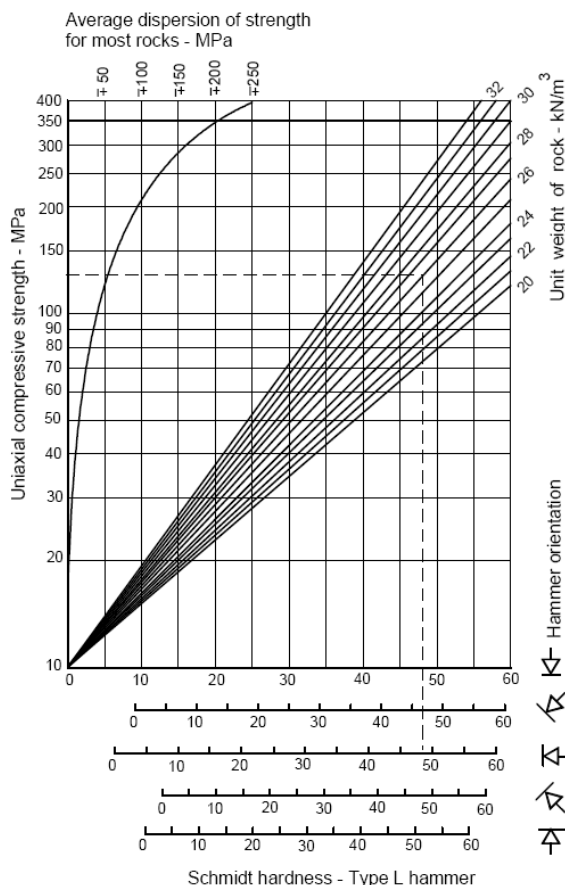


Obrázek 2-11: Schmidtovo kladívko typu L od firmy Proceq, převzato z [32]

Měření se provádí nejlépe na rovné, zabroušené ploše horniny, například na podstavě válcového tělesa. Je třeba dbát na pevné upnutí tělesa, jinak hrozí výrazné zkreslení výsledků díky nechtěnému pohybu tělesa nebo pružení podložky. Schmidtovo kladívko je vhodné před zkoušením kalibrovat na cejchovní kovadlině, čímž se získá kalibrační součinitel, kterým se následně korigují naměřené hodnoty. [30]

$$\text{Kalibrační součinitel } k: = \frac{\text{odskok naměřený na kovadlině}}{76 \text{ (pro typ L)}} \quad (2.7)$$

Získaná odrazová tvrdost povrchu tělesa se pak pomocí korelace převede na prostou tlakovou pevnost. Pro převod lze použít Bieniawského diagram, který zohledňuje i úhel kladívka při měření. Kromě toho existuje také řada empirických korelačních vztahů. [30]



Obrázek 2-12: Bieniawského diagram pro určení prosté tlakové pevnosti z naměřené odrazové tvrdosti pro Schmidtovo kladívko typu L, převzato z [33]

Na následujících řádcích jsou uvedeny vybrané empirické korelační vztahy použité v této práci, kde RL odpovídá odrazové tvrdosti horniny pro kladívko typu L:

$$\sigma_c = 8,36 \cdot RL - 416 \text{ (Tuğrul a Zarif, 1999) – žuly [34]} \quad (2.8)$$

$$\sigma_c = 0.000004 \cdot RL^{4,29} \text{ (Yasar a Erdogan, 2004) – vápence, pískovce, bazalty [35]} \quad (2.9)$$

$$\sigma_c = 1,45 \cdot e^{0,07 \cdot RL} \text{ (Aydin a Basu, 2005) – žuly [34]} \quad (2.10)$$

$$\sigma_c = 4,52927 \cdot e^{0,05609 \cdot RL} \text{ (Wang et al., 2017) – univerzální použití [34]} \quad (2.11)$$

2.6.2 Destruktivní metody

2.6.2.1 Pevnost v jednoosém tlaku (UCS)

Pevnost v jednoosém tlaku či prostá tlaková pevnost udává maximální napětí, které daná hornina dokáže přenést bez porušení. Tato pevnost je dána následujícím vztahem [19]:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad [N/mm^2; MPa] \quad (2.12)$$

kde: F ... maximální síla, kterou těleso dokáže přenést bez porušení, [N]

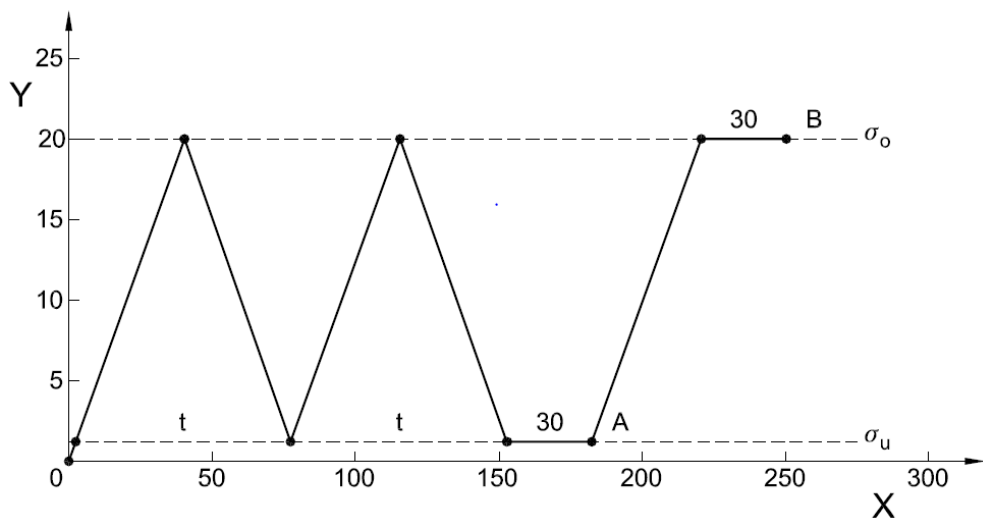
A ... průřezová plocha tělesa, [mm²]

Jednoosá tlaková pevnost se stanovuje na pravidelných zkušebních tělesech, nejčastěji válcích či hranolech o štíhlostním poměru, tedy poměru délky (L) a příčného rozměru (D) testovaného vzorku, odpovídajícím přibližně hodnotě 2. [20]

Výsledná pevnost se stanoví ideálně jako průměr z pěti testovaných těles, pokud možno z jednoho horninového vzorku nebo podobné metráže vrtného jádra. Jednoosá tlaková pevnost se mimo jiné používá i pro klasifikaci hornin. [19]

Testování pevnosti v jednoosém tlaku je také vhodné pro zjištění statického modulu pružnosti a Poissonova čísla. Pro tyto účely je nutné těleso osadit alespoň dvěma svislými a jedním vodorovným tenzometrem. [36]

Těleso je nejprve podrobena dvěma zatěžovacím a odlehčovacím cyklům, kdy je zatíženo na třetinu odhadované pevnosti a odtíženo na několik megapascalů. Po druhém cyklu je po dobu alespoň třiceti sekund udržováno napětí při odtížení, následně se zaznamenají hodnoty na tenzometrech (bod A). Pak je napětí zvýšeno zase na třetinu odhadované pevnosti, které je udržováno po dobu alespoň třiceti sekund, zaznamenají se hodnoty na tenzometrech (bod B) a následuje zatížení až do porušení tělesa. [36]



Obrázek 2-13: Časový průběh prosté tlakové zkoušky za účelem zjištění modulu pružnosti, převzato z [36]

Z naměřených hodnot lze stanovit statický modul pružnosti dosazením do rovnice [36]:

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_{xB} - \varepsilon_{xA}} \quad [\text{MPa}; \text{GPa}] \quad (2.13)$$

kde: σ_A ... napětí při odtížení, [MPa]

σ_B ... napětí při zatížení, [MPa]

ε_{xA} ... osově poměrné přetvoření při odtížení, [-]

ε_{xB} ... osově poměrné přetvoření při zatížení, [-]

Pro Poissonovo číslo platí v tomto případě tento vztah:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yB} - \varepsilon_{yA}}{\varepsilon_{xB} - \varepsilon_{xA}} \quad [-] \quad (2.14)$$

kde: ε_{yA} ... radiální poměrné přetvoření při odtížení, [-]

ε_{yB} ... radiální poměrné přetvoření při zatížení, [-]

ε_{xA} ... osově poměrné přetvoření při odtížení, [-]

ε_{xB} ... osově poměrné přetvoření při zatížení, [-]

2.6.2.2 Pevnost v příčném tahu

Provést zkoušku pevnosti v prostém tahu není instrumentálně jednoduché, a proto je v mechanice hornin nejvíce využívána zkouška v příčném tahu, tradičně označovaná také jako „Brazilská zkouška“. Při zkoušce v příčném tahu je zkušební těleso horniny namáháno mezi dvěma ocelovými čelistmi, které mohou mít různou konfiguraci. [20] Porušení zkušebního tělesa nastává při překročení pevnosti v tahu, a to v předem dané rovině, která je vymezená spojnicí protilehlých zatěžujících čelistí. Pro zkoušku lze použít krychle nebo kvádr, praktičtější je však válcovité těleso se štíhlostním poměrem $L/D = 0,5$. Výsledná pevnost v příčném tahu je dána následujícím vztahem [19]:

$$\sigma_t = k \cdot \frac{F}{h \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2; \text{MPa}] \quad (2.15)$$

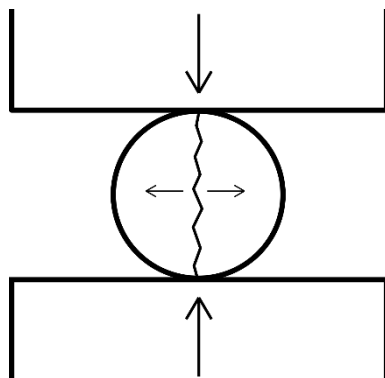
kde: $k \dots 0,637 (2/\pi)$ pro válec, $0,734$ pro krychli

$F \dots$ největší síla, které těleso dokáže přenést bez porušení, [N]

$h \dots$ výška tělesa ve směru zatížení (průměr u válce), [mm]

$l \dots$ délka tělesa (kolmo k průřezové ploše), [mm]

Výsledná pevnost se stanoví ideálně jako průměr z pěti těles, pokud možno z jednoho balvanu nebo podobné metráže vrtného jádra.

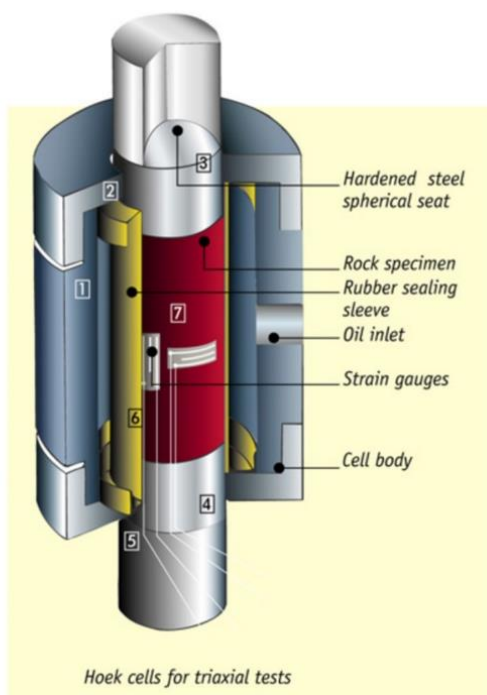


Obrázek 2-14: Idealizované schéma zatěžování testovaného tělesa při „Brazilské zkoušce“, vytvořil autor

2.6.2.3 Triaxiální pevnost

Tato zkouška oproti zkoušce v prostém tlaku testuje pevnost horniny tak, jakoby byla uložena v určité hloubce v rámci horninového masivu. Na těleso působí jak osový tlak (σ_1), tak boční neboli komorový tlak (σ_2 a σ_3). Z technického hlediska se používané laboratorní vybavení dělí na tzv. „pravé“ ($\sigma_2 \neq \sigma_3$) a „nepravé“ ($\sigma_2 = \sigma_3$) triaxiální přístroje. [19]

Pro testování hornin se obvykle používají válcová tělesa o štíhlostním poměru 2 a nepravé triaxiální přístroje, kdy se na vyvození bočního napětí používá tzv. Hoekova buňka. Jedná se o komoru s válcovým otvorem, jehož vnitřní stěnu tvoří membrána přenášející komorový tlak na těleso. Těleso je pak pomocí kovových válců zatěžováno v lisu za působení komorového tlaku z buňky. Jelikož se komorové tlaky u hornin pohybují v jednotkách až prvních desítkách megapascalů, pro vyvození tlaku se používá olej. [37]

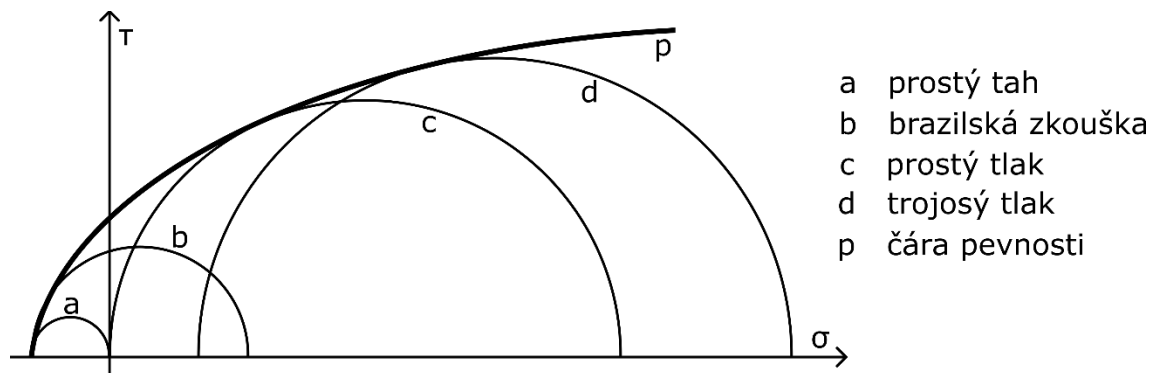


Obrázek 2-15: Schéma Hoekovy buňky, převzato z [38]



Obrázek 2-16: Ukázka Hoekovy buňky a veškerého příslušenství, převzato z [39]

Po provedení série zkoušek s různými komorovými tlaky je pak možné sestrojit obálku Mohrových kružnic, která vymezuje triaxiální pevnost horniny.



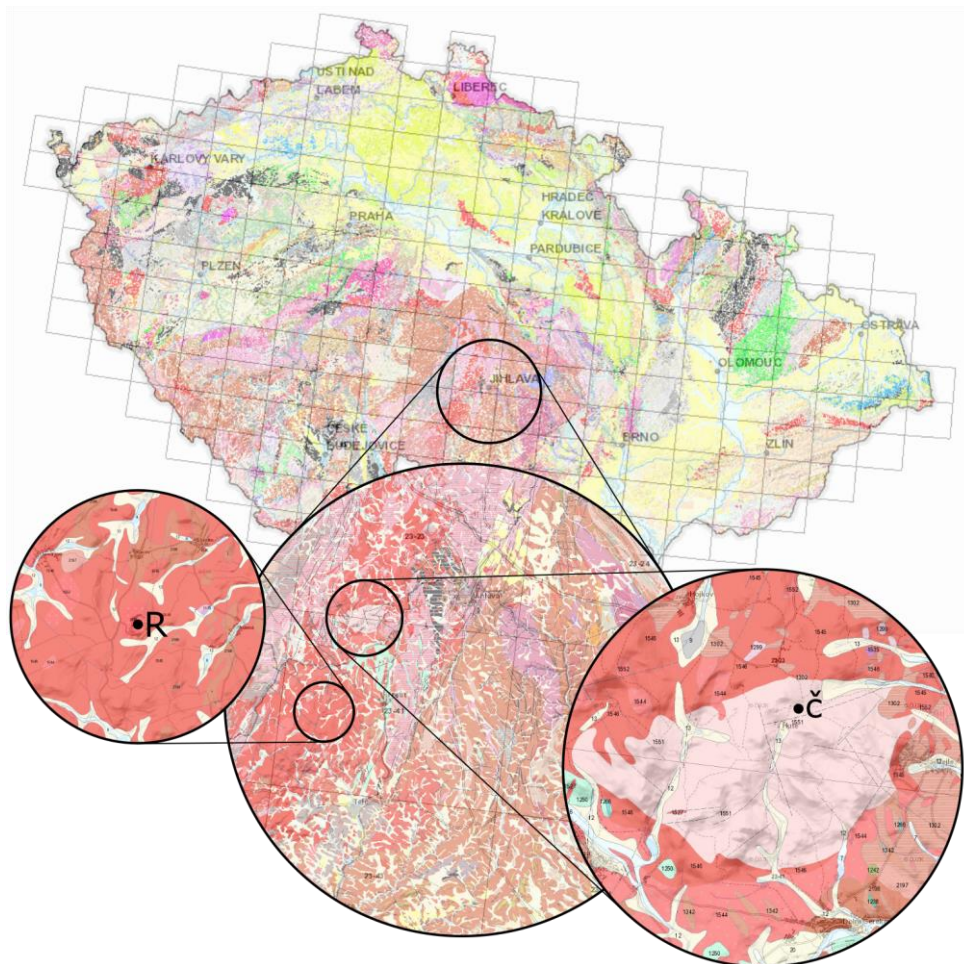
Obrázek 2-17: Empirické kritérium porušení vyjádřené pomocí Mohrových kružnic, upraveno z [19]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci této práce byly provedeny zkoušky fyzikálních a mechanických vlastností dvou typů granitů nacházejících se v prostoru možného budoucího hlubinného jaderného úložiště Hrádek.

3.1 Odběr vzorků a zhotovení zkušebních těles

Pro účely této práce byly vzorkovány celkem tři horninové bloky. Dva bloky, které pochází z okolí vrcholu Čeřínek na lokalitě Hrádek, petrograficky odpovídají mírně zvětřalému granitu typu Čeřínek. Kvůli nedostupnosti nezvětřalé horniny typu Čeřínek byl pro srovnání odebrán i čerstvý granit typu Mrákotín v nedalekém lomu Rácov.



Obrázek 3-1: Přesné umístění lokalit pro odběr vzorků (R = Rácov, Č = Čeřínek), převzato a upraveno z [9]



Obrázek 3-2: Ukázky vzorkovaných hornin, vlevo blok granitu typu Čeřínek, vpravo bloky granitu typu Mrákořín, foto: autor

Bloky byly převezeny do geotechnické laboratoře výzkumného centra AdMaS FAST VUT v Brně, kde z nich byly odvrtány jádrové vývrty. K vrtání byl použit normovaný jádrový vrták s diamantovou korunkou typu NX s průměrem 54,7 mm a diamantové jádrové vrtáky B6-8B na granit o průměru 38 a 44 mm. Vrtáky byly osazeny do jádrové vrtačky WEKA DK 17 s vodním výplachem a ručním přitlakem. Vrtání těchto žul se ukázalo jako velmi náročné, vrtáky se rychle opotřebovávaly. Přesto se nakonec podařilo získat dostatečný počet vrtných jader.

Z vrtných jader byly následně nařezány válce potřebných délek. K řezání byla použita pila s diamantovým kotoučem a vodním výplachem. U vzorků pro zkoušky pevnosti v prostém tlaku a triaxiální zkoušky byly zabroušeny podstavy, aby nedošlo k ovlivnění výsledků zkoušek případnými nerovnostmi.



Obrázek 3-3: Vrtačka WEKA DK 17 a použité jádrové vrtáky, foto: autor

Celkem bylo vyrobeno devět těles z granitu typu Čeřínek a deset těles z granitu typu Mrákotín, z toho vždy šest o štíhlostním poměru 2 a tři a čtyři o štíhlostním poměru 0,5. Zvolené značení má následující formát: Č/R-n, kde Č označuje typ Čeřínek, R označuje typ Mrákotín pocházející z lomu Rácov, n je pořadové číslo tělesa.



Obrázek 3-4: Hotová sada testovacích těles, foto: autor

3.2 Radioaktivita zkoumaných hornin

V rámci testování dvou různých typů granitů byla změřena jejich radioaktivita v přirozeném uložení. K tomu byl použit gama spektrometr GR-130 od firmy Exploranium. Dosazením získaných hodnot obsahů K, U a Th do rovnice (2.1) byla získána hmotnostní aktivita ekvivalentu radia pro jednotlivá měřená místa.

Tabulka 3-1: Naměřené hodnoty obsahů draslíku, uranu a thoria v horninách a vypočtená hmotnostní aktivita na jednotlivých měřených lokalitách

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)					Granit typu Mrákotín (lom Rácov)				
Měření	K	U	Th	a _m	Měření	K	U	Th	a _m
	[%]	[ppm]	[ppm]	[Bq/kg]		[%]	[ppm]	[ppm]	[Bq/kg]
Č1	4,3	5,9	11,0	240,4	R1 - h. etáž	4,4	7,4	13,5	275,8
Č2	3,5	5,2	9,9	206,1	R2 - d. etáž	5,2	13,6	19,1	404,2
Č3	4,7	6,6	11,2	259,8	R3 - d. etáž	6,8	14,7	19,9	461,0
Č4	3,9	5,9	10,2	226,1	R4 - d. etáž	7,4	20,0	19,7	539,7
Průměr	4,1	5,9	10,6	233,1	Průměr	6,0	13,9	18,1	420,2

Nejvyšší hodnoty radioaktivity byly naměřeny v dolní etáži lomu Rácov. Hodnoty z horní etáže jsou velmi podobné hodnotám naměřeným na blocích granitu typu Čeřínek. Všechny hodnoty jsou, co se týče obsahu radioaktivních izotopů, lehce nad průměrem.

3.3 Petrografické studium výbrusů

Z odebraných vzorků hornin byly zhotoveny čtyři výbrusy o rozměrech 2,5x4 cm, které byly následně zkoumány pomocí polarizačního mikroskopu. Výbrusy byly po celé délce naskenovány v režimu PPL. Dále byly také pořízeny fotografie makrovzorků pomocí stereomikroskopu Nikon SMZ 1500.



Obrázek 3-5: Zhotovené petrografické výbrusy, foto: autor



Obrázek 3-6: Ukázka kontaktu žíly mikrodioritu s granitem typu Mrákoťín, lom Rácov. Alkalické živce granitu jsou zakaleny produkty sericitizace (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček



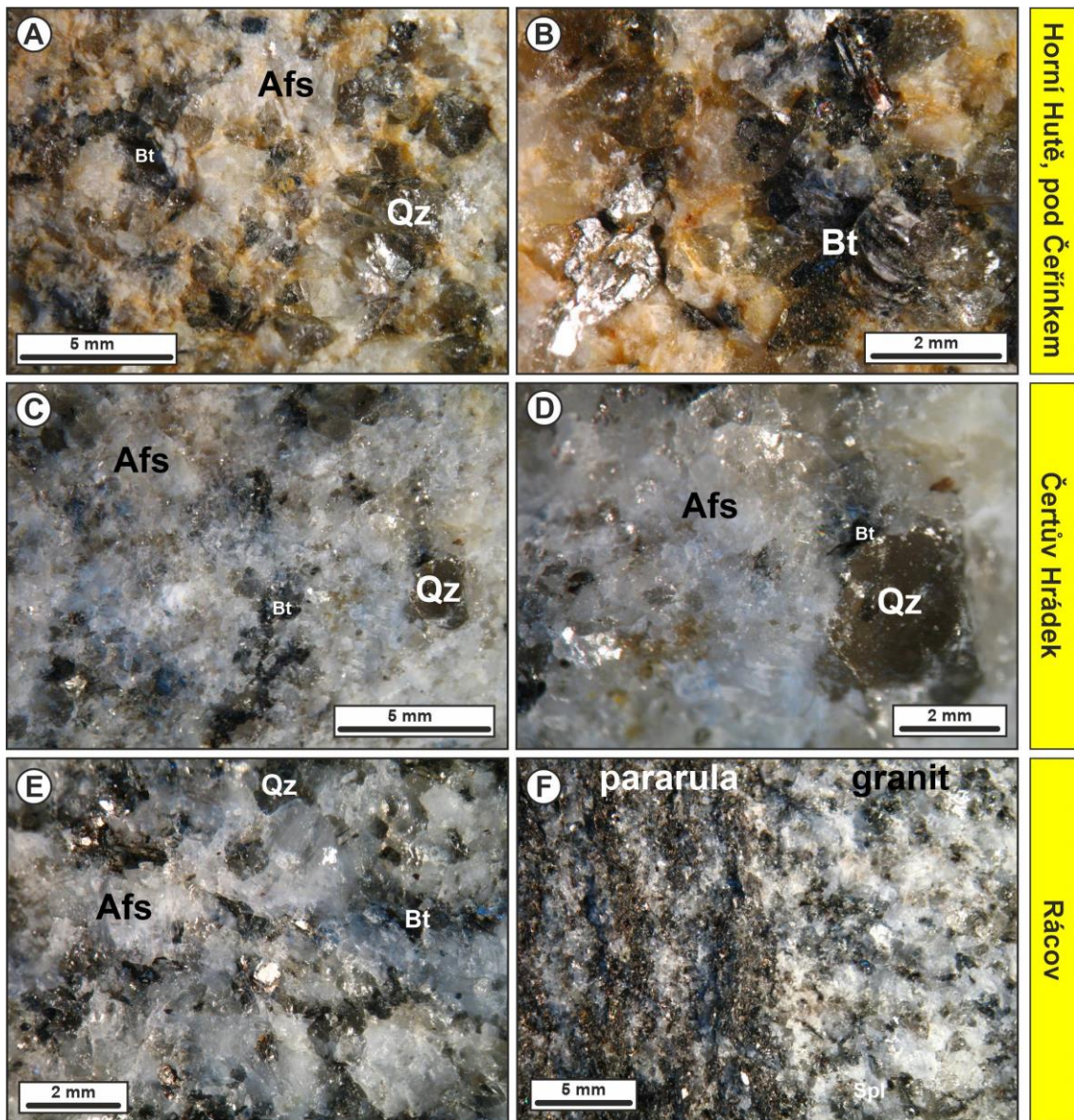
Obrázek 3-7: Ukázka kontaktu biotitické ruly s granitem typu Mrákoťín, lom Rácov. Alkalické živce granitu jsou zakaleny produkty sericitizace (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček



Obrázek 3-8: Ukázka hrubozrnného granitu typu Čeřínek s variabilně přeměněnými alkalickými živci, které částečně vystupují ve formě tzv. pseudomorfóz, Čertův hrádek (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček



Obrázek 3-9: Ukázka textury hrubozrnného granitu typu Čeřínek. Pro vzorek je charakteristická přeměna alkalického živce (pozorována byla tři stádia) a částečná chloritizace biotitu (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček



Obrázek 3-10: Povrchové snímky zkoumaných hornin, Afs - alkalický živec, Bt - biotit, Qz - křemen, foto: Lukáš Krmíček

Z pořízených snímků lze dobře pozorovat rozdíl ve velikosti zrn obou zkoumaných granitů, kdy granit typu Čeřínek má zrna o průměru okolo 2 až 4 mm, zatímco granit typu Mrákotín jen okolo 1 až 2 mm. Granit typu Čeřínek má také oproti granitu typu Mrákotín více nepravidelou texturu. Nepravidelnost textury a větší zrna mohou negativně ovlivnit pevnost horniny.

Oba granity se skládají převážně z křemene, alkalického živce a biotitu. U vzorků granitu typu Čeřínek lze podle předpokladů pozorovat určité známky zvětrání či alterace, a to sericitizaci živců a chloritizaci biotitu. Sericitizace se projevuje zakalením a postupným černáním krystalů živců, chloritizace postupným tmavnutím a lehkým zezelenáním biotitu, což lze pozorovat na horninových výbrusech. Alterace živců i biotitu může negativně ovlivnit pevnost. Podle těchto zjištění lze předpokládat, že granit typu Čeřínek bude mít výrazně nižší pevnost, než granit typu Mrákotín.

3.4 Určení fyzikálních vlastností

3.4.1 Určení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost jednotlivých hornin byla zjištěna změřením rozměrů jednotlivých těles a jejich zvážením. Měření bylo provedeno pomocí posuvného měřidla s přesností na desetiny milimetru. Hmotnost byla zvážena na laboratorních vahách s přesností na desetiny gramů. Následně byla podle rovnice (2.2) pro každé těleso stanovena objemová hmotnost. Také byly stanoveny průměrné objemové hmotnosti pro oba horninové typy.

Tabulka 3-2: Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost těles z granitu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokality Hrádek)												
Těleso	Výška tělesa					Průměr tělesa					Hmotnost	Objemová hmotnost
	[mm]					[mm]						
	1	2	3	4	pr.	1	2	3	4	pr.	[g]	[kg/m ³]
Č-01	86,4	86,3	86,2	86,2	86,3	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	341,2	2600
Č-02	87,6	87,7	87,3	87,5	87,5	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	346,1	2601
Č-03	87,3	87,4	87,1	87,2	87,3	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	345,2	2601
Č-04	75,3	75,0	76,0	75,9	75,6	38,0	38,1	38,0	38,1	38,1	222,4	2580
Č-05	75,3	74,6	75,2	75,2	75,1	37,9	38,0	38,0	37,9	38,0	220,6	2590
Č-06	74,6	74,9	74,6	74,8	74,7	37,9	37,9	37,9	37,8	37,9	217,1	2576
Č-07	18,4	17,9	18,0	18,2	18,1	38,0	38,0	38,0	38,0	38,0	53,0	2582
Č-08	20,3	20,7	20,7	20,5	20,6	44,0	44,1	44,0	44,0	44,0	80,0	2554
Č-09	20,3	19,5	20,3	19,8	20,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	78,5	2581
Průměr											2585	

Tabulka 3-3: Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost těles z granitu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)												
Těleso	Výška tělesa					Průměr tělesa					Hmotnost	Objemová hmotnost
	[mm]					[mm]						
	1	2	3	4	pr.	1	2	3	4	pr.	[g]	[kg/m ³]
R-01	104,7	104,7	104,2	104,5	104,5	52,8	52,8	52,8	52,7	52,8	599,4	2620
R-02	75,6	76,2	75,7	76,1	75,9	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	228,9	2618
R-03	64,8	64,1	64,7	64,7	64,6	38,2	38,2	38,2	38,1	38,2	193,4	2612
R-04	86,8	86,6	86,7	86,8	86,7	43,6	43,5	43,8	44,0	43,7	341,0	2622
R-05	86,5	86,5	86,6	86,5	86,5	44,0	43,9	43,9	43,9	43,9	343,5	2624
R-06	86,8	86,5	86,9	86,8	86,8	43,7	43,8	43,9	43,9	43,8	342,7	2620
R-07	21,0	21,6	21,2	21,2	21,3	43,9	43,8	43,7	43,9	43,8	83,3	2596
R-08	22,4	22,6	22,5	22,3	22,5	44,0	44,0	43,8	44,1	44,0	87,9	2569
R-09	22,7	23,1	22,7	22,7	22,8	43,9	44,0	44,0	43,8	43,9	89,2	2585
R-10	25,8	26,1	26,0	25,8	25,9	52,7	52,7	52,6	52,8	52,7	146,5	2593
											Průměr	2606

Pro granit typu Čeřínek byla stanovena průměrná objemová hmotnost **2585 kg/m³**, pro granit typu Mrákotín **2606 kg/m³**. Obě horniny tedy spadají do středu rozpětí objemových hmotností žul, která se pohybuje mezi 2400 a 2800 kg/m³. [40]

3.4.2 Orientační stanovení nasákavosti

V rámci zjišťování vlastností obou variet granitů byla také stanovena orientační nasákavost. Použity byly zbytky těles po destruktivních zkouškách. Nejprve byla stanovena hmotnost vzorků v suchém stavu na laboratorních vahách s přesností na dvě desetinná místa, pak byly vzorky uloženy na sedm dní do nádrže s vodou. V intervalech po sedmi dnech byla vždy zjištěna hmotnost nasáklých vzorků s přesností na dvě desetinná místa. Po uplynutí alespoň dvou intervalů bylo měření přerušeno a z naměřených hodnot byl stanoven průměr s přesností na dvě desetinná místa. Ten byl dosazen do rovnice (2.3), výsledky byly poté zprůměrovány.

Tabulka 3-4: Stanovení nasákavosti granitu typu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)								
Těleso		Hmotnost suchého vzorku [g]	Hmotnost nasáklého vzorku [g]					Nasákavost [%]
			7 dní	14 dní	21 dní	28 dní	pr.	
Č-04	polovina	145,60	147,55	-	147,00	147,05	147,20	1,1
Č-05	polovina	115,85	117,25	-	116,50	116,40	116,72	0,8
Č-06	polovina	139,90	142,05	-	141,50	141,60	141,72	1,3
Č-07	polovina	23,95	-	24,05	24,05	-	24,05	0,4
Č-08	polovina	38,40	-	38,65	38,65	-	38,65	0,7
Č-09	polovina	38,75	-	38,95	39,00	-	38,98	0,6
							Průměr	0,8
							Upr.	1,1

Tabulka 3-5: Stanovení nasákavosti granitu typu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Ráčov)								
Těleso		Hmotnost suchého vzorku [g]	Hmotnost nasáklého vzorku [g]					Nasákavost [%]
			7 dní	14 dní	21 dní	28 dní	pr.	
R-02	celé	228,75	229,50	-	229,30	229,40	229,40	0,3
R-07	polovina	39,95	-	40,10	39,95	-	40,03	0,2
R-08	polovina	40,75	-	40,85	40,90	-	40,88	0,3
R-09	polovina	42,25	-	42,45	42,45	-	42,45	0,5
R-10	polovina	69,45	-	69,65	69,60	-	69,63	0,3
							Průměr	0,3

Pro granit typu Čeřínek byla stanovena průměrná nasákavost **0,8 %**, po odstranění malých těles Č-07, Č-08 a Č-09 s vyšší pravděpodobností chyby dokonce **1,1%**. Pro granit typu Mrákotín byla stanovena průměrná nasákavost **0,3%**. Obě horniny spadají dle nasákavosti do „zdravých“ hornin. Vyšší nasákavost granitu Čeřínek by mohla poukazovat na vyšší stupeň zvětrání horniny.

3.5 Určení mechanických vlastností

3.5.1 Nedestruktivní metody

Před provedením destruktivních zkoušek byla na všech tělesech o štíhlostním poměru 2 změřena Schmidtova odrazová tvrdost a doba průchodu ultrazvuku.

3.5.1.1 Ultrazvuková impulzová metoda

K měření byl použit přístroj Pundit 200 od firmy Proceq, základní frekvence 150 kHz. Před měřením byl přístroj zkalibrován na etalonu. Následně byla stanovena průměrná doba průchodu ultrazvuku přímým osovým prozvučováním těles ze dvou měření, s přesností na jedno desetinné místo. Rychlost průchodu ultrazvuku zkoušeným tělesem byla stanovena dosazením do rovnice (2.4) s přesností na celá čísla. Vzhledem k převaze osové délky před průměrem těles bylo zkoumané prostředí považováno za jednorozměrné, a tudíž je součinitel rozměrnosti prostředí roven jedné. Nakonec byl dosazením do rovnice (2.6) stanoven dynamický modul pružnosti.

Tabulka 3-6: Dynamický modul pružnosti granitu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)						
Těleso	Čas průchodu			Délka tělesa [mm]	Rychlost šíření [m/s]	Dynamický modul pružnosti [GPa]
	[μs]					
	1	2	pr.			
Č-01	23,9	24,0	24,0	86,3	3596	33,43
Č-02	24,0	24,0	24,0	87,5	3646	34,36
Č-03	24,4	24,5	24,5	87,3	3563	32,82
Č-04	18,4	18,4	18,4	75,6	4109	43,64
Č-05	18,5	18,5	18,5	75,1	4059	42,59
Č-06	22,3	22,3	22,3	74,7	3350	29,01
Průměr						35,98

Tabulka 3-7: Dynamický modul pružnosti granitu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)						
Těleso	Čas průchodu			Délka tělesa [mm]	Rychlost šíření [m/s]	Dynamický modul pružnosti [GPa]
	[μs]					
	1	2	pr.			
R-01	22,9	22,9	22,9	104,5	4563	54,26
R-02	16,2	16,2	16,2	75,9	4685	57,20
R-03	13,9	13,9	13,9	64,6	4647	56,28
R-04	18,7	18,7	18,7	86,7	4636	56,01
R-05	19,2	19,3	19,3	86,5	4482	52,35
R-06	19,0	19,0	19,0	86,8	4568	54,38
Průměr						55,08

Pro granit typu Čeřínek byl stanoven průměrný dynamický modul pružnosti **35,98 GPa**, pro granit typu Mrákotín je roven **55,08 GPa**.

3.5.1.2 Skleroskopická tvrdost

K měření bylo použito Schmidtovo kladívko typu L, které bylo před měřením řádně nakalibrováno na cejchovní kovadlině, na které byl naměřen průměrný odskok 69,5. Poté byl stanoven kalibrační součinitel k dosazením do rovnice (2.7):

$$k = \frac{69,5}{76} = 0,914$$

Na tělesech, pevně upnutých do svěráku, bylo provedeno deset měření odrazové tvrdosti na podstavě. Z těchto hodnot by stanoven průměr, který byl vydělen kalibračním součinitelem, čímž byla získána průměrná odrazová tvrdost.

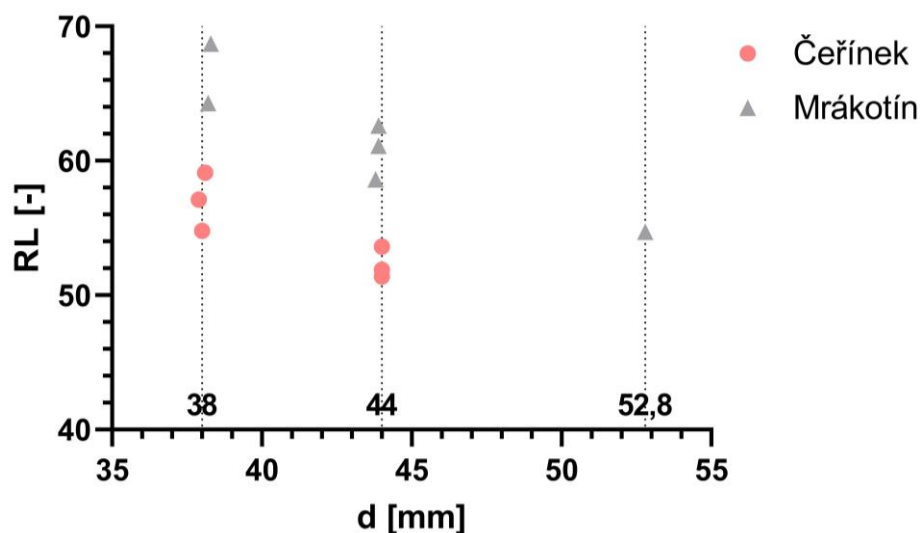
Tabulka 3-8: Naměřené hodnoty odrazové tvrdosti pro granit Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)													
Těleso	Průměr tělesa	Hodnoty odskoku (odrazová tvrdost)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pr.	kal.
	[mm]	[-]										k = 0,91	
Č-01	44,0	50	51	51	46	48	50	48	49	47	50	49,0	53,6
Č-02	44,0	45	46	50	48	46	45	50	46	48	46	47,0	51,4
Č-03	44,0	49	48	49	46	46	49	48	46	47	46	47,4	51,9
Č-04	38,1	56	55	54	53	53	55	54	54	53	53	54,0	59,1
Č-05	38,0	51	51	48	50	51	51	48	50	51	50	50,1	54,8
Č-06	37,9	51	54	53	51	52	51	53	51	54	52	52,2	57,1
		Min	51,4									Průměr (38)	57,0
		Max	59,1									Průměr (44)	52,3
												Průměr	54,7

Tabulka 3-9: Naměřené hodnoty odrazové tvrdosti pro granit Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)													
Těleso	Průměr tělesa	Hodnoty odskoku (odrazová tvrdost)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pr.	kal.
	[mm]	[-]										k = 0,91	
R-01	52,8	52	51	49	48	50	48	50	49	51	52	50,0	54,7
R-02	38,3	64	64	64	59	64	64	59	64	62	64	62,8	68,7
R-03	38,2	54	58	59	59	64	58	59	54	59	64	58,8	64,3
R-04	43,9	58	58	57	56	57	58	58	57	56	57	57,2	62,6
R-05	43,9	53	54	57	59	56	53	56	59	54	57	55,8	61,1
R-06	43,8	54	53	53	52	56	54	52	53	53	56	53,6	58,6
		Min	54,7									Průměr (38)	66,5
		Max	68,7									Průměr (44+)	59,3
												Průměr	61,7

Z naměřených dat vyplývá, že průměr tělesa ovlivňuje naměřenou odrazovou tvrdost. V případě těles s průměrem 38 mm je tvrdost výrazně vyšší, pro granit typu Čeřínek průměrně **57,0**, pro granit typu Mrákotín **66,5**. Hodnoty získané pro tělesa o průměru 44 mm a 52,8 mm jsou o několik jednotek menší a to **52,3** a **59,3**. Naměřené hodnoty pro granit typu Čeřínek leží mezi **51,4** a **59,1**, průměr **54,7**, pro granit typu Mrákotín mezi **54,7** a **68,7**, průměr **61,7**.

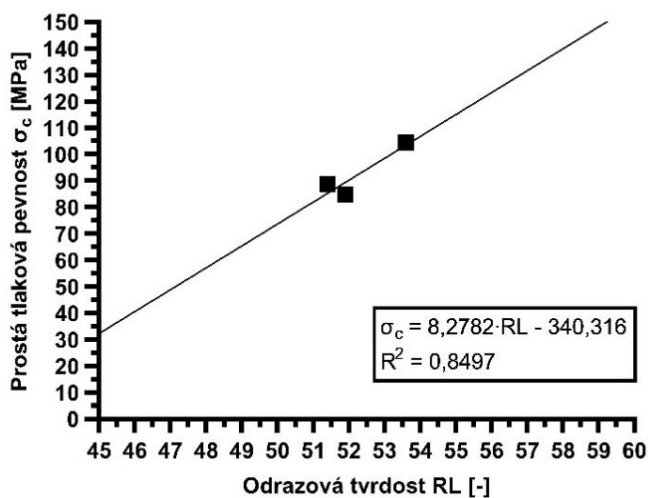


Obrázek 3-11: Závislost odrazové tvrdosti na průměru tělesa

Pro stanovení korelované prosté tlakové pevnosti byly použity celkem čtyři korelační vztahy uvedené v teoretické části práce a obecný diagram. Pro granit typu Čeřínek byl také stanoven alespoň orientační korelační vztah založený na třech provedených prostých tlakových zkouškách, průměr všech těchto těles byl 44 mm.

Tabulka 3-10: Data pro korelaci prosté tlakové pevnosti pro granit Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)			
Těleso	Průměr tělesa	Kalibrovaná odrazová tvrdost	Pevnost v prostém tlaku
	[mm]		
Č-01	44,0	53,6	104,4
Č-02	44,0	51,4	88,6
Č-03	44,0	51,9	84,9



Obrázek 3-12: Korelace prosté tlakové pevnosti pro granit Čeřínek

Tabulka 3-11: Hodnoty korelovaných prostých tlakových pevností pro granit Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)							
Těleso	Průměr tělesa	Kalibrovaná odrazová tvrdost	Korelovaná prostá tlaková pevnost				
			Tuğrul a Zarif	Yasar a Erdogan	Aydin a Basu	Wang et al.	Vlastní korelace
[-]	[mm]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Č-01	44,0	53,6	32,1	104,8	61,8	91,6	103,4
Č-02	44,0	51,4	13,7	87,5	53	80,9	85,2
Č-03	44,0	51,9	17,9	91,2	54,8	83,2	89,3
Č-04	38,1	59,1	78,1	159,3	90,8	124,6	148,9
Č-05	38,0	54,8	42,1	115,2	67,2	97,9	113,3
Č-06	37,9	57,1	61,4	137,4	78,9	111,4	132,4
		Průměr (38)	60,5	137,3	79,0	111,3	131,5
		Průměr (44)	21,2	94,5	56,5	85,2	92,6
UCS	92,6 MPa	Průměr	40,9	115,9	67,8	98,3	112,1

Pro granit typu Čeřínek nejlépe odpovídají vztahy Wang et al. (2017) a Yasar a Erdogan (2004), kdy pro celkovou průměrnou odrazovou tvrdost poněkud nadhodnocují pevnost horniny, avšak pro průměrnou hodnotu z těles o průměru 44 mm odpovídají naměřeným hodnotám prosté tlakové pevnosti. To samé platí pro vlastní korelační vztah, který byl stanoven pro tělesa o průměru 44 mm s menší naměřenou odrazovou tvrdostí, přičemž tělesa o průměru 38 mm s vyšší naměřenou odrazovou tvrdostí zvyšují průměrnou korelovanou pevnost v prostém tlaku nad skutečnou naměřenou hodnotu pevnosti. Vztahy Tuğrul a Zarif (1999) a Aydin a Basu (2005) určené pro granit překvapivě výrazně podhodnocují pevnost zkoumané horniny.

Tabulka 3-12: Hodnoty korelovaných prostých tlakových pevností pro granit Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)						
Těleso	Průměr tělesa	Kalibrovaná odrazová tvrdost	Korelovaná prostá tlaková pevnost			
			Tuğrul a Zarif	Yasar a Erdogan	Aydin a Basu	Wang et al.
[-]	[mm]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
R-01	52,8	54,7	41,3	114,3	66,7	97,4
R-02	38,3	68,7	158,3	303,8	177,8	213,6
R-03	38,2	64,3	121,5	228,7	130,7	166,9
R-04	43,9	62,6	107,3	203,9	116	151,7
R-05	43,9	61,1	94,8	183,7	104,4	139,4
R-06	43,8	58,6	73,9	153,6	87,7	121,2
		Průměr (38)	139,9	266,3	154,3	190,3
		Průměr (44+)	79,3	163,9	93,7	127,4
UCS	120,5 MPa	Průměr	99,5	198	113,9	148,4

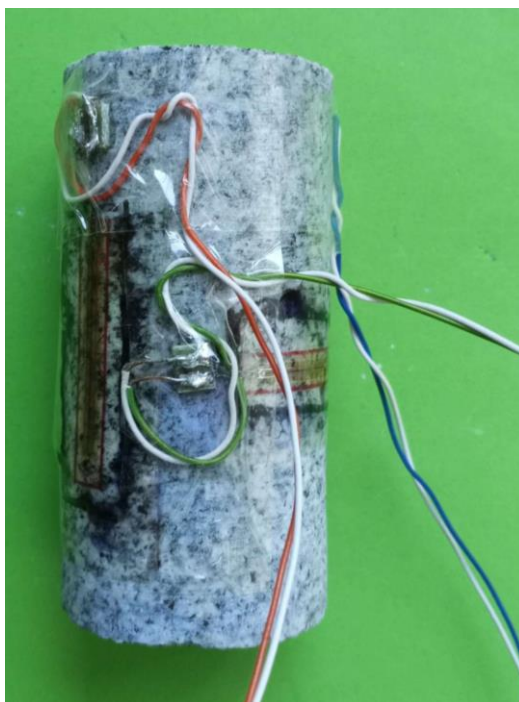
Pro granit typu Mrákotín nejlépe odpovídá vztah z práce Wang et al. (2017), přičemž platí to samé, co pro granit typu Čeřínek, kdy pro celkový průměr pevnost nadhodnocuje, avšak pro průměr z těles 44 mm a více odpovídá naměřené prosté tlakové pevnosti. Ostatní vztahy buď výrazně nadhodnocují, nebo podhodnocují pevnost horniny.

3.5.2 Destruktivní metody

3.5.2.1 Pevnost v jednoosém tlaku

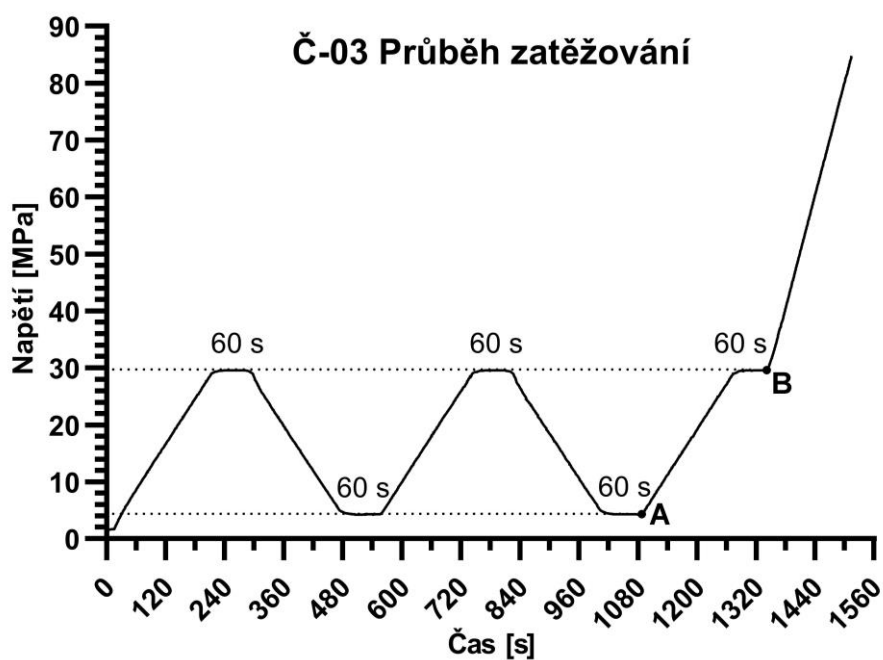
Zkouška pevnosti v jednoosém tlaku byla provedena na sestavě od firmy CONTROLS s využitím servo-hydraulické ovládací konzole ADVANTEST 9 a zatěžovacího rámu o kapacitě 500 kN.

Tělesa ve tvaru válce o štíhlostním poměru 2 byla osazena dvěma svislými 30mm a jedním vodorovným 20mm tenzometrem. K tenzometrům byly připájeny vodiče pro připojení do ovládací konzole.



Obrázek 3-13: Ukázka osazení tenzometrů na testovaném tělese, foto: autor

Svislá deformace byla kromě tenzometrů měřena i pomocí trojice LVDT měřičů. Tělesa pak byla zatěžována podle následujícího postupu pro výpočet statického modulu pružnosti a Poissonova čísla:



Obrázek 3-14: Průběh zatěžování těles osazených tenzometry

Dosažením do rovnice (2.12) byla vyčíslena prostá tlaková pevnost jednotlivých těles.

Tabulka 3-13: Zjištěné hodnoty prosté tlakové pevnosti pro tělesa granitu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)			
Těleso	Síla při porušení	Plocha	Prostá tlaková pevnost
	[kN]	[mm ²]	[MPa]
Č-01	158,8	1521	104,4
Č-02	134,8	1521	88,6
Č-03	129,1	1521	84,9
	Průměr		92,6

Tabulka 3-14: Zjištěné hodnoty prosté tlakové pevnosti pro tělesa granitu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)			
Těleso	Síla při porušení	Plocha	Prostá tlaková pevnost
	[kN]	[mm ²]	[MPa]
R-01	263,8	2190	120,5
R-04	155,0	1500	103,3
R-05	158,2	1514	104,5
R-06	231,4	1507	153,6
	Průměr		120,5



Obrázek 3-15: Ukázka porušeného tělesa Č-02, foto: autor



Obrázek 3-16: Větší úlomky tělesa R-01 po křehkém porušení, foto: autor



Obrázek 3-17: Menší úlomky tělesa R-01, které při porušení explodovalo, foto: autor

Ze získaných hodnot z tenzometrů v bodech A a B ze zatěžovacího postupu byl pak dosažením do rovnic (2.13 a 2.14) vyčíslen statický modul pružnosti a Poissonovo číslo, s přesností na dvě desetinná místa.

Tabulka 3-15: Vyhodnocení dat z tenzometrů pro granit typu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)								
Těleso	A			B			Statický modul pružnosti	Poissonovo číslo
	Napětí	Osově poměrné přetvoření	Radiální poměrné přetvoření	Napětí	Osově poměrné přetvoření	Radiální poměrné přetvoření		
	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		
Č-01	4,27	590,0	-14,0	29,59	1324,3	-153,0	34,48	0,19
Č-02	4,27	523,8	-34,8	29,59	1276,1	-181,0	33,66	0,19
Č-03	4,27	329,5	-	29,59	1081,7	-	33,66	-
						Průměr	33,93	0,19

Tabulka 3-16: Vyhodnocení dat z tenzometrů pro granit typu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)								
Těleso	A			B			Statický modul pružnosti	Poissonovo číslo
	Napětí	Osově poměrné přetvoření	Radiální poměrné přetvoření	Napětí	Osově poměrné přetvoření	Radiální poměrné přetvoření		
	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		
R-05	4,29	197,8	-26,8	29,72	834,2	-154,6	39,96	0,20
R-06	4,31	150,7	-1,6	29,86	719,5	-88,7	44,92	0,15
						Průměr	42,44	0,18

U tělesa Č-03 byl patrně chybně osazen vodorovný tenzometr, a proto bylo vyřazeno z výpočtu Poissonova čísla. U tělesa R-04 hodnoty statického modulu pružnosti a Poissonova čísla vycházely nereálně, a proto byly také vyřazeny.

Pro granit typu Čeřínek byly stanoveny následující charakteristiky:

Prostá tlaková pevnost **92,6 MPa**, statický modul pružnosti **33,93 GPa** a Poissonovo číslo **0,19**.

Pro granit typu Mrákotín byly stanoveny následující charakteristiky:

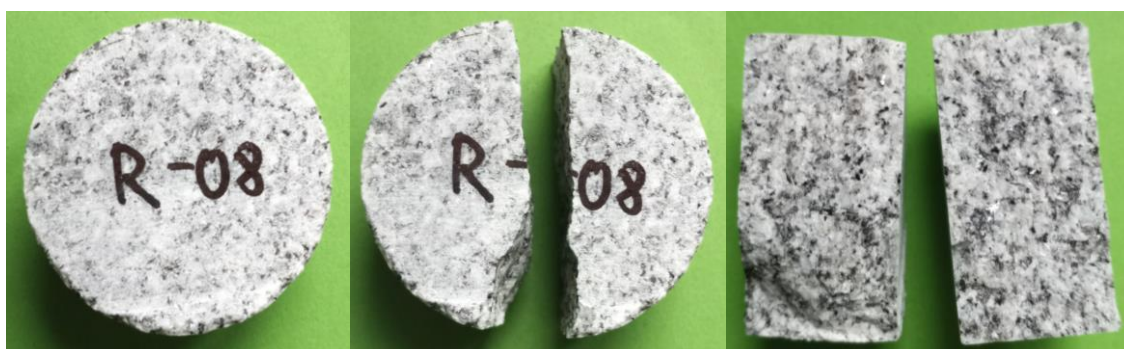
Prostá tlaková pevnost **120,5 MPa**, statický modul pružnosti **42,44 GPa** a Poissonovo číslo **0,18**. Tělesa se při porušení chovala velmi křehce.

3.5.2.2 Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu byla provedena na sestavě od firmy CONTROLS s využitím servo-hydraulické ovládací konzole ADVANTEST 9 a zatěžovacího rámu o kapacitě 500 kN. Tělesa tvaru válce o štíhlostním poměru 0,5 byla umístěna do zkušebního lisu osou kolmo na směr zatěžování. K porušení došlo typickým způsobem a to jednou svislou trhlinou, která těleso rozdělila na dvě téměř stejně velké poloviny. Pevnost v příčném tahu byla zjištěna dosazením naměřených hodnot do rovnice (2.15).



Obrázek 3-18: Ukázka porušení tělesa Č-08 příčným tahem, foto: autor



Obrázek 3-19: Ukázka porušení tělesa R-08 příčným tahem, foto: autor

Tabulka 3-17: Příčná tahová pevnost granitu typu Čerínek

Granit typu Čerínek (lokalita Hrádek)				
Těleso	Síla při porušení	Průměr tělesa	Délka tělesa	Pevnost v příčném tahu
	[kN]	[mm]	[mm]	[MPa]
Č-07	9,93	38,0	18,1	9,20
Č-08	6,82	44,0	20,6	4,79
Č-09	6,22	44,0	20,0	4,50
Průměr				6,16

Tabulka 3-18: Příčná tahová pevnost granitu typu Mrákotín

Granit typu Mrákotín (lom Rácov)				
Těleso	Síla při porušení	Průměr tělesa	Délka tělesa	Pevnost v příčném tahu
	[kN]	[mm]	[mm]	[MPa]
R-07	21,31	43,8	21,3	14,55
R-08	19,59	44,0	22,5	12,60
R-09	17,25	43,9	22,8	10,98
R-10	26,80	52,7	25,9	12,51
Průměr				12,66

Pro granit typu Čeřínek byla stanovena pevnost v příčném tahu **6,16 MPa**, což je přibližně 15x nižší pevnost, než prostá tlaková pevnost. Pro granit typu Mrákotín je pevnost v příčném tahu zhruba dvojnásobná a to **12,66 MPa**. Tato hodnota je 9,5x nižší, než prostá tlaková pevnost téže horniny.

3.5.2.3 Triaxiální pevnost

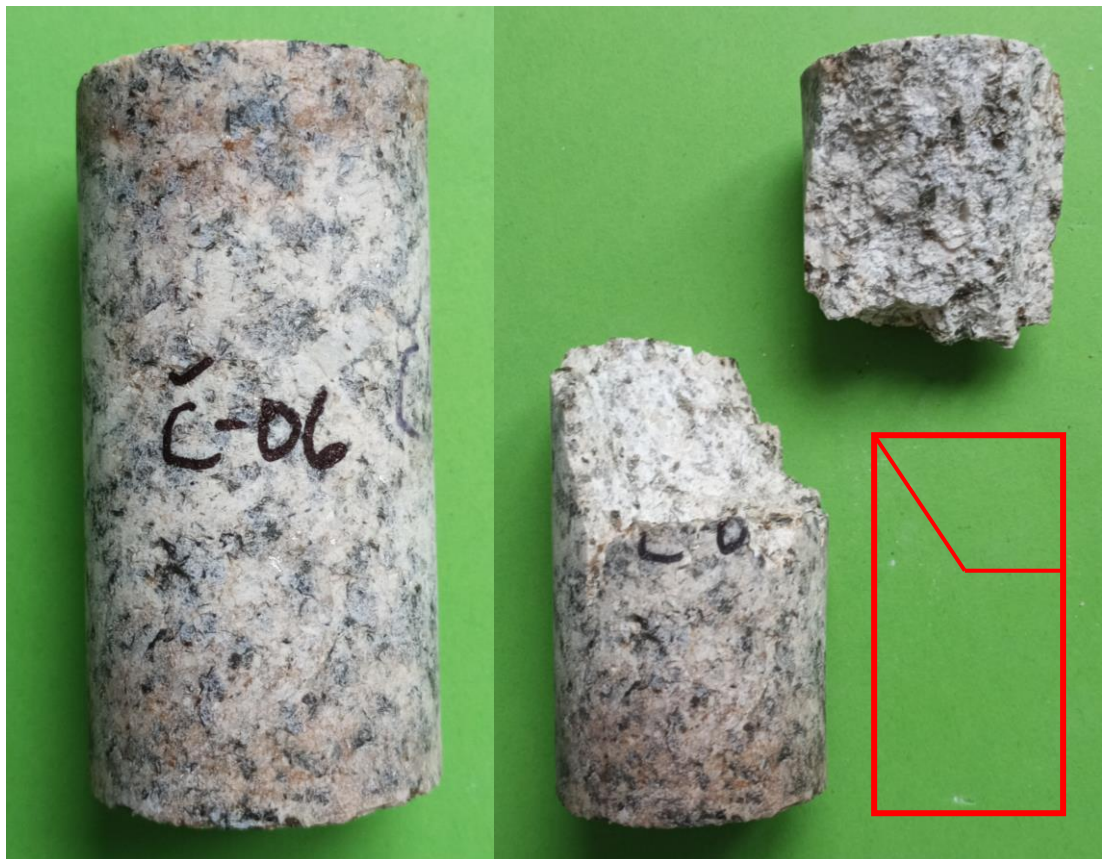
Zkouška triaxiální pevnosti byla provedena na sestavě od firmy CONTROLS s využitím servo-hydraulických ovládacích konzolí ADVANTEST 9 a SERCOMP 7 a zatěžovacího rámu o kapacitě 500 kN. Tělesa o štíhlostním poměru 2 byla umístěna do Hoekovy buňky napojené na konzoli SERCOMP umístěné v zatěžovacím lisu. Svislá deformace byla měřena pomocí trojice LVDT snímačů. Při udržování převahy svislého tlaku bylo nejprve dosaženo požadovaného komorového tlaku, pak následovalo samotné zatěžování až do porušení. Osové napětí bylo zjištěno dosazením do rovnice (2.12). Výsledky zkoušek těles Č-04, Č-05 a Č-06:

Tabulka 3-19: Výsledky triaxiálních zkoušek granitu typu Čeřínek

Granit typu Čeřínek (lokalita Hrádek)				
Těleso	Síla při porušení	Plocha	Osové napětí	Komorové napětí
	[kN]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]
Č-04	140,08	1140	122,9	5,0
Č-05	198,15	1134	174,7	10,0
Č-06	261,93	1128	232,2	15,0

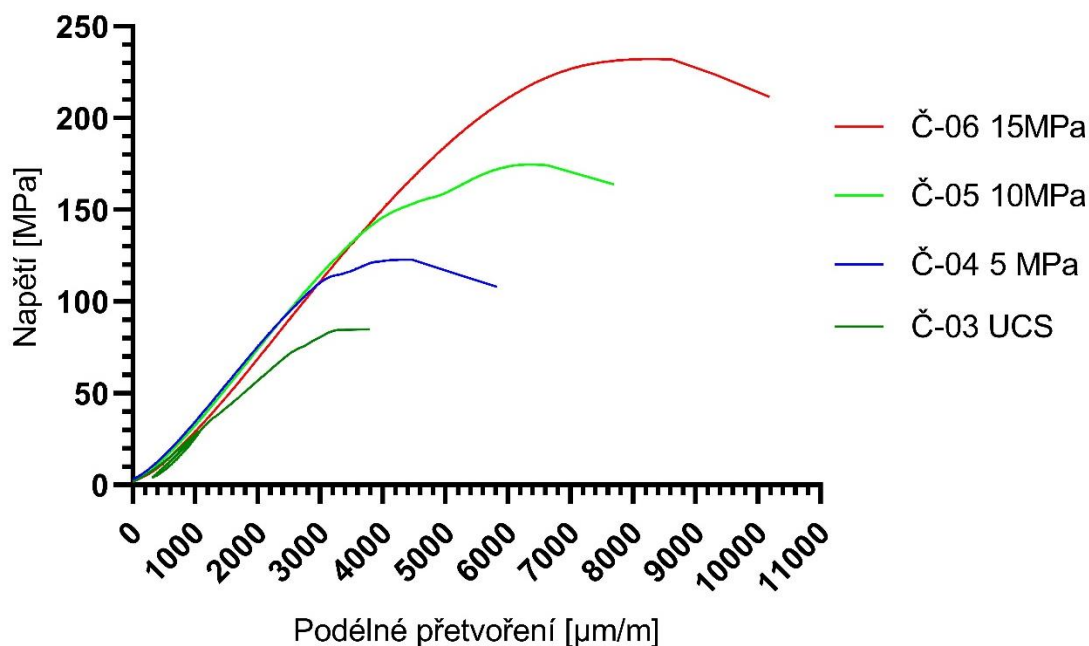


Obrázek 3-20: Porušení tělesa Č-05 při triaxiální zkoušce šikmou trhlinou, foto: autor



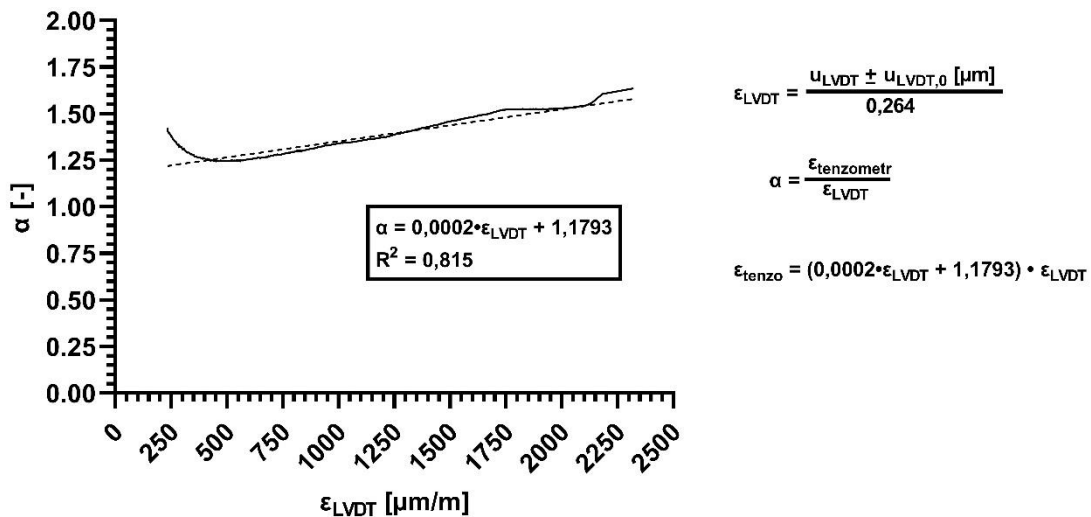
Obrázek 3-21: Porušení tělesa Č-06 při triaxiální zkoušce. Při maximálním testovaném komorovém tlaku došlo k rozvoji specifického porušení tělesa, foto: autor

Pro srovnání byly pracovní digramy všech tří triaxiálních zkoušek a jedné prosté tlakové zkoušky granitu typu Čeřínek shrnuty do jednoho grafu. Z nich je patrné chování této horniny v průběhu zatěžování. Na začátku zatěžování hornina nejprve vykazuje zpevnění, pak následuje přibližně lineární průběh. Následně dochází k výraznému změkčování až do porušení. Z grafu je také patrné, že se zvyšujícím se komorovým tlakem hornina dosahuje výrazně větších poměrných přetvoření před porušením.



Obrázek 3-22: Pracovní diagramy triaxiálních zkoušek a zkoušky prosté tlakové pevnosti granitu typu Čeřínek

Pracovní diagramy triaxiálních zkoušek bylo nezbytné upravit, protože použité LVDT snímače měří, na rozdíl od tenzometrů, přetvoření celé soustavy skládající se z tělesa a Hoekovy buňky. Byla zjištěna následující závislost mezi přetvořeními:

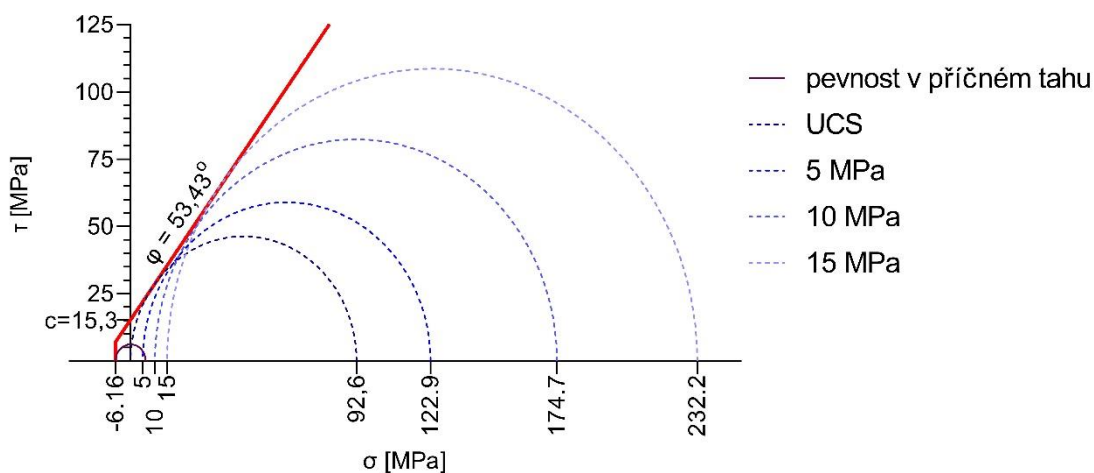


Obrázek 3-23: Korelace mezi poměrnými přetvořeními tenzometrů a LVDT měřičů

Původní hodnoty přetvoření byly proti upraveným zhruba poloviční. Tato korelace je vhodná pouze pro zpřesnění výsledků z LVDT snímačů. Pro zjištění přesných hodnot poměrných přetvoření by bylo potřeba použít tenzometry i při triaxiálních zkouškách.

3.6 Mohr-Coulombova podmínka porušení

Pro granit typu Čerřínek byla sestrojena Mohr-Coulombova podmínka porušení, čímž byla stanovena hodnota koheze $c = 15,3 \text{ MPa}$ a úhel vnitřního tření $\varphi = 53,43^\circ$.



Obrázek 3-24: Mohr-Coulombova podmínka porušení pro granit typu Čerřínek

4 SHRNUÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V tabulkách níže jsou shrnuty výsledky této práce, které jsou dále diskutovány.

Tabulka 4-1: Souhrn získaných dat

		Granit typu Čeřínek				Granit typu Mrákotín				
		Pr.	Std [-]	Var [%]	N	Pr.	Std [-]	Var [%]	N	
Objemová hmotnost	[kg/m ³]	2585	± 15	5,9	9	2606	± 18,9	7,3	10	
Pevnost v prostém tlaku	[MPa]	92,6	± 10,4	11,2	3	120,5	± 23,4	19,4	4	
Statický modul pružnosti	[GPa]	33,93	± 0,47	1,4	3	42,44	± 3,51	19,6	2	
Poissonovo číslo	[-]	0,19	± 0,00	0,0	2	0,18	± 0,04	19,6	2	
Pevnost v příčném tahu	[MPa]	6,16	± 2,63	42,8	3	12,66	± 1,46	11,6	4	
Odrážová tvrdost (44mm+)	[-]	52,3	± 1,2	2,2	3	59,3	± 3,5	5,8	4	
Tlaková pevnost (44mm+)	Vlastní korelace	[MPa]	92,6	± 9,5	10,3	3	-	-	-	-
	Wang et al.	[MPa]	85,2	± 5,6	6,6	3	127,4	± 23,6	18,5	4
	Yasar a Erdogan	[MPa]	94,5	± 9,1	9,6	3	-	-	-	-
Dyn. modul pružnosti	[GPa]	35,98	± 5,83	16,2	6	55,08	± 1,76	3,19	6	
Orientační nasákavost	[%]	1,1	± 0,3	22,9	3	0,3	± 0,0	0,0	2	
Hmotnostní aktivita	[Bq/kg]	233,1	± 22,7	9,7	4	420,2	± 111,1	26,4	4	

Pozn.: Pr. – průměrná hodnota; Std – směrodatná odchylka; Var – variační součinitel (Std/Pr.); N – počet hodnot

Tabulka 4-2: Souhrn získaných triaxiálních vlastností

Granit typu Čeřínek			
Triaxiální pevnost	5 MPa	[MPa]	122,9
	10 MPa	[MPa]	174,7
	15 MPa	[MPa]	232,2
Koheze		[MPa]	15,3
Úhel vnitřního tření		[°]	53,43

Podle předpokladu bylo laboratorně ověřeno zvětrání vzorků granitu typu Čeřínek. Jistý stupeň alterace ovšem vykazují i vzorky granitu typu Mrákotín. Oproti granitu typu Mrákotín má granit typu Čeřínek o něco menší objemovou hmotnost a zároveň vyšší nasákavost. Co se týče pevnostních charakteristik, granit typu Čeřínek výrazně zaostává za granitem typu Mrákotín, totéž platí pro modul pružnosti i odrazovou tvrdost. Přesto i granit typu Mrákotín vykazuje na žulu lehce nižší pevnost.

Obě horniny obsahují nadprůměrné množství radioaktivního uranu, thoria i draslíku. V hmotnostní aktivitě se výrazně liší, granit typu Mrákotín vykazuje téměř dvojnásobnou hodnotu oproti granitu typu Čeřínek.

V této práci bylo použito celkem pět korelačních vztahů pro prostou tlakovou pevnost, z nichž čtyři byly převzaté a jeden vlastní pro granit typu Čeřínek. Při vyhodnocení korelovaných pevností všech těles bylo zjištěno, že menší průměr tělesa výrazně ovlivňuje odrazovou tvrdost a tím i korelovanou pevnost. Tělesa s průměrem 38 mm byla z hodnocení vyřazena. Při porovnání pevností z korelačních vztahů s pevnostmi naměřenými destruktivní metodou lze říci, že z převzatých vztahů téměř dokonale odpovídá Wang et al. (2017) pro obě horniny, pro granit typu Čeřínek pak ještě Yasar a Erdogan (2004), který ale pro granit typu Mrákotín výrazně nadhodnotil pevnost. Vlastní korelační vztah stanovený pro granit typu Čeřínek lze (s ohledem na malé množství zkušebních těles) považovat spíše za orientační.

Dále byl také zjištěn dynamický modul pružnosti pomocí ultrazvukové impulzové metody, který u granitu typu Čeřínek téměř odpovídá statickému, na rozdíl od granitu typu Mrákotín, u kterého je dynamický modul výrazně nadhodnocen o více než 10 GPa oproti statickému.

Díky triaxiálním zkouškám byly pro granit typu Čeřínek zjištěny také hodnoty koheze a úhlu vnitřního tření potřebné pro popis triaxiálního chování horniny. Tyto hodnoty však byly stanoveny na relativně zvětralém horninovém materiálu, takže jsou pravděpodobně výrazně podhodnoceny. V ideálním případě by bylo potřeba na lokalitě provést vrt za účelem získání vzorků dostatečně zdravé horniny. Za předpokladu umístění plánovaného úložiště do hloubky asi 500 m by tlak v okolním masivu odpovídal asi 13 MPa, při kterém testovaná hornina vykazuje dostatečnou pevnost.

Získané charakteristiky obou granitů lze také srovnat s výsledky laboratorních zkoušek (provedených na vzorcích granitu „Bílý Kámen“ z lomu Boršov severně od lokality Hrádek) dostupných z technické zprávy SÚRAO [41].

Tabulka 4-3: Srovnání charakteristik zkoumaných granitů s laboratorními zkouškami provedenými v rámci předběžného hodnocení potenciálních lokalit

		Granit typu Čeřínek		Granit typu Mrákotín		Granit "Bílý Kámen" [41]	
		-	Std [-]	-	Std [-]	-	Std [-]
Objemová hmotnost	[kg/m ³]	2585	± 15	2606	± 18,9	2587	-
Pevnost v prostém tlaku	[MPa]	92,6	± 10,4	120,5	± 23,4	175,6	± 27,5
Statický modul pružnosti	[GPa]	33,93	± 0,47	42,44	± 3,51	38,3	± 8,5
Poissonovo číslo	[-]	0,19	± 0,00	0,18	± 0,04	0,20	± 0,01
Pevnost v příčném tahu	[MPa]	6,16	± 2,63	12,66	± 1,46	8,9	± 1,8
Triaxiální pevnost (13 MPa)	[MPa]	215	přibližně	-	-	317,2	± 18,9
Dynamický modul pružnosti	[GPa]	35,98	± 5,83	55,08	± 1,76	46,9	± 7,9

Granit označovaný jako „Bílý Kámen“ je dle databáze České geologické služby [7] drobnozrnný až středně zrnitý, spíše biotitický, tudíž je podobnější granitu typu Mrákotín. Objemovou hmotností ale odpovídá granitu typu Čeřínek. Prostou tlakovou pevností a triaxiální pevností granit „Bílý Kámen“ výrazně převyšuje oba granity zkoumané v této práci. Pevností v příčném tahu a modulem pružnosti (jak statickým, tak dynamickým) se granit „Bílý Kámen“ pohybuje mezi oběma testovanými granity. Poissonovo číslo je u všech tří granitů velmi podobné.

Z tohoto srovnání lze konstatovat, že hodnoty získané z laboratorních zkoušek realizovaných v rámci této práce udávají reálné hodnoty. Na hodnotách tlakových pevností zkoumaných v této práci je zřetelný relativně velký vliv míry alterace (za předpokladu podobných vlastností u všech tří granitů ve zdravém stavu, stav zvětrání testovaných vzorků granitu „Bílý Kámen“ není znám). Kromě toho mohou být pevnosti těchto tří hornin ovlivněny také jejich rozdílnou strukturou a velikostí částic, případně také různým průměrem zkušebních těles (v případě granitu „Bílý Kámen“ byla použita tělesa o průměru okolo 50 mm, v případě granitů zkoumaných v této práci 38 mm, 44 mm a 52,8 mm, štíhlostní poměr byl u všech tří granitů stejný).

5 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly zkoumány mechanické a fyzikální vlastnosti dvou petrograficky podobných granitů, typu Čeřínek, který vystupuje přímo na zkoumané lokalitě Hrádek, a dále typu Mrákotín z nedalekého lomu Rácov. Zjištěné hodnoty mohou být použity pro posouzení vhodnosti masivu pro umístění hlubinného úložiště jaderného odpadu.

Podářilo se splnit základní cíl práce a to stanovit všechny zamýšlené vlastnosti zkoumaných hornin. Jistou komplikaci představovalo odvrtání dostatečného množství testovaných vzorků, neboť se oba zkoumané typy žul ukázaly jako velmi těžko vrtatelné, a to i při použití specializovaných vrtáků. Do budoucna by pro zhotovení zkušebních těles bylo vhodné použít silnější vrtačku se strojním přitlakem a vrták o průměru alespoň 50 mm pro omezení vlivu průměru na naměřené hodnoty.

V teoretické části bakalářské práce jsou popsány použité metody studia, dále geologie zkoumané lokality a krátký popis problematiky hlubinného úložiště.

V praktické části jsou uvedeny provedené zkoušky a jejich výsledky, ze kterých lze vyvodit následující závěry:

- 1) Odrazová tvrdost závisí na průměru tělesa, čím menší průměr, tím větší tvrdost. Proto je vhodné použít tělesa o průměru minimálně 44mm, nebo i větší.
- 2) Zkoumaný granit při zatěžování nejprve vykazuje zpevnění, pak se deformuje prakticky lineárně. Při napětích blízcích se pevnosti dochází k výraznému změkčení. Při zatížení komorovým tlakem hornina vykazuje výrazně větší poměrná přetvoření, než při prosté tlakové zkoušce. S rostoucím komorovým tlakem se tento rozdíl zvyšuje.
- 3) Testované vzorky granitu typu Čeřínek měly na žulu spíše nižší pevnost, vzorky granitu typu Mrákotín by patřily spíše do střední části intervalu pevností žul. Pozorované charakteristiky lze korelovat s variabilním stupněm alterace/zvětrání testovaných vzorků.
- 4) Míra alterace živců a biotitu má jistě vliv na pevnostní charakteristiky, avšak vliv může mít rovněž proměnlivá velikost, distribuce a uspořádání jednotlivých minerálů u studovaných typů granitu.

- 5) Pevnost v příčném tahu obou zkoumaných hornin je výrazně nižší, než prostá tlaková pevnost. Pro granit typu Čeřínek je tato pevnost 15krát nižší, pro granit typu Mrákotín je pevnost v příčném tahu snížena 9,5krát.
- 6) Pevnostní charakteristiky zkoumaných hornin jsou dostačující pro vybudování hlubinného úložiště, avšak toto bude případně nutné do budoucna ověřit studiem čerstvého vrtného materiálu.

6 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] PERTOLDOVÁ, Jaroslava. Lokalizace perspektivních území pro geologické charakterizační práce a perspektivní území pro projektové práce pro účely hodnocení potenciálních lokalit HÚ (Důvodová zpráva). 2020, 52s.
- [2] KAMENÍKOVÁ, Tereza. *Lokalita Hrádek | SÚRAO* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/lokalita-hradek/>
- [3] CHLUPÁČ, Ivo, Rostislav BRZOBOHATÝ, Jiří KOVANDA a Zdeněk STRÁNÍK. *Geologická minulost České republiky*. Academia Praha, 2002. ISBN 978-80-200-0914-2.
- [4] *Moldanubický pluton - Geologická encyklopedie* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?moldanubicky_pluton
- [5] *Moldanubikum* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.parkgeo.cz/moldanubikum.htm>
- [6] POSPÍŠIL, Pavel. *Geologie: Základy regionální geologie České Republiky*. 2004. VUT v Brně, Fakulta stavební.
- [7] *Geovědní mapy 1 : 50 000* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- [8] *Exkurzní lokalita Rohozná* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://pruvodce.geol.cechy.sci.muni.cz/Rohozna/rohozna.htm>
- [9] *Geologické lokality - Lokalizace - Čertův hrádek* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://lokality.geology.cz/d.pl?item=7&id=961&Okres=Jl&vyb=1&text=Lokality%20v%20okresu>
- [10] *Surovinový informační systém* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/suris/>
- [11] ČÍŽEK, Jiří. *Přírodní památka Čertův Hrádek, Rohozná* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.hrady.cz/prirodni-scenerie-prirodni-pamatka-certuv-hradek>
- [12] *Geologické lokality - Lokalizace - Ráčov* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://lokality.geology.cz/d.pl?item=7&id=3534&Okres=Jl&vyb=1&text=Lokality%20v%20okresu>
- [13] *Rozpadové řady | Eduportál Techmania* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/prirozena-radioaktivita/rozpadove-rady>
- [14] MANOVÁ, Magdalena a Milan MATOLÍN. *Radiometrická mapa České Republiky* [online]. 1995 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: http://www.geology.cz/demo/cd_geocr500/stranky/p_radiometricka.html

- [15] ZIMÁK, Jiří a Jindřich ŠTELCL. *Přirozená radioaktivita hornin moravskoslezského kulmu v oblasti Nízkého Jeseníku a Oderských vrchů: příspěvek k poznání zdrojové oblasti klastického materiálu*. 2004
- [16] GREGEROVÁ, Miroslava, Bohuslav FOJT a Václav VÁVRA. *Mikroskopie horninotvorných a technických minerálů*. Moravské zemské muzeum, 2002. ISBN 978-80-7028-195-6.
- [17] OKRUSCH, Martin a Hartwig E. FRIMMEL. Weathering and Mineral Formation in Soils. In: Martin OKRUSCH a Hartwig E. FRIMMEL, ed. *Mineralogy: An Introduction to Minerals, Rocks, and Mineral Deposits*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020, s. 405–415. ISBN 978-3-662-57316-7.
- [18] QUE, Meideno a Alistair R. ALLEN. Sericitization of plagioclase in the Rosses Granite Complex, Co. Donegal, Ireland. *Mineralogical Magazine*. 1996, **60**(403), 927–936. ISSN 0026-461X, 1471-8022.
- [19] HORÁK, Vladislav. *Mechanika hornin: Laboratoř mechaniky hornin*. 2006.
- [20] KRMÍČEK, Lukáš. *Rozvoj a perspektivy geotechnické vědní disciplíny „Mechanika hornin“ na VUT v Brně*. Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2021. ISBN 978-80-214-5949-6.
- [21] *Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock (I) - D 420 - D 5611 v.04.08*. ISBN 978-0-8031-3808-7.
- [22] GOODMAN, Richard E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd edition. New York: Wiley, 1991. ISBN 978-0-471-81200-5.
- [23] ULUSAY, Resat, J. A HUDSON, INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, a COMMISSION ON TESTING METHODS. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. Ankara, Turkey: Commission on Testing Methods, International Society of Rock Mechanics, 2007. ISBN 978-975-93675-4-1.
- [24] ZANG, Arno a Ove STEPHANSSON. *Stress Field of the Earth's Crust*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. ISBN 978-1-4020-8443-0.
- [25] ULUSAY, R., ed. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-07712-3.
- [26] DVORSKÝ, Petr. *Využití ultrazvukové impulsové metody - nástroj pro stanovení pevností cementů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [27] ČSN EN 12504-4: *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 2021. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [28] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [29] *Pundit 200 is a best-in-class UPV test instrument* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200>

- [30] HAJN, Jakub. *Tvrdoměrné metody v mechanice hornin*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav geotechniky.
- [31] *Gardco :: Schmidt Test Hammers* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://gardco.com/pages/hardness/schmidthammer.cfm>
- [32] *Original Schmidt | Schmidt Rebound Hammer* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.screeningagle.com/en/products/original-schmidt>
- [33] Figure 3.16: Schmidt Hammer Test JCS estimation chart showing... *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schmidt-Hammer-Test-JCS-estimation-chart-showing-Correlation-between-Schmidt-hammer_fig31_320084120
- [34] WANG, Hu, Hang LIN a Ping CAO. Correlation of UCS Rating with Schmidt Hammer Surface Hardness for Rock Mass Classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017, **50**(1), 195–203 [cit. 2022-03-19]. ISSN 1434-453X.
- [35] YAŞAR, E. a Y. ERDOĞAN. Estimation of rock physicochemical properties using hardness methods. *Engineering Geology*. 2004, **71**(3), 281–288 [vid. 2022-03-19]. ISSN 0013-7952.
- [36] *ČSN EN 14580: Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení statického modulu pružnosti*. 2005. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [37] ZÁVACKÝ, Martin a Jan ŠTEFAŇÁK. Geotechnická laboratoř ve výzkumném centru AdMaS. *Tunel*. 2018, **27**(4).
- [38] Hoek cells and sample extruder. *Geo-Con Products* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.geo-con.com.au/product/hoek-cells-and-sample-extruder/>
- [39] *Hoek Cells | Controls Group* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.controls-group.com/eng/accessories-for-uniaxial-and-triaxial-testing/hoek-cells.php>
- [40] ZEMAN, Otakar. *Petrografie a regionální geologie Českého masívu*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01178-X.
- [41] PETRUŽÁLEK, M. *Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů na potenciálních lokalitách HÚ*.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: Vymezení vhodného polygonu na uvažované lokalitě Hrádek, převzato z [2].....	11
Obrázek 2-2: Zjednodušená geologická mapa ČR dle České geologické služby. Centrální větve moldanubického plutonu na mapě odpovídá číslu 6, převzato z [6]	12
Obrázek 2-3: Umístění studovaných lokalit v rámci centrální větve moldanubického plutonu (R = Rácov, Č = Čertův Hrádek), převzato a upraveno z [7]	12
Obrázek 2-4: Žulová skalní stěna mrazového srubu, Čertův hrádek, foto: autor.....	13
Obrázek 2-5: Ukázka puklinového systému, Čertův Hrádek, foto: autor	14
Obrázek 2-6: Pohled na dolní etáž lomu Rácov, foto: autor	14
Obrázek 2-7: Gama spektrometr GR-130 (Exploranium), foto: autor	15
Obrázek 2-8: Schéma způsobů prozvučování těles, vytvořil autor.....	19
Obrázek 2-9: Ukázka přístroje Pundit 200 (Proceq) pro ultrazvukovou impulzovou metodu využitého v bakalářské práci, převzato z [29].....	20
Obrázek 2-10: Schéma Schmidtova kladívka, převzato z [31]	21
Obrázek 2-11: Schmidtovo kladívko typu L od firmy Proceq, převzato z [32].....	21
Obrázek 2-12: Bieniawského diagram pro určení prosté tlakové pevnosti z naměřené odrazové tvrdosti pro Schmidtovo kladívko typu L, převzato z [33].....	22
Obrázek 2-13: Časový průběh prosté tlakové zkoušky za účelem zjištění modulu pružnosti, převzato z [36]	24
Obrázek 2-14: Idealizované schéma zatěžování testovaného tělesa při „Brazílské zkoušce“, vytvořil autor.....	25
Obrázek 2-15: Schéma Hoekovy buňky, převzato z [38]	26
Obrázek 2-16: Ukázka Hoekovy buňky a veškerého příslušenství, převzato z [39]	27

Obrázek 2-17: Empirické kritérium porušení vyjádřené pomocí Mohrových kružnic, upraveno z [19]	27
Obrázek 3-1: Přesné umístění lokalit pro odběr vzorků (R = Rácov, Č = Čeřínek), převzato a upraveno z [9]	28
Obrázek 3-2: Ukázky vzorkovaných hornin, vlevo blok granitu typu Čeřínek, vpravo bloky granitu typu Mrákotín, foto: autor	29
Obrázek 3-3: Vrtačka WEKA DK 17 a použité jádrové vrtáky, foto: autor	29
Obrázek 3-4: Hotová sada testovacích těles, foto: autor	30
Obrázek 3-5: Zhotovené petrografické výbrusy, foto: autor	31
Obrázek 3-6: Ukázka kontaktu žíly mikrodioritu s granitem typu Mrákotín, lom Rácov. Alkalické živce granitu jsou zakaleny produkty sericitizace (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček	32
Obrázek 3-7: Ukázka kontaktu biotitické ruly s granitem typu Mrákotín, lom Rácov. Alkalické živce granitu jsou zakaleny produkty sericitizace (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček	32
Obrázek 3-8: Ukázka hrubozrnného granitu typu Čeřínek s variabilně přeměněnými alkalickými živci, které částečně vystupují ve formě tzv. pseudomorfóz, Čertův hrádek (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček	33
Obrázek 3-9: Ukázka textury hrubozrnného granitu typu Čeřínek. Pro vzorek je charakteristická přeměna alkalického živce (pozorována byla tři stádia) a částečná chloritizace biotitu (délka snímku: 4 cm), foto: Lukáš Krmíček	33
Obrázek 3-10: Povrchové snímky zkoumaných hornin, Afs - alkalický živec, Bt - biotit, Qz - křemen, foto: Lukáš Krmíček	34
Obrázek 3-11: Závislost odrazové tvrdosti na průměru tělesa	40
Obrázek 3-12: Korelace prosté tlakové pevnosti pro granit Čeřínek	40
Obrázek 3-13: Ukázka osazení tenzometrů na testovaném tělese, foto: autor	42

Obrázek 3-14: Průběh zatěžování těles osazených tenzometry	43
Obrázek 3-15: Ukázka porušeného tělesa Č-02, foto: autor	44
Obrázek 3-16: Větší úlomky tělesa R-01 po křehkém porušení, foto: autor	44
Obrázek 3-17: Menší úlomky tělesa R-01, které při porušení explodovalo, foto: autor....	45
Obrázek 3-18: Ukázka porušení tělesa Č-08 příčným tahem, foto: autor	47
Obrázek 3-19: Ukázka porušení tělesa R-08 příčným tahem, foto: autor	47
Obrázek 3-20: Porušení tělesa Č-05 při triaxiální zkoušce šikmou trhlinou, foto: autor	49
Obrázek 3-21: Porušení tělesa Č-06 při triaxiální zkoušce. Při maximálním testovaném komorovém tlaku došlo k rozvoji specifického porušení tělesa, foto: autor	49
Obrázek 3-22: Pracovní diagramy triaxiálních zkoušek a zkoušky prosté tlakové pevnosti granitu typu Čeřínek	50
Obrázek 3-23: Korelace mezi poměrnými přetvořeními tenzometrů a LVDT měřičů	51
Obrázek 3-24: Mohr-Coulombova podmínka porušení pro granit typu Čeřínek	51

8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1: Naměřené hodnoty obsahů draslíku, uranu a thoria v horninách a vypočtená hmotnostní aktivita na jednotlivých měřených lokalitách	31
Tabulka 3-2: Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost těles z granitu Čeřínek.....	35
Tabulka 3-3: Rozměry, hmotnost a objemová hmotnost těles z granitu Mrákotín	36
Tabulka 3-4: Stanovení nasákavosti granitu typu Čeřínek	37
Tabulka 3-5: Stanovení nasákavosti granitu typu Mrákotín.....	37
Tabulka 3-6: Dynamický modul pružnosti granitu Čeřínek	38
Tabulka 3-7: Dynamický modul pružnosti granitu Mrákotín.....	38
Tabulka 3-8: Naměřené hodnoty odrazové tvrdosti pro granit Čeřínek	39
Tabulka 3-9: Naměřené hodnoty odrazové tvrdosti pro granit Mrákotín.....	39
Tabulka 3-10: Data pro korelaci prosté tlakové pevnosti pro granit Čeřínek	40
Tabulka 3-11: Hodnoty korelovaných prostých tlakových pevnosti pro granit Čeřínek	41
Tabulka 3-12: Hodnoty korelovaných prostých tlakových pevnosti pro granit Mrákotín...	41
Tabulka 3-13: Zjištěné hodnoty prosté tlakové pevnosti pro tělesa granitu Čeřínek.....	43
Tabulka 3-14: Zjištěné hodnoty prosté tlakové pevnosti pro tělesa granitu Mrákotín ...	43
Tabulka 3-15: Vyhodnocení dat z tenzometrů pro granit typu Čeřínek	45
Tabulka 3-16: Vyhodnocení dat z tenzometrů pro granit typu Mrákotín	46
Tabulka 3-17: Příčná tahová pevnost granitu typu Čeřínek	47
Tabulka 3-18: Příčná tahová pevnost granitu typu Mrákotín	47
Tabulka 3-19: Výsledky triaxiálních zkoušek granitu typu Čeřínek.....	48
Tabulka 4-1: Souhrn získaných dat	52
Tabulka 4-2: Souhrn získaných triaxiálních vlastností	52
Tabulka 4-3: Srovnání charakteristik zkoumaných granitů s laboratorními zkouškami provedenými v rámci předběžného hodnocení potenciálních lokalit	54

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

9.1 Seznam použitých zkratk

AdMaS	Advanced Materials, Structures and Technologies
Afs	alkalický živec
Bt	biotit
ČGS	Česká geologická služba
FAST	Fakulta stavební
kal.	kalibrovaná odrazová tvrdost
LVDT	linear variable differential transformer – snímač lineárního posunu
M-C	Mohr-Coulombova obálka pevností
N	počet měření
PPL	režim v lineárně polarizovaném světle (s jedním nikolem), u polarizačního mikroskopu
pr. Pr.	průměr
Qz	křemen
Std	směrodatná odchylka
UCS	jednoosá tlaková pevnost, uniaxial compressive strength
Upr.	upravený průměr
Var	variační součinitel, poměr směrodatné odchylky a průměrné hodnoty
VUT	Vysoké učení technické v Brně
XPL	režim se zkříženými polarizátory (se zkříženými nikoly), u polarizačního mikroskopu

9.2 Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A	[mm ²]	průřezová plocha tělesa
a _m	[Bq/kg]	hmotnostní aktivita ekvivalentu ²²⁶ Ra
c	[MPa]	koheze
d, D	[mm]	průměr tělesa
E	[MPa; GPa]	statický modul pružnosti
E _{dyn}	[MPa; GPa]	dynamický modul pružnosti
F	[N]	síla, při které dojde k porušení tělesa
h	[mm]	výška tělesa
k	[-]	kalibrační součinitel pro Schmidtovo kladívko
k ₁	[-]	součinitel rozměrnosti pro jednorozměrné prostředí
k ₂	[-]	součinitel rozměrnosti pro dvojrozměrné prostředí
k ₃	[-]	součinitel rozměrnosti pro trojrozměrné prostředí
l, L	[m; mm]	délka tělesa
m	[kg]	hmotnost
m _N	[g]	hmotnost nasáklého tělesa
m _S	[g]	hmotnost vysušeného tělesa
N	[%]	nasákavost
R ²		koeficient determinace
RL	[-]	Odrážová tvrdost měřena Schmidtovým kladívkem typu L
t	[s]	doba průchodu ultrazvuku
u _{LVDT}	[μm]	posunutí naměřené LVDT snímačem
u _{LVDT,0}	[μm]	počáteční posunutí naměřené LVDT snímačem
V	[m ³]	objem
v _L	[m/s; km/s]	rychlost šíření ultrazvuku
α	[-]	poměr mezi ε _{tenzometr} a ε _{LVDT}

ϵ_{LVDT}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	poměrné přetvoření měřené LVDT měřiči
$\epsilon_{\text{tenzometr}}$	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	poměrné přetvoření měřené tenzometry
ϵ_{x_a}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	osové poměrné přetvoření při odtížení
ϵ_{x_b}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	osové poměrné přetvoření při zatížení
ϵ_{y_a}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	radiální poměrné přetvoření při odtížení
ϵ_{y_b}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	radiální poměrné přetvoření při zatížení
ν	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg/m^3]	objemová hmotnost
σ_1	[MPa]	osový tlak při triaxiální zkoušce
σ_2	[MPa]	komorový tlak při triaxiální zkoušce
σ_3	[MPa]	komorový tlak při triaxiální zkoušce
σ_a	[MPa]	napětí při odtížení
σ_b	[MPa]	napětí při zatížení
σ_c	[MPa]	Pevnost v prostém tlaku
σ_t	[MPa]	pevnost v příčném tahu
τ	[MPa]	smykové napětí
φ	[°]	úhel vnitřního tření