



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# VLIV TEPLoty NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI DROBY

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF GREYWACKE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Marek Brabec**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**prof. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geotechniky  
Student: **Bc. Marek Brabec**  
Vedoucí práce: **prof. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24  
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vliv teploty na mechanické vlastnosti droby

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Existuje řada faktorů ovlivňujících vlastnosti hornin, jeden z významnějších je teplota. Jedná se o důležitou součást horninotvorných procesů, při nichž dochází k přechodu mezi jednotlivými horninovými typy. K působení zvýšených teplot na horninové materiály nedochází jen v přírodě, ale také při široké škále cílených i nechtěných antropogenních jevů (např.: požáry budov, požáry v tunelech nebo akumulace tepla v hlubinném úložišti jaderného odpadu). Jelikož jsou horniny hojně využívány ve stavebnictví, ať už jako opracované stavební dílce, kamenivo do betonu nebo jako spolupůsobící součást nosného systému podzemních staveb, je nutné znát chování hornin v těchto podmínkách.

### **Cíle a výstupy diplomové práce:**

Cílem diplomové práce bude testování vlivu teploty na mechanické vlastnosti kulmské droby z lomu Kobeřice na Drahanské vrchovině. Vzhledem k vysoké pevnosti je tento horninový typ hojně využíván na Moravě jako stavební kámen nebo drcené kamenivo. Droby budou testovány ve spolupráci s Ústavem technologie stavebních hmot a dílců, a to primárně v rozpětí teplot od 200 do 400 °C. Jednotlivé sady vzorků budou vypáleny dle standardní pálicí křivky na požadovanou teplotu a přirozeně ochlazeny. Z laboratorních zkoušek bude provedeno stanovení skleroskopické tvrdosti horniny Schmidovým kladívkem typu L, dále testování pevnosti v prostém tlaku, zkouška pevnosti v příčném tahu a zkouška pevnosti v trojosém tlaku. Mikrostruktura testovaných vzorků bude sledována pomocí polarizačního mikroskopu. Na závěr práce bude realizováno srovnání naměřených parametrů droby mezi jednotlivými sadami testovaných vzorků a hledání závislosti zkoumaných parametrů na teplotě výpalu a vykreslení Mohr-Coulombových obálek pevností.

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

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

HAVLÍČKOVÁ, Dagmar, Martin ZÁVACKÝ a Lukáš KRMÍČEK. Anisotropy of mechanical properties of greywacke. *GeoScience Engineering* [online]. 2019, 65(1). Dostupné z: doi:10.35180/gse-2019-0005

MISKOVSKY, K a T SEIKI. Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types – a laboratory study. In: Yingxin ZHOU, ed. *Harmonising Rock Engineering and the Environment* [online]. B.m.: CRC Press, 2011 [vid. 2022-12-21], s. 815–820. ISBN 978-0-415-80444-8. Dostupné z: doi:10.1201/b11646-149

ZHU, Zhennan, Hong TIAN, Gang MEI, Guosheng JIANG, Bin DOU a Peng XIAO. Experimental investigation on mechanical behaviors of Nanan granite after thermal treatment under conventional triaxial compression. *Environmental Earth Sciences* [online]. 2021, 80(2), 46 [vid. 2022-12-21]. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-020-09326-3

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 27. 2. 2023

L. S.

---

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

---

prof. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Autor této diplomové práce se zabýval studiem vlivu zvýšených teplot na vzorky spodnokarbonské droby odebrané v lomu Kobeřice nedaleko Prostějova. Pro potřeby práce byly vyrobeny dvě sady pravidelných válcových těles z jemnozrnné i relativně hrubozrnné droby, které byly následně vypáleny na teploty až 1200 °C. Takto teplotně alterovaná tělesa byla laboratorně studována metodami mechaniky hornin a petrografie. Výsledky laboratorních zkoušek byly pečlivě interpretovány s cílem najít souvislosti mezi horninovými parametry, strukturními změnami a teplotou výpalu. Diplomová práce dále obsahuje stručně popsanou problematiku termomechaniky hornin, potřebné teoretické poznatky k použitým metodám a geologický kontext Dražanské vrchoviny, odkud testovaná droba pochází.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

mechanika hornin, termomechanika hornin, droba, vliv teploty, laboratorní testování, Dražanská vrchovina

## **ABSTRACT**

The author of this master's thesis studied the influence of high temperatures on Lower Carboniferous greywacke sampled in the Kobeřice quarry near Prostějov. Two sets of cylindrical bodies were produced, made of fine and relatively coarse-grained greywacke. The samples were then fired at temperatures up to 1200 °C. Thermally altered samples were then studied in laboratory using rock mechanics and petrography methods. Results of the study were then carefully interpreted to determine relations between the rock parameters, structural changes and the firing temperature. The master's thesis also contains a brief insight into rock thermomechanics, necessary theoretical background to the used methods and geological context of the Drahany Upland, where the samples of the tested greywacke were taken.

## **KEY WORDS**

rock mechanics, rock thermomechanics, greywacke, temperature influence, laboratory testing, Drahany Upland

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BRABEC, Marek. *Vliv teploty na mechanické vlastnosti droby*. Brno, 2024. 71 s.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.  
Vedoucí práce: prof. RNDr. Lukáš Krmíček, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv teploty na mechanické vlastnosti droby* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 01. 2024

---

Bc. Marek Brabec  
autor

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. RNDr. Lukáši Krmíčkoví, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a informace při nesčetných konzultacích, vstřícný přístup a za možnost podílet se na dalším rozvoji studia hornin na Ústavu geotechniky. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za spolupráci a za realizaci výpalu zkušebních těles. Také bych chtěl poděkovat mým kolegům, Bc. Juraji Štetiarovi za výpomoc při realizaci laboratorních zkoušek, včetně videodokumentace, a Mgr. Bc. Romanu Šimáčkovi za spolupráci při odběru horninových bloků, včetně geologického popisu lomu Kobeřice. Má vděčnost patří také Ing. Petru Čechovi za umožnění odběru horninových bloků v lomu Kobeřice. Děkuji také celému Ústavu geotechniky za umožnění vypracování této diplomové práce a Fakultě stavební za financování specifického výzkumu FAST-S-23-8272, pod který tato diplomová práce spadá. Velký dík patří také mé rodině a přátelům za morální oporu, pomoc a dobré podmínky pro studium.



# OBSAH

1	ÚVOD .....	11
2	TERMOMECHANIKA HORNIN .....	12
2.1	Typické případy působení zvýšené teploty na horniny .....	12
2.2	Laboratorní termomechanické studium hornin .....	15
2.2.1	<i>Teplotní rozsah a zahřívání zkušebních těles</i> .....	15
2.2.2	<i>Stručný přehled speciálních laboratorních metod</i> .....	16
2.2.3	<i>Významné změny horninového materiálu vlivem teploty</i> .....	16
3	POZNATKY K POUŽITÝM ZKUŠEBNÍM METODÁM .....	17
3.1	Stanovení parametrů těles a objemové hmotnosti.....	17
3.2	Zkouška pevnosti v prostém tlaku.....	18
3.2.1	<i>Prostá tlaková pevnost</i> .....	18
3.2.2	<i>Deformace u hornin</i> .....	19
3.2.3	<i>Statický modul pružnosti</i> .....	20
3.2.4	<i>Poissonovo číslo</i> .....	21
3.3	Zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilská zkouška).....	21
3.4	Triaxiální tlaková zkouška .....	22
3.4.1	<i>Mohr-Coulombova podmínka porušení</i> .....	23
3.5	Stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti.....	25
3.6	Petrografické studium horninových výbrusů .....	26
4	GEOLOGICKÝ KONTEXT STUDOVANÉ DROBY .....	27
4.1	Drahanská vrchovina.....	27
4.2	Lom Kobeřice.....	28
5	METODIKA .....	30
5.1	Odběr horninového materiálu a výroba zkušebních těles .....	30
5.1.1	<i>Stanovení parametrů zkušebních těles a objemové hmotnosti</i> .....	31
5.2	Sestavení sad zkušebních těles a jejich výpal .....	31
5.3	Realizace destruktivních a polodestruktivních zkoušek.....	33
5.3.1	<i>Stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti</i> .....	33
5.3.2	<i>Prostá tlaková zkouška a stanovení deformačních charakteristik</i> .....	33
5.3.3	<i>Zkouška pevnosti v příčném tahu</i> .....	34
5.3.4	<i>Triaxiální tlaková zkouška</i> .....	34
5.3.5	<i>Mohr-Coulombova podmínka porušení</i> .....	34
5.4	Další analýzy hrubozrnné droby .....	34

6	VÝSLEDKY .....	35
6.1	Makroskopické změny těles po výpalu .....	35
6.2	Vliv teploty výpalu na objemovou hmotnost .....	36
6.3	Vliv teploty výpalu na prostou tlakovou pevnost.....	36
6.4	Vliv teploty výpalu na statický modul pružnosti .....	37
6.5	Vliv teploty výpalu na hodnotu Poissonova čísla .....	38
6.6	Vliv teploty výpalu na nepřímou tahovou pevnost .....	39
6.7	Sestavení MC podmínky porušení pro jednotlivé sady.....	40
6.8	Vliv teploty výpalu na Schmidovu odrazovou tvrdost.....	42
6.9	Kolorimetrická analýza .....	42
6.10	Petrografický rozbor hrubozrnné droby .....	43
7	SHRNUTÍ A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ.....	50
7.1	Chování droby při teplotách výpalu do 400 °C.....	51
7.2	Degradace vlastností droby působením vysokých teplot .....	52
7.3	Srovnání studovaných typů drob.....	53
7.4	Poznámky k výpalu těles a pokračování výzkumu .....	54
	7.4.1 Objemové změny těles při výpalu .....	54
	7.4.2 Vhodná doba prohřívání .....	54
8	ZÁVĚR .....	55
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	57
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....	64
11	SEZNAM TABULEK .....	67
12	SEZNAM ROVNIC.....	68
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	69
14	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	70
15	SEZNAM PŘÍLOH .....	71

# 1 ÚVOD

Laboratorní testování hornin i zemin je důležitou součástí návrhu geotechnických stavebních děl. Poskytuje totiž nezbytné parametry pro popis přírodního prostředí, do něhož bude dané dílo usazeno, pomocí analytických i numerických výpočtů. Totéž platí v případě využití horninového materiálu jako součásti nosných konstrukcí – často historické budovy či opěrné stěny zhotovené z horninových kvádrů, v současné době rovněž tunely, hlubinná úložiště a jiné podzemní stavby. Zkoušky jsou zpravidla realizovány na neupraveném horninovém materiálu, tedy v přirozeném stavu. Existují ale případy, kdy je nutné vzorky nejprve upravit pro simulaci vybraného externího vlivu na chování horniny – například zvýšené teploty. Pak jde tedy o tzv. termomechanickou studii, kdy je předmětem výzkumu vztah mezi zkoumanými parametry a teplotou.

V rámci této práce byla provedena experimentální termomechanická studie místní droby spodnokarbonského stáří z lomu Kobeřice. Jedná se o horninu typickou svou vysokou pevností, hojně využívanou ve stavebnictví. Laboratorní zkoušky byly rozděleny na dvě sady pro teplotní rozsahy 20–400 °C a 20–1200 °C. Následně byla provedena analýza trendů sledovaných parametrů v závislosti na použité teplotě.

Tato práce byla vypracována v rámci specifického výzkumu FAST-S-23-8272 (Vliv teploty na mechanické vlastnosti hornin) a plánu rozvoje vědní disciplíny mechanika hornin na VUT v Brně [1].

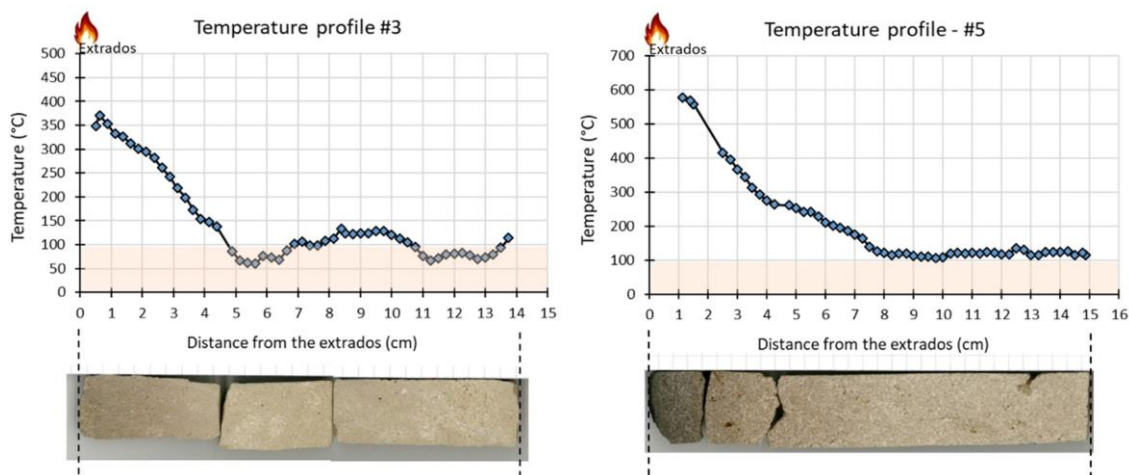
## 2 TERMOMECHANIKA HORNIN

Kámen je jeden z nejstarších stavebních materiálů, který lidstvo využívá. Oproti dřevu a podobným materiálům lépe odolává případným vnějším vlivům, o čemž svědčí celá škála dochovaných památek po celém světě. Díky výborné pevnosti v tlaku a při dodržení historicky ověřených stavebních postupů je možné z kamene vybudovat širokou škálu děl, od mostů a opěrných stěn až po rozsáhlé monumenty.

V současné době již není přímé použití kamenných kvádrů ve stavbách tak časté, přesto jsou horniny jejich běžnou součástí – v podobě kameniva tvoří kostru veškerých betonových nosných konstrukcí. V rámci geotechniky je na horniny spíše nahlíženo jako na prostředí, v němž je navržený objekt založen. U tunelů může okolní masiv společně s ostěním působit jako součást nosné konstrukce, například při ražbě tzv. Novou rakouskou tunelovací metodou [2]. Všechny tyto aplikace vyžadují kvalitní posouzení horninového materiálu a ověření jeho bezpečného působení po celou dobu životnosti konstrukce. Materiálové vlastnosti se ale mohou v průběhu životnosti měnit, například působením zvýšené teploty. Tento nežádoucí efekt je u materiálů na bázi kamene často diskutován [3].

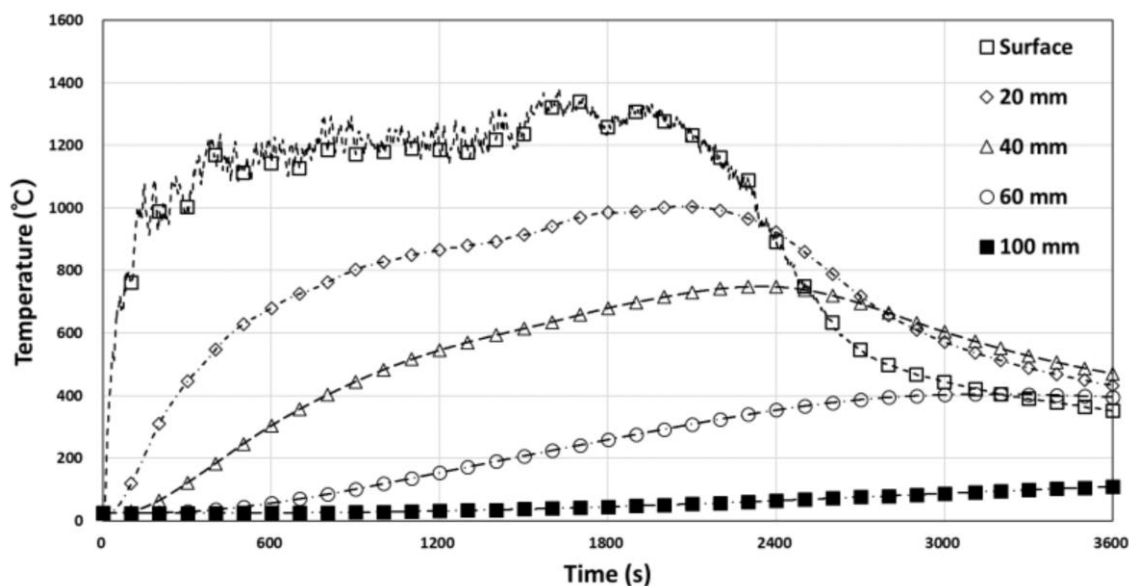
### 2.1 Typické případy působení zvýšené teploty na horniny

K působení vysokých teplot (řádově vyšší stovky stupňů) na horninový materiál může docházet v různých situacích. Mezi typické případy se řadí požáry kamenných budov, což ilustruje například požár katedrály Notre-Dame, k němuž došlo v roce 2019. Studie [4] realizovaná na klenbě střední lodi identifikovala významné negativní faktory spojené s degradací použitého materiálu i se změnami v působení samotné konstrukce. Pro posouzení byl sestaven matematický model kalibrovaný pomocí laboratorních zkoušek realizovaných na materiálu odebraném jak přímo z klenby, tak z vhodných lomů. Neovlivněné vzorky vápence byly nejprve zahřáty na příslušné teploty až do 800 °C, následně byla provedena kolorimetrická analýza vztahující barvu zahřátého vzorku k původnímu stavu horniny. Takto bylo možné stanovit maximální dosaženou teplotu (až 600 °C) a teplotní průběh uvnitř průřezu konstrukce na vrtných jádrech odebraných z klenby (viz Obr. 2-1). V případě laboratorního studia zahřátých vzorků metodami mechaniky hornin je pak možné zjistit mechanické vlastnosti jednotlivých částí konstrukce a navrhnout statická opatření v rámci rekonstrukce katedrály.



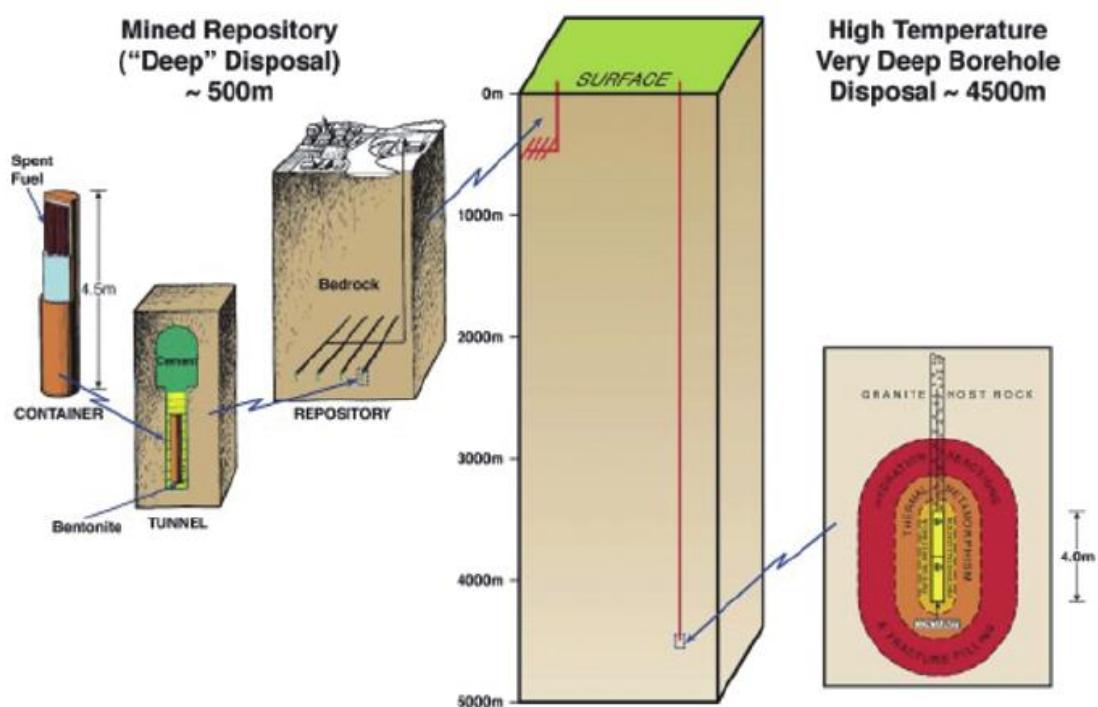
Obr. 2-1: Teplotní profily stanovené na vrtných jádrech odebraných z klenby katedrály Notre-Dame po požáru v roce 2019, převzato z [4]

Obdobný případ může rovněž nastat při požáru uvnitř tunelu. Při laboratorní simulaci požáru [5] se ukázalo, že povrch ostění může při rozsáhlejšímu požáru dosáhnout teploty až 1380 °C, v hloubce 100 mm pak teplota dosahuje jen asi 100 °C. (viz Obr. 2-2). Při dostatečné tloušťce ostění tedy prakticky nedojde k ovlivnění okolního horninového masivu. Existují také případy tunelů [6], u kterých je horninový masiv dostatečně kvalitní a tudíž není nutné navrhovat příliš masivní ostění. To ale naopak může způsobit vyšší nárůst teplot v samotném horninovém masivu v případě požáru a tedy i možné lokální oslabení jeho únosnosti.



Obr. 2-2: Průběh teplot v ostění tunelu v závislosti na hloubce, převzato z [5]

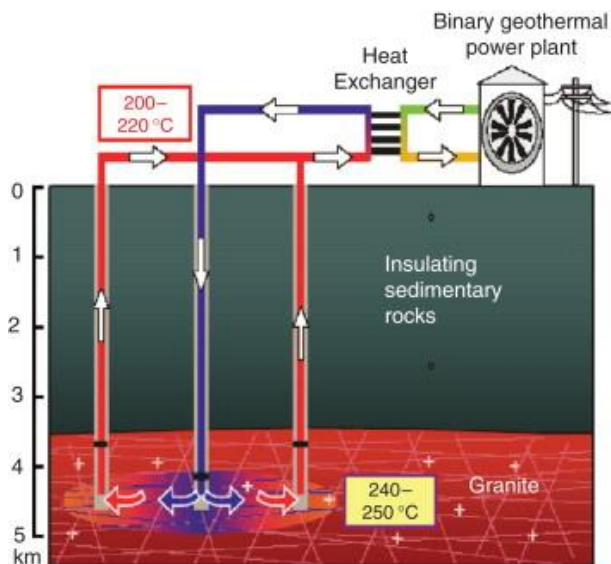
Také působení nižších teplot (řádově nižší stovky stupňů) je nutné brát v potaz, například v kontextu hlubinných úložišť radioaktivního odpadu (*deep geological repository*). Vzhledem k postupnému rozpadu uloženého materiálu a jeho zbytkové aktivitě může docházet k nárůstu teplot uvnitř úložných kontejnerů (orientačně se mohou pohybovat mezi 100 až 300 °C) [7]. Tyto teploty mohou být i výrazně vyšší při méně běžných konceptech úložišť – tzv. *very deep borehole disposal* [8]. Zde se uvažuje o uložení vysoce aktivního odpadu do vrtu o hloubce několika kilometrů (viz Obr. 2-3), přičemž by docházelo k přímému ohřívání a částečnému tavení horninového masivu.



Obr. 2-3: Srovnání konvenčního úložiště a tzv. hlubokého vrtu, převzato z [9]

Posledním uvedeným případem jsou tzv. vylepšené geotermální systémy (*enhanced geothermal systems, EGS*) [10]. Jedná se o typ geotermálního systému sahající do hloubky mezi 3000 a 5000 m, což většinou odpovídá maximální teplotě ve vrtu mezi 100 a 300 °C (viz Obr. 2-4). Koncept byl patentován v roce 1974 Národní laboratoří Los Alamos [11]. Funguje na principu navrtání tzv. suchého, horkého masivu několika hlubinnými vrty. Následně je do bloku vháněna pod tlakem voda, která způsobí rozpuštění horniny a tedy propojení vrtů. Za provozu je pak voda cirkulována pomocí injekčního a produkčního vrtu skrze vytvořený puklinový systém. V České republice byl v letech 2006 až 2007 realizován první průzkumný hlubinný vrt o hloubce 2110 m, poblíž obce Litoměřice [12]. Cílem bylo zhodnotit potenciál geotermální struktury v okolí oherského

riftu pro případné budoucí využití. Na dně průzkumného vrtu byla zjištěna teplota 63,5 °C, již dříve predikovaná výpočtem. V předpokládané budoucí hloubce vrtu by pak teplota měla dosahovat až 200 °C (dle extrapolace naměřených dat).



Obr. 2-4: Koncept vylepšeného geotermálního systému, převzato z [13]

## 2.2 Laboratorní termomechanické studium hornin

Termomechanika je podoborem mechaniky studujícím kombinované vlivy teploty a externího zatížení na hmotu [14]. Provedení samotných laboratorních zkoušek na horninových tělesech v průběhu zahřívání je ale náročné, což vede často k nutnosti zavést jistá zjednodušení. V praxi bývá tento problém řešen testováním vypálených těles až po ochlazení na teplotu odpovídající laboratorním teplotám (20–25 °C). Toto zjednodušení umožňuje použití běžných metod mechaniky horniny bez nutnosti úpravy postupů.

### 2.2.1 Teplotní rozsah a zahřívání zkušebních těles

Zmíněné případy působení zvýšených teplot na horniny poukazují na nutnost přizpůsobit teplotní rozsah termomechanické studie předpokládané aplikaci získaných poznatků. Zvolený teplotní rozsah je pak nutné ve vhodně zvolených intervalech pokrýt jednotlivými sadami těles, u vysokoteplotních rozsahů po 100 až 200 °C, u nízkoteplotních rozsahů do 200 °C je doporučován interval 20 °C [15]. Připravené sady jsou definovány způsobem a rychlostí zahřátí na různé cílové teploty (často až do 1000 °C) a většinou samovolně ochlazeny (např. [3], [16] nebo [17]). V případě simulace tepelného šoku způsobeného rychlým ochlazením při hašení požáru jsou tělesa po vypálení ihned umístěna do nádoby s vodou (např. [18], [19] nebo [20]).

### 2.2.2 Stručný přehled speciálních laboratorních metod

Kromě standartních zkoušek laboratoře mechaniky hornin (např. stanovení objemové hmotnosti, prosté tlakové a nepřímé tahové pevnosti nebo modulu pružnosti) bývají také aplikovány specializované metody pro studium změn struktury zkoumaného horninového materiálu. Vzhledem k častému vzniku puklin při vyšších teplotách výpalu je jejich vývoj často monitorován (v průběhu destruktivních zkoušek pomocí monitoringu akustických emisí [21], na samostatných vzorcích pomocí výpočetní tomografie [21]; vyhodnocením snímků pořízených skenovacím elektronovým mikroskopem [18] nebo ze snímků horninových výbrusů [22]). Vznik puklin společně s případnými objemovými změnami také přispívá ke zvýšení pórovitosti (stanovitelná např. pomocí rtuťové porozimetrie [23]) a nasákavosti. Chování horniny v průběhu zahřívání je také značně ovlivněno teplotní roztažností horninové hmoty, kterou je možné zkoumat dilatometricky, realizací tzv. termomechanické analýzy [24].

### 2.2.3 Významné změny horninového materiálu vlivem teploty

Horniny v průběhu zahřívání prochází různými změnami ve složení a struktuře, některé významné změny potenciálně související s drobnými jsou popsány níže. Transformace spojované s objemovými změnami jsou označeny  $\Delta V$ :

**25–100 °C:** Uzavírání již existujících puklin [15], [25]

**50–110 °C:** Vypařování slabě vázané/obalové vody (*absorbed water*) [15]

**110–300 °C:** Uvolňování pevně vázané vody (*bonded water*) [15], [26], [27]

**250+ °C:** Uvolňování vody vázané v krystalické struktuře (*crystal water*) [15], [28]

**300–600 °C:** Separace podél okrajů minerálních zrn [15], [25]

**410–750 °C:** Vznik mikrotrhlin uvnitř minerálních zrn [15]

**475–800 °C:** Dehydroxylace slíd, illitu a chloritu [23]

**573 °C:** Reversibilní  $\alpha$ - $\beta$  přeměna křemene ( $\Delta V$ ) [4], [29]

**790–908 °C:** Rozpad krystalické mřížky illitu a montmorillonitu [28]

**800–1000 °C:** Vznik puklin a pórů do 1  $\mu\text{m}$  v jílech s obsahem uhličitánů [30]

**850–900 °C:** Rozpad krystalické mřížky muskovitu [28]

**873 °C:** Přeměna  $\beta$ -křemene na tridymit ( $\Delta V$ ) [29]

**960 °C:** Rozpad krystalické mřížky kaolinitu [28]

**1100 °C:** Částečné nebo celkové tavení jílových minerálů, uvolňování plynů [30]



### 3 POZNATKY K POUŽITÝM ZKUŠEBNÍM METODÁM

Většina zkušebních metod použitých v diplomové práci spadá pod mechaniku hornin. Tato vědní disciplína je součástí geomechaniky a zabývá se studiem vlastností jak horninové hmoty, tak celého masivu [31]. Jelikož výsledky získané laboratorními zkouškami mohou být ovlivněny celou řadou parametrů, od rozměrů zkušebních těles [32] až po rychlost zatěžování [33], jsou tyto zkoušky normovány. V České republice je vydávána sada českých technických norem (dále ČSN), v zahraničí pak bývají využívány metodiky vydávané Mezinárodní společností pro mechaniku hornin (*International Society for Rock Mechanics*, dále *ISRM*) nebo Americkou asociací pro testování a materiály (*American Society for Testing and Materials*, dále *ASTM*). Tyto metody byly doplněny o petrografické studium horninových výbrusů a kolorimetrickou analýzu.

#### 3.1 Stanovení parametrů těles a objemové hmotnosti

V laboratoři mechaniky hornin jsou používána nejčastěji pravidelná, zcela opracovaná zkušební tělesa s přesně definovanými požadavky na jejich rozměry a tvar. Praktičtější na výrobu jsou válcová tělesa, obzvláště v případě odběru materiálu ve formě vrtných jader, která stačí jen nařezat na potřebnou délku. Dále mohou být použita tělesa kvádřová a krychelná, získaná nařezáním balvanitých vzorků hornin. Minimální rozměr těles je běžně dán desetinásobkem největšího zrna horniny [31].

Válcová zkušební tělesa jsou definována průměrem tělesa  $D$  a délkou tělesa  $L$ . Vydělením obou rozměrů získáme štíhlostní poměr  $L/D$ , který je významným vstupním parametrem určujícím vhodnost tělesa pro danou laboratorní zkoušku. Rozměry těles lze stanovit jejich opakovaným proměřením pomocí posuvného měřidla a následným zprůměrováním získaných hodnot pro vyloučení negativních vlivů nedokonalostí těles.

Po stanovení rozměrů a hmotnosti zkušebního tělesa je pak možné získat také jeho objemovou hmotnost ( $\rho$ , *bulk density*). Jedná se o základní fyzikální vlastnost horninového materiálu, která je definovaná podílem hmotnosti všech součástí horniny (tuhé, plynné i kapalná fáze) a odpovídajícího objemu (Rov. 3-1).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Rov. 3-1: Definice objemové hmotnosti [31]

$\rho$	objemová hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m$	hmotnost tělesa	[g]
$V$	objem tělesa	[mm <sup>3</sup> ]

## 3.2 Zkouška pevnosti v prostém tlaku

Zkouška pevnosti v prostém tlaku (Obr. 3-1) je základní zkouškou realizovanou v laboratoři mechaniky hornin. Dle zavedených metodik se tato zkouška realizuje na válcových tělesech o minimálním průměru  $D$  přibližně 50 mm a štíhlostním poměru  $L/D$  v povoleném rozmezí 2,0–3,0 (dle ČSN [34] a *ISRM* [35]; 2,0–2,5 dle *ASTM* [36]). Zatěžování probíhá rychlostí 0,5–1,0 MPa/s. V případě osazení zkušebního tělesa měřiči deformací (např. odporovými tenzometry) je pak získán i pracovní diagram, stanoven typ porušení a odpovídající deformační (přetvárné) charakteristiky testované horniny [37].

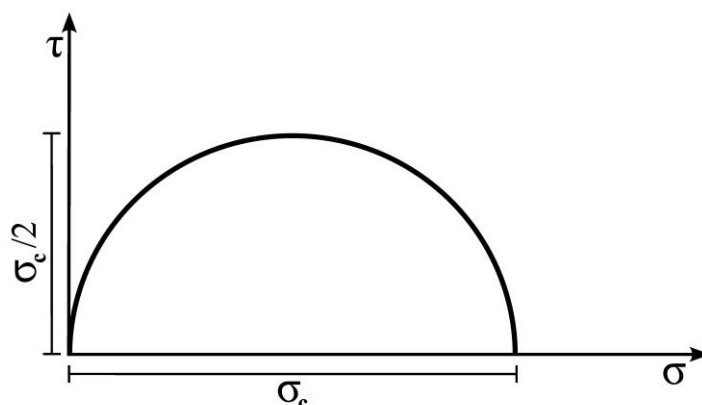
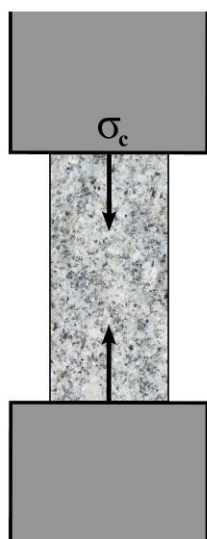
### 3.2.1 Prostá tlaková pevnost

Prostá tlaková pevnost ( $\sigma_c$ , *uniaxial compressive strength, UCS*) je základní pevnostní charakteristikou horninové hmoty [37] a udává maximální napětí, které hornina dokáže přenést při jednoosém zatížení (Rov. 3-2). Slouží také ke stanovení pevnostní třídy horniny využívané při různých inženýrských aplikacích (např. dle [38], viz Tab. 3-1)

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Rov. 3-2: Definice prosté tlakové pevnosti [31]

$\sigma_c$	prostá tlaková pevnost	[MPa]
$F$	síla při porušení	[kN]
$A$	počáteční průřezová plocha	[mm <sup>2</sup> ]



Obr. 3-1: Princip prosté tlakové zkoušky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro prostou tlakovou pevnost v prostoru  $\sigma$ - $\tau$  dle [31] (vpravo),  $\sigma_c$  – stanovená pevnost

Tab. 3-1: Výtah pevnostních tříd hornin z ČSN 73 6133 [38]

Třída	Pevnost [MPa]	Pevnost slovně
R1	> 150	Velmi vysoká
R2	50 - 150	Vysoká
R3	15 - 50	Střední
R4	5 - 15	Nízká
R5	1,5 - 5	Velmi nízká
R6	0,5 - 1,5	Extrémně nízká

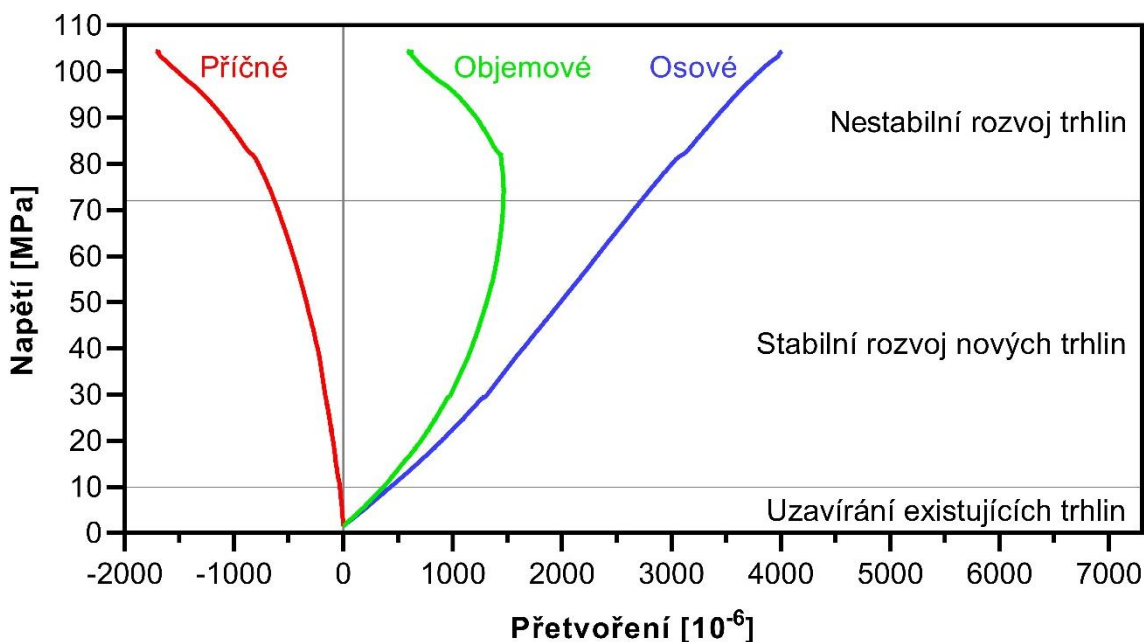
### 3.2.2 Deformace u hornin

Horniny jakožto typický přírodní materiál nejsou dokonale pružné [31]. Celková deformace vznikající při zatěžování má pružnou (vratnou) a plastickou (nevratnou) složku. Obvykle se deformace převádějí do bezrozměrné podoby (poměrné přetvoření, Rov. 3-3). Vzhledem k nízkým hodnotám deformací při použití jednotky m/m bývají spíše používány násobky jednotek (běžně užívaný tzv. „microstrain“,  $\mu\text{m}/\text{m} \rightarrow 10^{-6}$ ).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Rov. 3-3: Definice poměrného přetvoření [31]

$\varepsilon$	poměrné přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$\Delta l$	deformace	[ $\mu\text{m}$ ]
$l$	měrná základna	[m]



Obr. 3-2: Záznam měření deformací zkušebního tělesa z granitu typu Čerřínek při prosté tlakové zkoušce, fáze dle [39], naměřeno v rámci autorovy bakalářské práce [40]

Z hlediska inženýrských aplikací rozeznáváme tyto typy deformací hornin: osově, příčné a objemové (Obr. 3-2). Pro stanovení osových deformací je (dle *ISRM* [35] a *ASTM* [36]) nutné zkušební těleso osadit minimálně dvěma podélnými snímači, umístěnými na opačných stranách, uprostřed délky tělesa. Doplněním alespoň jednoho příčného měřiče lze stanovit také příčné deformace a následně dopočítat objemové deformace (Rov. 3-4). Vynesením závislosti napětí na deformacích získáme pracovní diagram, který pak slouží také k popisu chování horniny při zatěžování (plastické *versus* křehké porušení [41]) nebo k určení deformačních charakteristik (např. modul pružnosti a Poissonovo číslo).

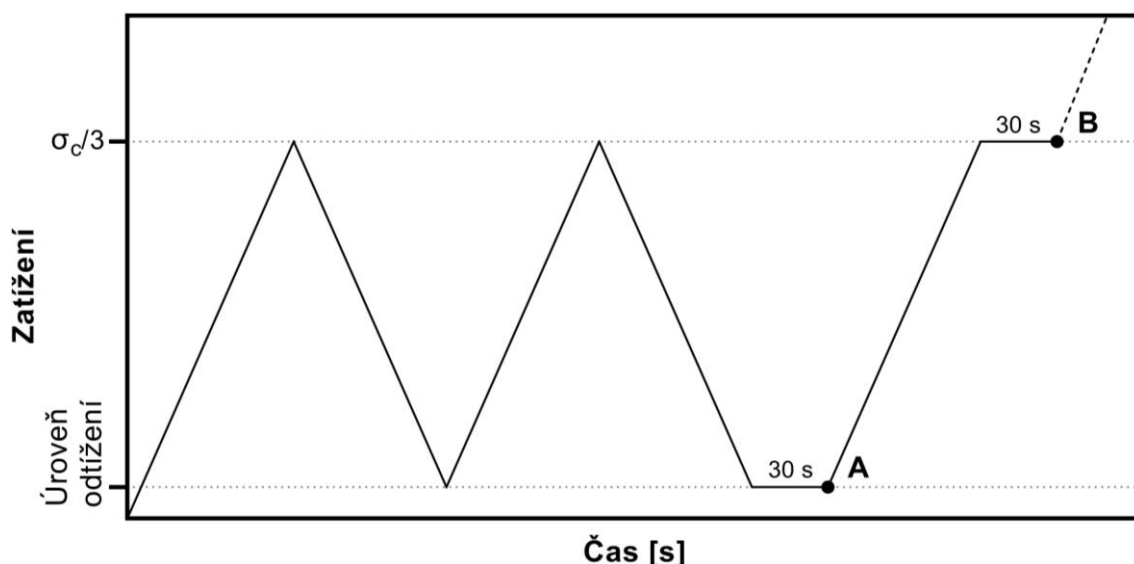
$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$$

Rov. 3-4: Definice objemového přetvoření [35]

$\varepsilon_v$	objemové přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$\varepsilon_a$	osové přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$\varepsilon_r$	příčné přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

### 3.2.3 Statický modul pružnosti

Modul pružnosti ( $E$ , *modulus of elasticity*) je základní deformační charakteristikou. Udává poměr mezi tlakovým napětím a odpovídajícím pružným přetvořením horniny ([42], Rov. 3-5). V praxi se stanovuje z odlehčovací smyčky pracovního diagramu (pro odstranění plastických deformací) na daném oboru napětí s horní hranicí rovnou maximálně 1/3 odhadované prosté tlakové pevnosti vzorku (dle ČSN [43], viz Obr. 3-3). Metodiky *ISRM* [35] a *ASTM* [36] se zabývají spíše stanovením modulů deformace.



Obr. 3-3: Postup zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení statického modulu pružnosti dle ČSN EN 14580 [43], deformace pro výpočet modulu (případně Poissonova čísla) jsou odečteny v bodech A a B

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a}$$

Rov. 3-5: Definice modulu pružnosti [43]

E	modul pružnosti	[GPa]
$\Delta\sigma$	obor zatížení	[MPa]
$\Delta\varepsilon_a$	změna osových přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

### 3.2.4 Poissonovo číslo

Poissonovo číslo ( $\nu$ , *Poisson's ratio*) udává poměr mezi příčným a osovým přetvořením ([42], Rov. 3-6). Normy ČSN [34] přímo neuvádějí postup stanovení Poissonova čísla, ale odkazují se na metodiku *ISRM* [35]. Ta spolu s metodikou *ASTM* [36] doporučuje stanovit Poissonovo číslo společně s odpovídajícím modulem pružnosti nebo deformace.

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta\varepsilon_a}$$

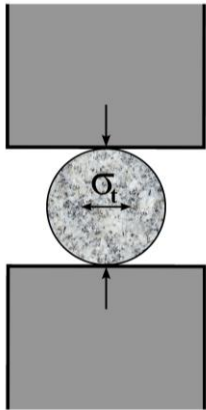
Rov. 3-6: Definice Poissonova čísla [36]

$\nu$	Poissonovo číslo	[-]
$\Delta\varepsilon_a$	změna osových přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$\Delta\varepsilon_r$	změna příčných přetvoření	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

## 3.3 Zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilská zkouška)

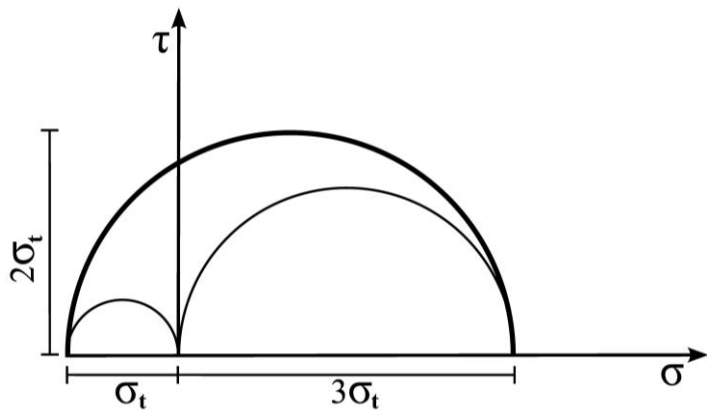
Stanovení tahové pevnosti hornin je nedílnou součástí činnosti laboratoře mechaniky hornin. Základní variantou je zkouška pevnosti v prostém tahu, realizace takové zkoušky ale bývá náchylnější na nedokonalosti (např. mimostředné namáhání nebo kvalita lepeného spoje) [31]. Jisté zjednodušení nabízí různé modifikované metody testování založené na specifické geometrii horninových vzorků (např. modifikovaná tahová zkouška nebo testování tzv. „dog-bone“ vzorků, shrnuto v [44]). V praxi se významně uchytila také nepřímá zkušební metoda – zkouška pevnosti v příčném tahu neboli Brazilská zkouška. Oproti další uvedeným zkouškám je nenáročná na vybavení, tvar zkušebních těles a množství požadovaného materiálu. Válcové těleso o průměru 54 mm a nízkém štíhlostním poměru ( $L/D = 0,5$  dle *ISRM* [45], *ASTM* [46] připouští variabilitu  $L/D$  mezi 0,2 a 0,75) je umístěno do lisu dle Obr. 3-4 a zatěžováno doporučenou rychlostí (200 N/s dle *ISRM* [45], 0,05–0,35 MPa/s dle *ASTM* [46]). Kromě běžných čelistí lisu (viz Obr. 3-4) je možné také použít různé specializované čelisti přímo určené pro tuto zkoušku (viz např. [47]). Těleso je namáháno kombinací smyku a tlaku (tlaková složka odpovídá trojnásobku tahové složky [48], viz Obr. 3-4), porušení pak doprovází svislá trhlinka značící překročení tahové pevnosti v příčném směru. Takto stanovená tahová pevnost horniny je pak vypočítána dle Rov. 3-7.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DL}$$



Rov. 3-7: Definice příčné tahové pevnosti [46]

$\sigma_t$	příčná tahová pevnost	[MPa]
F	síla při porušení	[kN]
D	průměr válcového tělesa	[mm]
L	délka válcového tělesa	[mm]



Obr. 3-4: Princip Brazílské nepřímé tahové zkoušky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro Brazílskou nepřímou tahovou pevnost v prostoru  $\sigma$ - $\tau$  dle [48] (vpravo),  $\sigma_t$  – stanovená pevnost

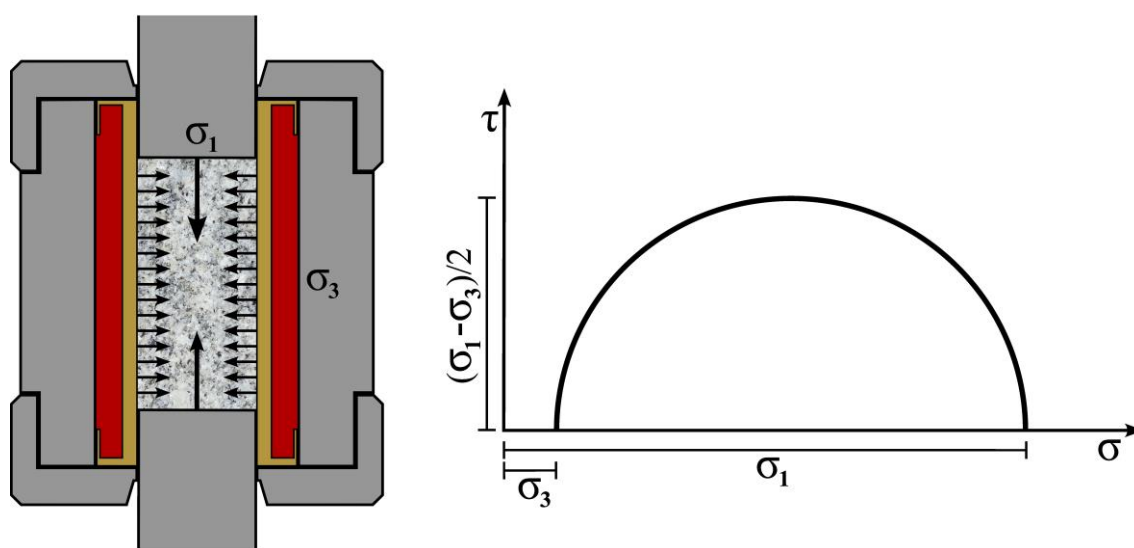
### 3.4 Triaxiální tlaková zkouška

Podstata této zkoušky spočívá v simulaci trojosé (triaxiální) napjatosti horniny uvnitř horninového masivu. Kromě osového zatížení (jako u prosté tlakové pevnosti) je na těleso vyvozován také komorový/boční tlak, což vede k využití zpevnění horniny a k výraznějšímu rozvoji plastických deformací [31]. Dle principu zkoušky rozlišujeme „pravý“ triaxiál se dvěma různými komorovými tlaky nanášenými na krychelné těleso a „nepravý“ triaxiál realizovaný na válcích se stejným komorovým tlakem působícím na celý plášť tělesa [31]. Vzhledem k nižší náročnosti na provedení bývají v praxi využívány spíše „nepravé“ triaxiální přístroje, jejichž výsledky jsou pro inženýrské aplikace vyhovující. Tyto přístroje se pak dále dělí na dva základní typy [37].

Prvním jsou tzv. „*in-vessel*“ přístroje umožňující určitou variabilitu rozměrů vzorků a také jednoduché osazení měřičů deformací. Použití těchto přístrojů předpokládají všechny zmíněné metodiky (ASTM [36], ISRM [49], ČSN [34] přebírá postup dle ISRM), doporučení ohledně zatěžování a parametrů těles jsou obdobné, jako u zkoušky v prostém tlaku.

Druhým typem jsou tzv. Hoekovy buňky ([50], viz Obr. 3-5), které jsou oproti prvnímu typu přístroje menší a jednodušší na manipulaci. Z jejich konstrukce ale plyne požadavek na přesné rozměry tělesa. Průměr tělesa musí odpovídat průměru membrány oddělující vzorek od hydraulického oleje vyvolávající komorový tlak, štíhlostní poměr  $L/D$  pak bývá roven 2,0 [50]. Hoekova buňka také umožňuje osazení tělesa měřiči deformací (vzhledem k omezenému prostoru v komoře jen odporovými tenzometry).

Samotné výsledky triaxiální tlakové pevnosti ( $\sigma_1$ ) nemají velký význam v praxi [37], využívány jsou hlavně k sestavení tzv. podmínek (kritérií) porušení. Podmínky porušení definují závislost smykové pevnosti horniny na normálovém napětí.



Obr. 3-5: Princip Hoekovy buňky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro triaxiální tlakovou pevnost v prostoru  $\sigma$ - $\tau$  dle [31] (vpravo),  $\sigma_1$  – osově napětí vyvolané lisem,  $\sigma_3$  – komorové napětí vyvolané hydraulickým olejem (červená)

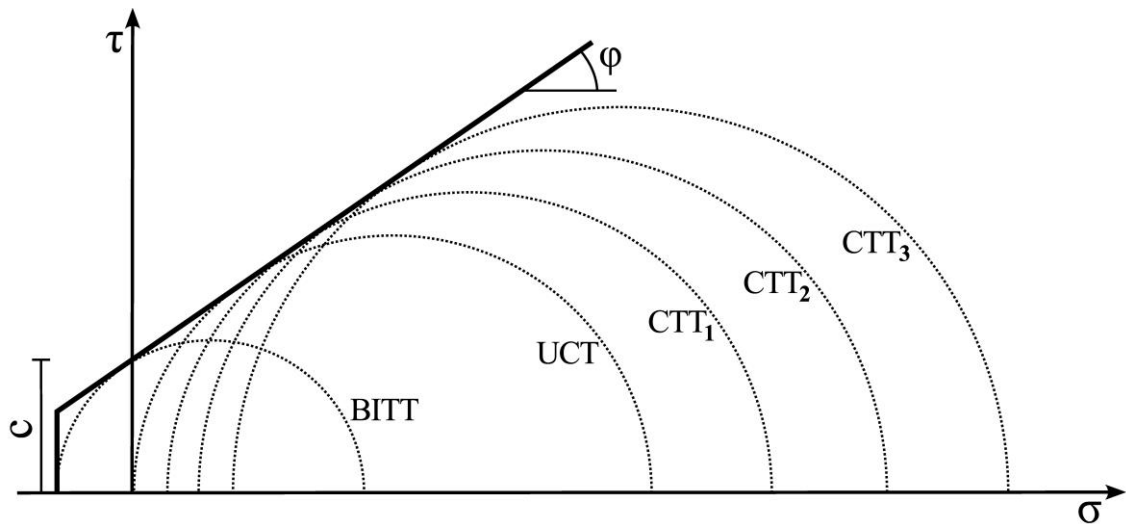
### 3.4.1 Mohr-Coulombova podmínka porušení

Mohr-Coulombova (M-C) podmínka porušení patří mezi základní kritéria porušení používaná v mechanice hornin, původně však sloužila spíše pro popis zemin [37]. Je definována dvěma parametry – kohezí ( $c$ , *cohesion*) a úhlem vnitřního tření ( $\varphi$ , *internal friction angle*), viz Rov. 3-8. Běžně bývá ještě doplněna o tzv. „*tension cut-off*“ neboli omezení tahové pevnosti (viz Obr. 3-6). Výhodou i nevýhodou M-C podmínky porušení je její lineární charakter, nepřiliš náročný na laboratorní testování, ale značně zjednodušující reálné chování horniny [31]. Komplexnější a přesnější popis pak poskytuje nelineární Hoek-Brownova (H-B) podmínka porušení, odvozená z rozsáhlé škály triaxiálních zkoušek ([32] a [51]).

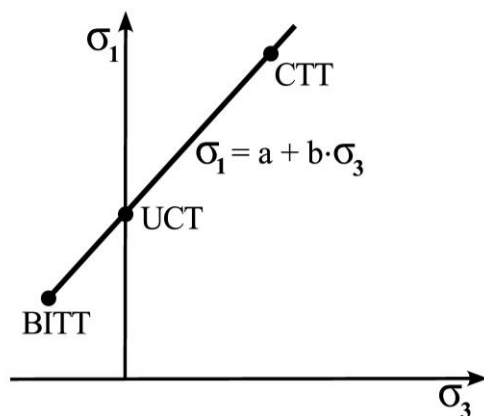
$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Rov. 3-8: Definice (M-C) podmínky porušení v  $\sigma$ - $\tau$  [37]

$\tau$	smykové napětí	[MPa]
$c$	koheze (soudržnost)	[MPa]
$\sigma$	normálové napětí	[MPa]
$\varphi$	úhel vnitřního tření	[°]



Obr. 3-6: Běžná konfigurace laboratorních zkoušek pro stanovení Mohr-Coulombovy podmínky porušení s omezenou tahovou pevností v prostoru  $\sigma$ - $\tau$ , BITT – zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilian indirect tensile test), UCT – zkouška pevnosti v prostém tlaku (uniaxial compressive test), CTT – „nepravá“ triaxiální zkouška (conventional triaxial test),  $c$  – koheze,  $\varphi$  – úhel vnitřního tření



BITT	$\sigma_1 = 3 \times$ tahová pevnost $\sigma_3 =$ tahová pevnost, záporné
UCT	$\sigma_1 =$ tlaková pevnost $\sigma_3 = 0$
CTT	$\sigma_1 =$ osové napětí $\sigma_3 =$ komorové napětí

Obr. 3-7: Zobrazení M-C podmínky porušení v prostoru  $\sigma_3$ - $\sigma_1$  doplněné o přepočty výsledků laboratorních zkoušek, odvozené z Mohrových kružnic, BITT – zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilian indirect tensile test), UCT – zkouška pevnosti v prostém tlaku (uniaxial compressive test), CTT – „nepravá“ triaxiální zkouška (conventional triaxial test)



$$c = \frac{a}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}$$

Rov. 3-9: Výpočet koheze na základě lineární regrese dle Obr. 3-7, odvozeno z rovnice převzaté z [52]

c	koheze (soudržnost)	[MPa]
a	parametr lineární regrese	[-]
$\varphi$	úhel vnitřního tření	[°]

$$\varphi = 2 \cdot \left( \operatorname{tg}^{-1}(\sqrt{b}) - \frac{\pi}{4} \right)$$

Rov. 3-10: Výpočet úhlu vnitřního tření na základě lineární regrese dle Obr. 3-7, odvozeno z rovnice převzaté z [52]

$\varphi$	úhel vnitřního tření	[°]
b	parametr lineární regrese	[-]

### 3.5 Stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti

Schmidova odrazová tvrdost (*Schmidt rebound hardness, SRH*) patří mezi základní indexové charakteristiky, používané pro odhad vlastností hornin či betonu. Stanovuje se použitím skleroskopu (v tomto případě Schmidova kladívka) poháněného pružinou, který udeří definovaným způsobem do testovaného materiálu. Materiál část energie úderu pohltí, zbylá energie se pak přenese zpět do úderníku a způsobí jeho odraz. Samotná tvrdost je pak definována jako poměr rychlostí úderníku před a po úderu [53]. Zkouška je obecně považována za nedestruktivní, ukazuje se ale, že úder Schmidova kladívka může značně ovlivnit testovaný povrch a způsobit v něm vznik systému mikrotrhlin [54]. V mechanice hornin jsou běžně používána Schmidova kladívka typu N (energie úderu 2,207 J) a typu L (energie úderu 0,735 J) [53]. Typ N je vhodný na testování v terénu (vyšší energie úderu vede k nižší citlivosti na nerovnost povrchu), typ L pak bývá využíván v laboratoři (díky nižší energii úderu příliš nepoškodí vzorky) [55].

Metodiky dle *ISRM* [55] a *ASTM* [56] se shodují na minimálním průměru válcového horninového tělesa NX (54,7 mm). To je pak usazeno do žlábků s odpovídající křivostí v masivní ocelové podložce s minimální hmotností 20 kg (pro kladívko typu L). Testovaným povrchem je tedy plášť válce, jednotlivá měření by měla být od sebe vzdálená minimálně na šířku úderníku. V některých případech je ale praktičtější měření realizovat na podstavě tělesa, které je druhou podstavou pevně usazeno na masivní ocelové podložce. Takto získané hodnoty odrazové tvrdosti pak mohou být převedeny např. na prostou tlakovou pevnost nebo modul pružnosti s využitím zavedených korelačních vztahů (např. vztahy uvedené *ISRM* [55], [57] nebo [58]).

### 3.6 Petrografické studium horninových výbrusů

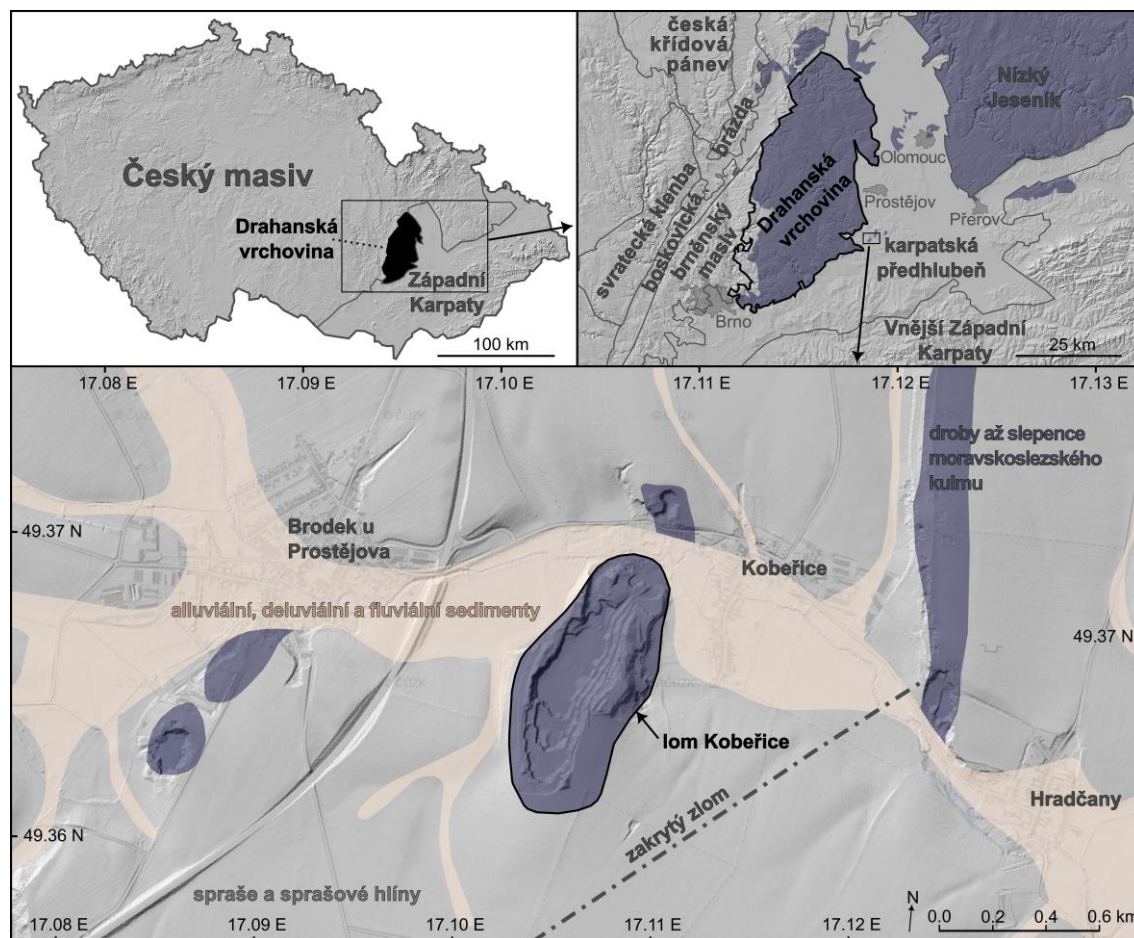
Horninový výbrus je vzorek horniny uchycený na podkladním sklíčku a vybroušený do dostatečně tenké vrstvy, při které je většina minerálů průsvitná (obvykle se jedná o tloušťku 30 až 40  $\mu\text{m}$ , v případě potřeby i vyšší) [59].

Ke studiu horninových výbrusů pak slouží polarizační/petrografický mikroskop, většinou vybavený zdrojem tzv. procházejícího světla. Oproti běžnému mikroskopu je vybaven otočným stolem a dvěma polarizačními filtry – polarizátorem (pod stolem) a analyzátorem (nad stolem, odstranitelný). Oba filtry polarizují světlo lineárně, ve směrech navzájem kolmých na sebe. Při použití polarizátoru vzorek pozorujeme v režimu PPL (*plane-polarized light*, lineárně polarizované světlo), vidíme tedy lineárně polarizované světlo ovlivněné horninovým materiálem. Přidáním analyzátoru je horninou ovlivněné světlo dále lineárně polarizováno, ale ve směru kolmém na první filtr. Pak pozorujeme v režimu XPL (*cross-polarized light*) [60].

## 4 GEOLOGICKÝ KONTEXT STUDOVANÉ DROBY

### 4.1 Dražanská vrchovina

Dražanská vrchovina (*Dražany Upland*) se nachází na jihovýchodním okraji rhenohercynské zóny, na hranici Českého masivu a Západních Karpat. Tvoří ji spodnokarbonská (kulmská) souvrství (protivanovské, rozstáňské a myslejovické [61]), obsahující hlubokomořské sedimenty. Jedná se převážně o droby, v menší míře břidlice nebo slepence [62]. Tato souvrství vznikala postupnou sedimentací v průběhu visé, na dně tehdejšího oceánu [63]. V období namuru pak byly tyto sedimenty působením tektonických procesů variského vrásnění (orogeneze) zdeformovány do několik kilometrů mocného komplexu, tvořícího rozsáhlé pohoří. V pozdějších obdobích toto pohoří postupně silně zerodovalo (až o několik kilometrů), dalším působením tektoniky pak byly jeho zbytky znovu vyzdviženy a v současnosti tvoří Dražanskou vrchovinu [63].



Obr. 4-1: Geologické schéma Dražanské vrchoviny a lomu Koberžice, podklady pro vytvoření mapy převzaty z databáze České geologické služby [64]

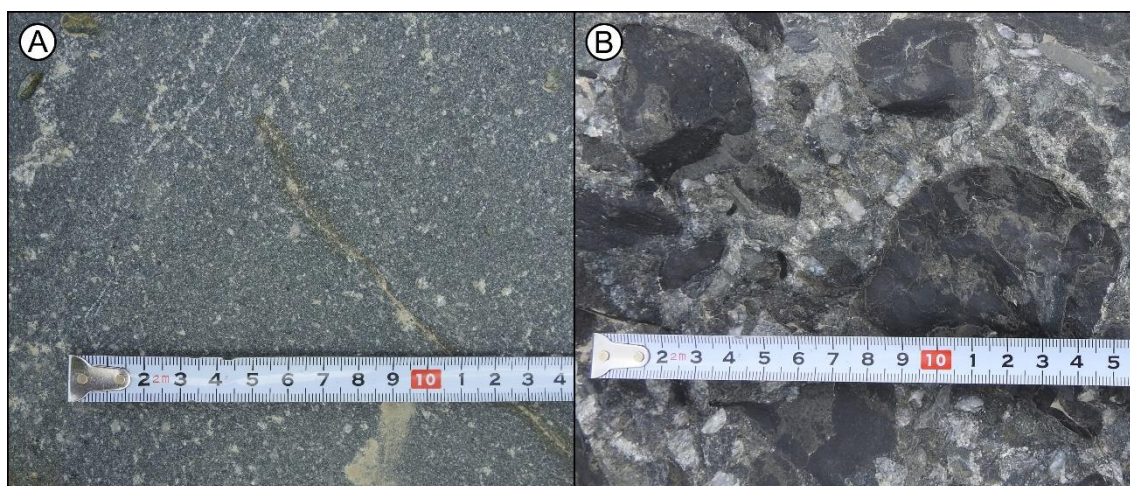
## 4.2 Lom Koberřice

Zkoumané droby pochází z lomu Koberřice (49°22'02,9"N 17°06'19,2"E; 223 m n. m.; Obr. 4-2), který se nachází pŕibližně 12 km jižně od Prostějova, poblíž stejnojmenné obce. Jedná se o menší horninový blok, spadající do myselejovického souvrství, který vystupuje na povrch východně od hlavního bloku Dražanské vrchoviny, skrze sedimenty karpatské pŕedhlubně (viz Obr. 4-1). Horninová hmota je zde značně zvrásněná (viz Obr. 4-2c) a silně porušená, s četnými diskontinuitami zpŕůsobujícími až blokovou odlučnost (viz Obr. 4-2b). Vlivem zvýšených teplot a tlaků, zpŕůsobených vysokou mocností nadloží v období namuru, došlo k částečné anchimetamorfóze těchto hornin [65]. Díky tomu dosahují místní droby relativně vysokých pevností, což vede k jejich těžbě a hojnému využití ve stavebnictví, nejčastěji v podobě kameniva do betonu [66].



Obr. 4-2: Lom Koberřice: A – pohled na jihozápadní stěnu, B – pohled na jižní stěnu, ukazující blokovou odlučnost horniny, C – pohled na západní stěnu, kde je znatelné zvrásnění místního masivu

Zdejší droby jsou převážně šedě zbarvené. Textura je většinou homogenní, vrstevnatost je nezřetelná. Skládají se ze dvou složek – základní hmoty a tmelu (přibližně 15 % objemu horniny [66]). Základní hmotu tvoří převážně písčité zrna, o průměru 0,1 až 1,0 mm (viz Obr. 4-3a), s občasným výskytem shluků nebo jednotlivých vrstev tvořených většími zrny o průměru až 5 mm, značící směr původní vrstevnatosti. Lokálně mohou tyto droby přecházet do slepenců (extrémní případ slepence viz Obr. 4-3b). Zrna jsou tvořena detritickým křemenem, živci, muskovitem, biotitem a úlomky jiných hornin (často jílovité břidlice, viz analýza horninových výbrusů). Tmel je převážně prachovitý, složení zrn je podobné jako u základní hmoty, doplněné o rekrystalizované jílové minerály. Obsah chloritu a sericitu v základní hmotě i tmelu potvrzuje anchimetamorfovaný charakter této horniny [67].



*Obr. 4-3: Variabilita velikosti zrn místních hornin: A – jemnozrnná droba, B – slepenc (lokálně extrémní případ obsahující velké úlomky jílovitých břidlic)*

## 5 METODIKA

### 5.1 Odběr horninového materiálu a výroba zkušebních těles

V lomu Kobeřice byly odebrány celkem čtyři bloky droby s důrazem na převážně jemnozrnnou stavbu s nízkým obsahem větších klastů a absenci diskontinuit. Z těchto bloků autor následně odvrstal vrtná jádra pomocí jádrové stojanové vrtačky s vodním výplachem a ručním přitlakem, kolmo na rovinu téměř neznatelných ploch původní vrstevnatosti. Použity byly jádrové vrtáky s diamantovými korunkami o průměru 44,0 a 45,7 mm; tento průměr je sice hraniční z hlediska minima udávaného v metodikách, byl ale zvolen kvůli zajištění rovnoměrnějšího prohřátí těles při výpalu. Jádra autor následně nařezal na kotoučové pile s diamantovým řezným nástrojem na vhodné délky podle požadavků jednotlivých zkoušek – štíhlostní poměr  $L/D = 2,0$  byl zvolen pro prosté tlakové a triaxiální zkoušky (celkem 32 těles), štíhlostní poměr  $L/D = 0,5$  pak pro Brazílské zkoušky (celkem 24 těles), viz Obr. 5-1.



*Obr. 5-1: Sada těles vyrobená z jemnozrnné droby*

Kromě těchto těles byla rovněž využita tělesa z depozitáře Ústavu geotechniky, zhotovená v rámci předchozích výzkumů (např. [66] nebo [68]). Jedná se také o drobu odebranou z lomu Kobeřice, ovšem s vyšším podílem větších klastických částic, pro zjednodušení nazývanou hrubozrnná. Jedná se o petrografický typ, který může lokálně

přecházet do drobnozrnného slepence. Pro potřeby diplomové práce bylo vybráno celkem osm těles o průměru 38,0 mm a štíhlostním poměru  $L/D = 2,0$ .

Čtyři tělesa po výpalu autor nařezal na dvě menší tělesa o štíhlostním poměru  $L/D = 0,5$  pro potřeby Brazilské zkoušky, ze zbylých částí těchto těles pak byly zhotoveny horninové výbrusy pro petrografické studium.

### **5.1.1 Stanovení parametrů zkušebních těles a objemové hmotnosti**

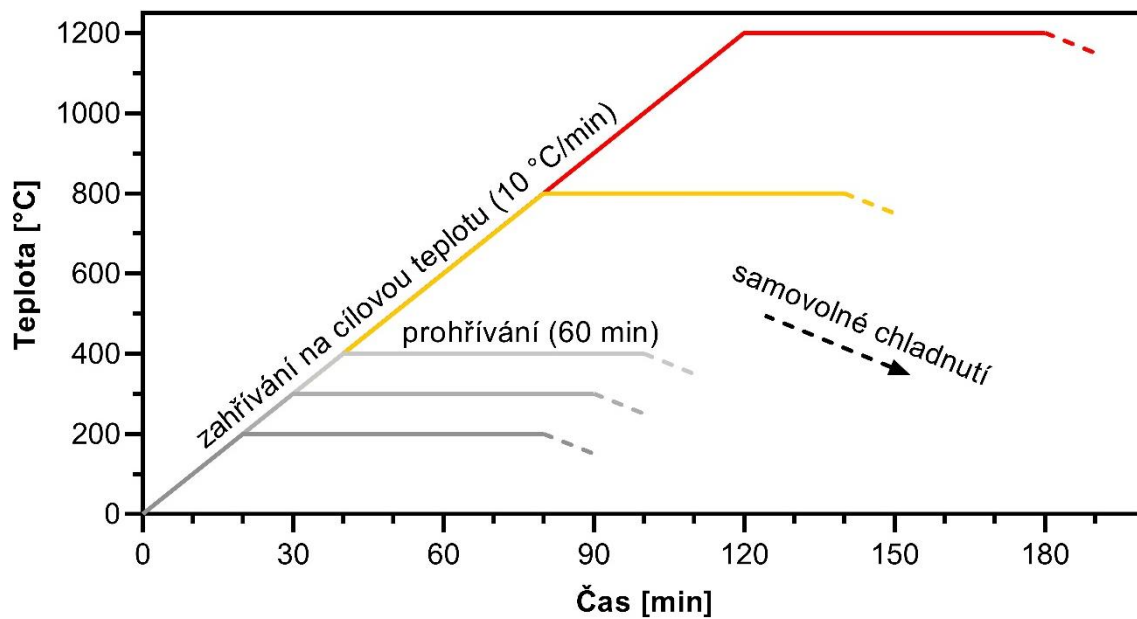
Všechna tělesa před i po výpalu autor pečlivě proměřil posuvným měřidlem pro získání přesných parametrů horninových těles (průměru  $D$  a délky  $L$ ) a pro sledování případných objemových změn. Průměr byl stanoven ve třech řezech, vždy dvě měření kolmo na sebe, délka ve čtvrtinách obvodu postavy, s přesností na 0,1 mm. Tyto hodnoty byly zprůměrovány a následně využity pro výpočet průřezové plochy a objemu horninových těles. Zároveň byla tělesa také zvážena pro výpočet objemové hmotnosti dle Rov. 3-1.

## **5.2 Sestavení sad zkušebních těles a jejich výpal**

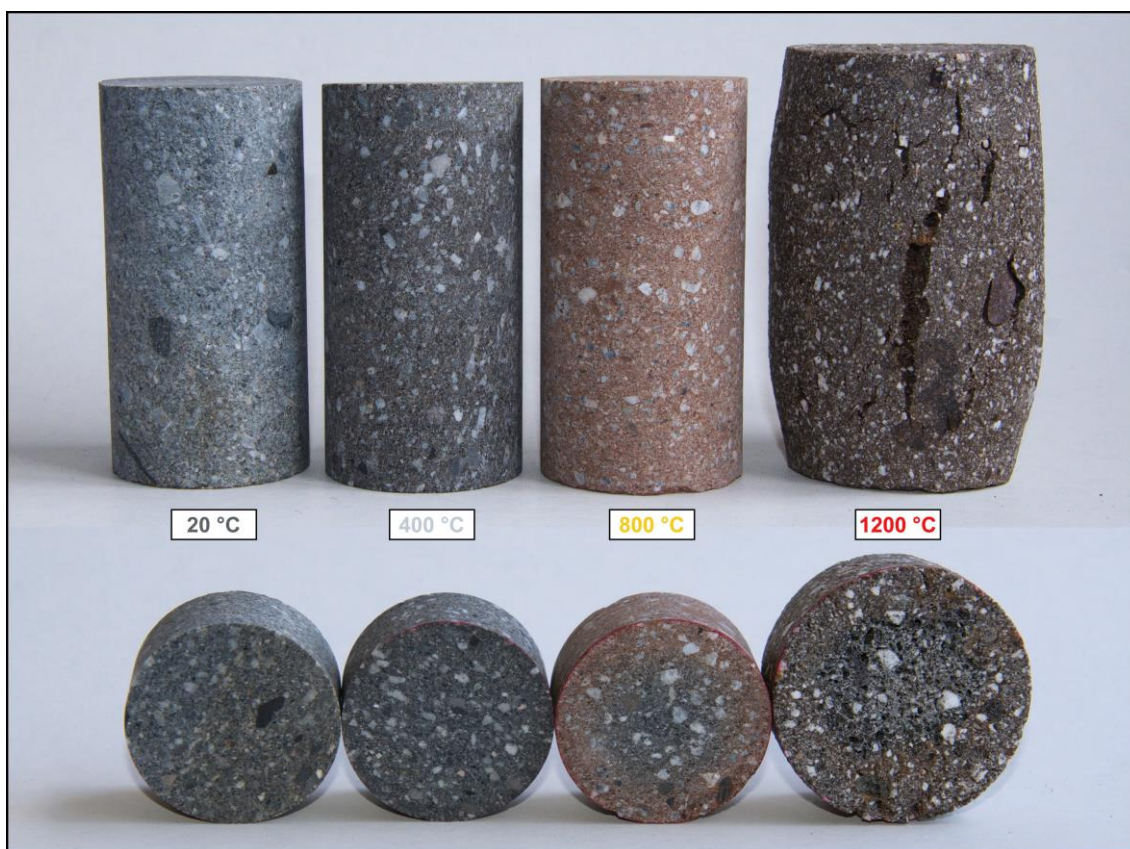
Z těles vyrobených z jemnozrnné droby byly sestaveny celkem čtyři sady v konfiguraci 8 těles s  $L/D = 2,0$  a 6 těles s  $L/D = 0,5$ . Tělesa z různých bloků byla rovnoměrně rozdělena do jednotlivých sad pro omezení vlivu případných rozdílů mezi bloky. Jedna sada byla ponechána v přirozeném/nezahřátém stavu, ostatní tři byly vypáleny na 200, 300 a 400 °C pro studium chování droby při nižších teplotách. Teplota 100 °C byla vynechána, jelikož odpovídá běžné teplotě pro sušení těles a teoreticky by neměla nějak znatelně ovlivnit mechanické vlastnosti horniny. Jeden z bloků jemnozrnné droby obsahoval skrytou diskontinuitu v podobě tenké vrstvičky hrubších klastů s puklinou ve směru ploch vrstevnatosti, která se projevila na celkem třech tělesech. Tato tělesa byla ponechána v příslušných sadách pro orientační stanovení vlivu případných puklin na pevnostní charakteristiky.

Tělesa z hrubozrnné droby byla rozdělena do čtyř sad po dvou tělesech. Jedna sada byla ponechána v přirozeném stavu, ostatní sady byly vypáleny na 400, 800 a 1200 °C pro orientační analýzu chování droby při vysokých teplotách (viz Obr. 5-3).

Výpal těles byl realizován v pecích na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců. Zahřátí těles na cílovou teplotu bylo provedeno rychlostí 10 °C/min, tato teplota pak byla udržována po dobu jedné hodiny. Tento postup by měl zajistit relativně rovnoměrné prohřátí celého objemu tělesa. Ochlazení těles na laboratorní teplotu (uvažováno 20 °C) bylo provedeno samovolně. Celý postup výpalu je znázorněn na Obr. 5-2.



Obr. 5-2: Idealizované křivky výpalu zkušebních těles



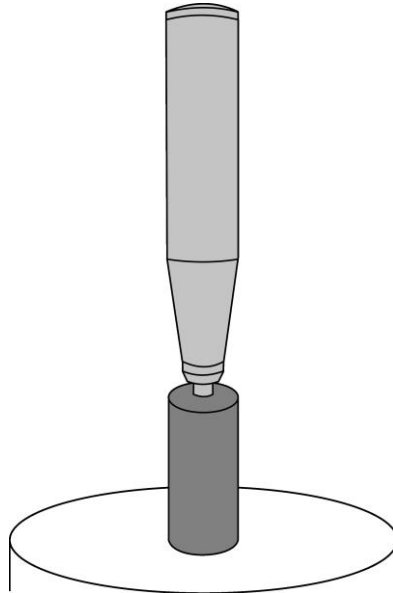
Obr. 5-3: Sada těles z hrubozrnné droby po výpalu: nahoře - tělesa určená pro prostou tlakovou zkoušku, dole – nařezaná tělesa určená pro Brazílskou zkoušku



## 5.3 Realizace destruktivních a polodestruktivních zkoušek

### 5.3.1 Stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti

Všechna tělesa o štíhlostním poměru  $L/D = 2,0$  vyrobená z jemnozrné droby autor před realizací destruktivních zkoušek otestoval Schmidovým kladívkem typu L. Dle běžné praxe na Ústavu geotechniky bylo těleso postaveno jednou podstavou na masivní ocelovou podložku, druhá podstava posloužila pro měření (viz Obr. 5-4). Bylo zaznamenáno celkem deset hodnot pro každé těleso, z nichž byl stanoven průměr, který byl následně korigován o chybu měření kladívka (stanoveno kalibrací na oceňchované kovadlině). Tělesa s puklinami nebyla Schmidovým kladívkem testována.



Obr. 5-4: Schéma použité metodiky pro stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti

### 5.3.2 Prostá tlaková zkouška a stanovení deformačních charakteristik

Celkem pět horninových těles z jemnozrné droby o štíhlostním poměru  $L/D = 2,0$  bylo vybráno z každé zkušební sady. Tato tělesa byla osazena dvěma 30 mm svislými a jedním 20 mm vodorovným tenzometrem pro měření deformací. Tělesa s puklinami byla cíleně otestována v prostém tlaku, bez použití tenzometrů. Zatěžování proběhlo dle postupu uvedeném v ČSN EN 14580 (viz Obr. 3-3) rychlostí 800 N/s na oboru napětí mezi 5 a 60 MPa. Polovina těles z hrubozrné droby byla také otestována v prostém tlaku, bez použití tenzometrů. Prostá tlaková pevnost, modul pružnosti a Poissonovo číslo byly vypočítány dle Rov. 3-2, Rov. 3-5 a Rov. 3-6 (průřezová plocha byla vypočítána z průměru tělesa po výpalu).

### **5.3.3 Zkouška pevnosti v příčném tahu**

Pro Brazílskou zkoušku byla připravena zkušební tělesa se štíhlostním poměrem  $L/D = 0,5$ . Celkem autor otestoval 24 těles z jemnozrnné (jedno těleso s puklinou) a osm těles z hrubozrnné droby. Zatěžování proběhlo rychlostí 200 N/s mezi rovnoběžnými rovnými čelistmi lisu, s důrazem na důkladné vycentrování tělesa v zatěžovací soustavě. Tahová pevnost byla vypočtena dle Rov. 3-7 (dosazeny rozměry tělesa po výpalu).

### **5.3.4 Triaxiální tlaková zkouška**

Triaxiální tlakové zkoušky autor realizoval celkem na dvanácti zkušebních tělesech z jemnozrnné droby o štíhlostním poměru  $L/D = 2,0$  a průměru 45,7 mm. Tento průměr byl zvolen pro co nejdokonalější shodu s vnitřním průměrem použité Hoekovy komory (o průměru  $NQ = 47,6$  mm). Po ustálení cílového komorového napětí (4, 6 a 8 MPa) bylo těleso zatěžováno osovou silou rychlostí 800 N/s až do porušení. Osové napětí při porušení bylo vypočteno dle Rov. 3-2 pro prostou tlakovou pevnost.

### **5.3.5 Mohr-Coulombova podmínka porušení**

Výsledky prostých tlakových, příčných tahových a triaxiálních tlakových zkoušek byly vyneseny v prostoru  $\sigma_3$ - $\sigma_1$ . Následně byly proloženy přímkou pro výpočet koheze a úhlu vnitřního tření dle Rov. 3-9 a Rov. 3-10. U sad z hrubozrnné droby je nutné stanovené hodnoty považovat pouze za orientační, pro absenci triaxiálních zkoušek.

## **5.4 Další analýzy hrubozrnné droby**

Hned po výpalu byla tělesa vyfocena pro kolorimetrické studium jejich povrchů. Umístění všech těles na jednu fotografii (viz Obr. 5-3) by mělo zajistit podobné světelné podmínky a tím zpřesnit analýzu pro účely srovnání. Z každé podstavy tělesa autor udělal reprezentativní výřez o co největší ploše, který byl následně zmenšen na velikost jednoho pixelu pro zprůměrování barev z celé plochy a stanovení jejich RGB složek.

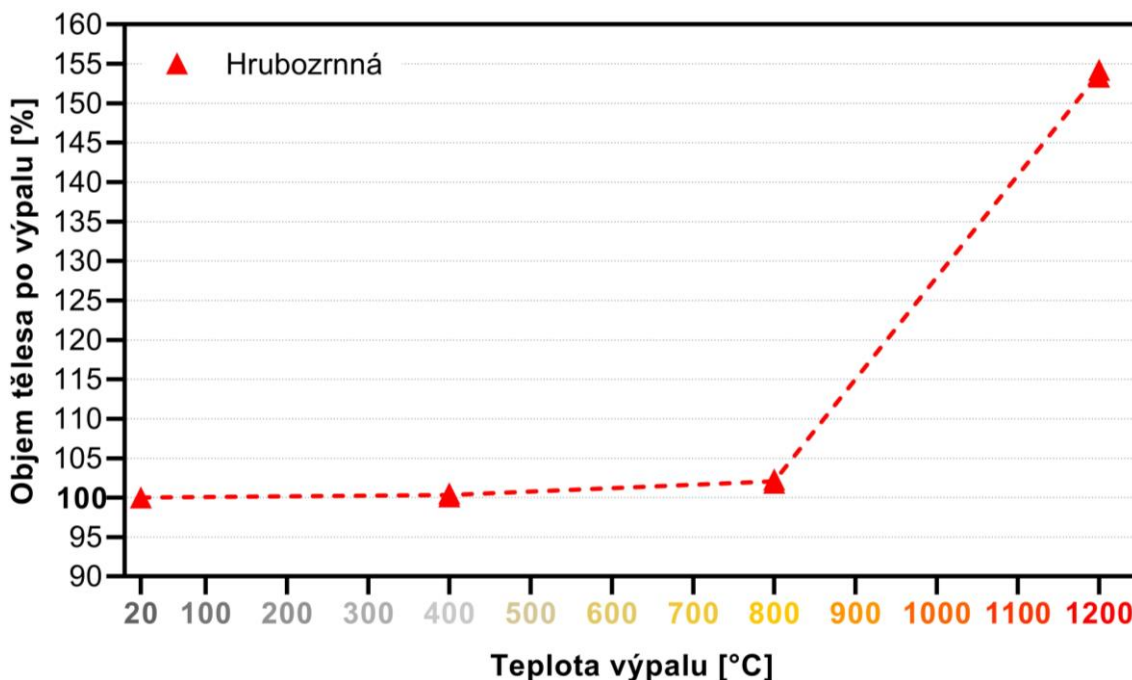
Ze zbylých částí těles byly dále vyrobeny celkem 4 horninové výbrusy pro petrografické studium vlivu teploty výpalu na mineralogické složení droby. K tomu autor využil polarizační mikroskop v režimech PPL a XPL. Průřezy vypálených a nařezaných těles (Obr. 5-3 dole) byly také snímkovány pomocí digitálního mikroskopu.

## 6 VÝSLEDKY

Výsledky realizovaných laboratorních zkoušek autor shrnul níže ve formě grafů. Individuální hodnoty horninových parametrů jsou pro jemnozrnnou a hrubozrnnou drobu zobrazeny odděleně, průměrné hodnoty pro jednotlivé teploty výpalu jsou propojeny přímkami pro znázornění celkového trendu. Kompletní sada dat je dostupná v Příloze A.

### 6.1 Makroskopické změny těles po výpalu

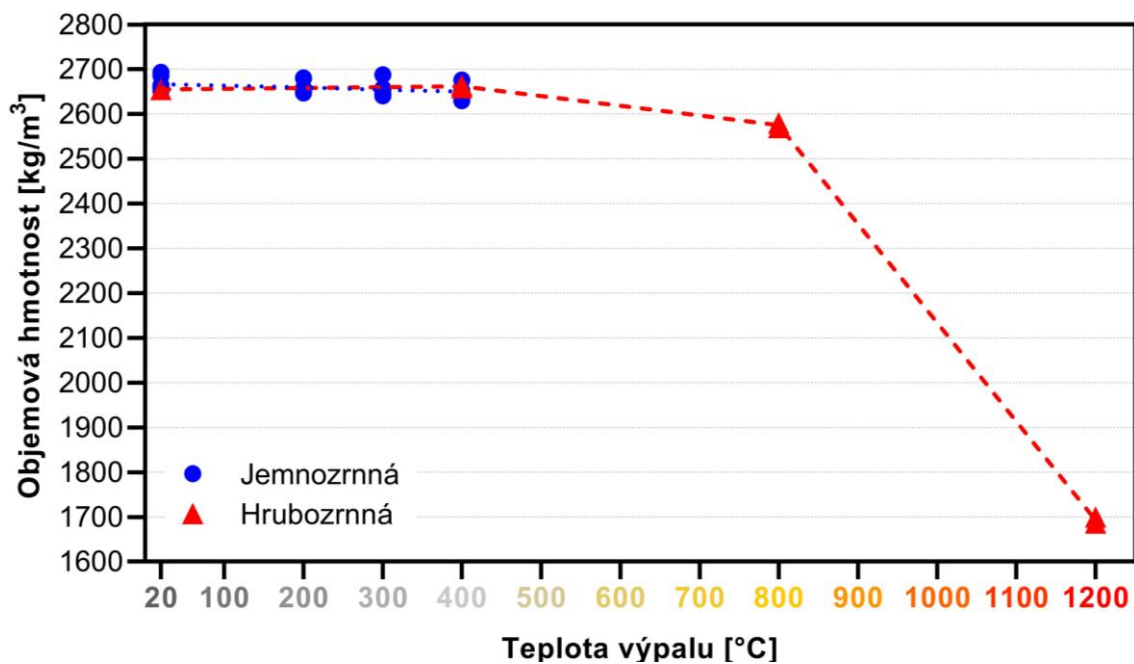
U těles z jemnozrnné droby se výpal na 200 až 400 °C projevil jen mírným ztmavnutím povrchu, bez jakýchkoli změřitelných objemových změn. Totéž platí u těles z hrubozrnné droby zahřátých na 400 °C. Při výpalu na 800 °C dochází k výraznější změně barvy povrchu (přechod z tmavě šedé na cihlovou, viz Obr. 5-3) a mírnému nárůstu objemu tělesa (o asi 2 %, viz Obr. 6-1). Výpal na 1200 °C způsobil drastické změny ve struktuře horninového materiálu spojené s výrazným nárůstem objemu (až o 55 %, viz Obr. 6-1), zapříčiněným vznikem pórové struktury uvnitř tělesa. V souvislosti s objemovými změnami dochází také k rozvoji tahových puklin na povrchu tělesa (viz Obr. 5-3). Zbývající horninová hmota přechází z cihlové do tmavě hnědošedé barvy.



Obr. 6-1: Závislost objemu tělesa na teplotě výpalu

## 6.2 Vliv teploty výpalu na objemovou hmotnost

Výpal až na 400 °C se u jemnozrné droby projevila mírným, téměř nezatelným postupným poklesem objemové hmotnosti z hodnoty 2670 na 2650 kg/m<sup>3</sup>. U sady těles z hrubozrné droby je objemová hmotnost do teploty 400 °C prakticky konstantní s hodnotou 2650 kg/m<sup>3</sup>. Při výpalu na teplotu 800 °C již dochází k výraznějšímu poklesu na hodnotu 2575 kg/m<sup>3</sup>. Vzhledem k drastickým změnám struktury droby při výpalu na teplotu 1200 °C objemová hmotnost dále klesá až na hodnotu 1690 kg/m<sup>3</sup> (viz Obr. 6-2). Hodnoty objemové hmotnosti jsou vztaženy k objemu tělesa po výpalu.

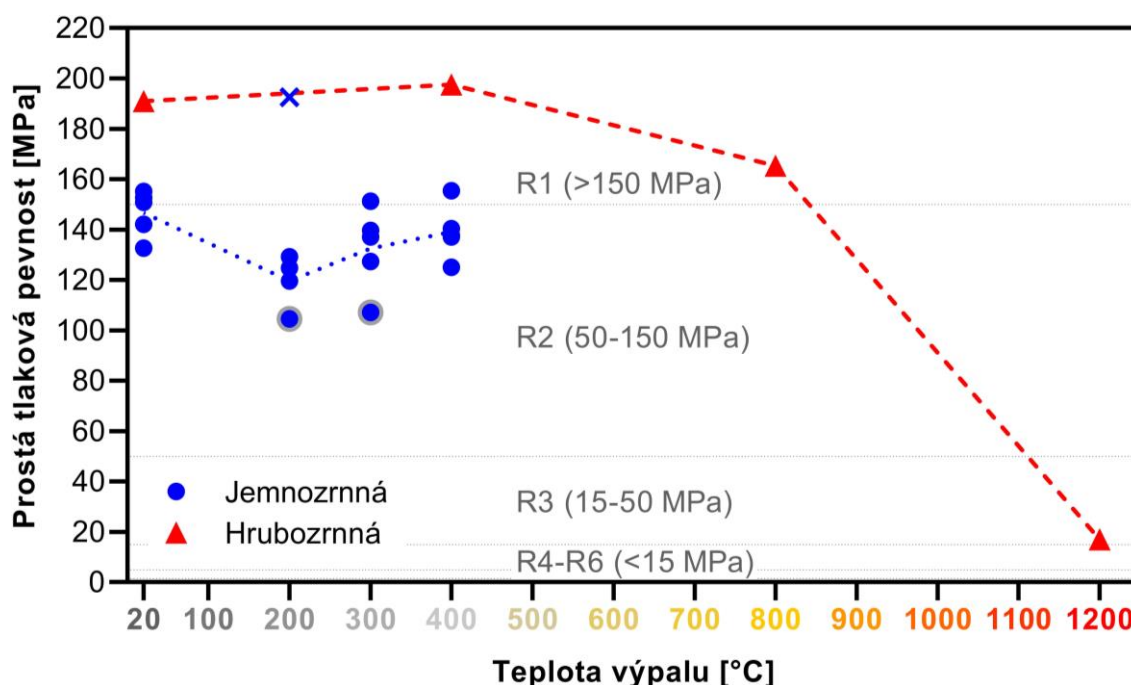


Obr. 6-2: Závislost objemové hmotnosti tělesa na teplotě výpalu

## 6.3 Vliv teploty výpalu na prostou tlakovou pevnost

Tělesa z jemnozrné droby vykázala prostou tlakovou pevnost okolo 145 MPa, po výpalu na 200 °C tato pevnost klesla na přibližně 120 MPa. Výpal na 300 a 400 °C způsobil postupný nárůst pevnosti na 130 a 140 MPa, respektive. Tělesa s puklinami (rovina pukliny kolmo na osu zatěžování) vykázala mírně nižší pevnost než ostatní tělesa v sadách (viz Obr. 6-3), rozdíl ale není příliš významný a jednoduše odlišitelný od přirozeného rozptylu ostatních hodnot. Jedna hodnota ze sady těles vypálené na 200 °C byla vyloučena, jelikož neodpovídala celkovému trendu všech ostatních pevností, jedná se o tzv. odlehlou hodnotu (viz Obr. 6-3).

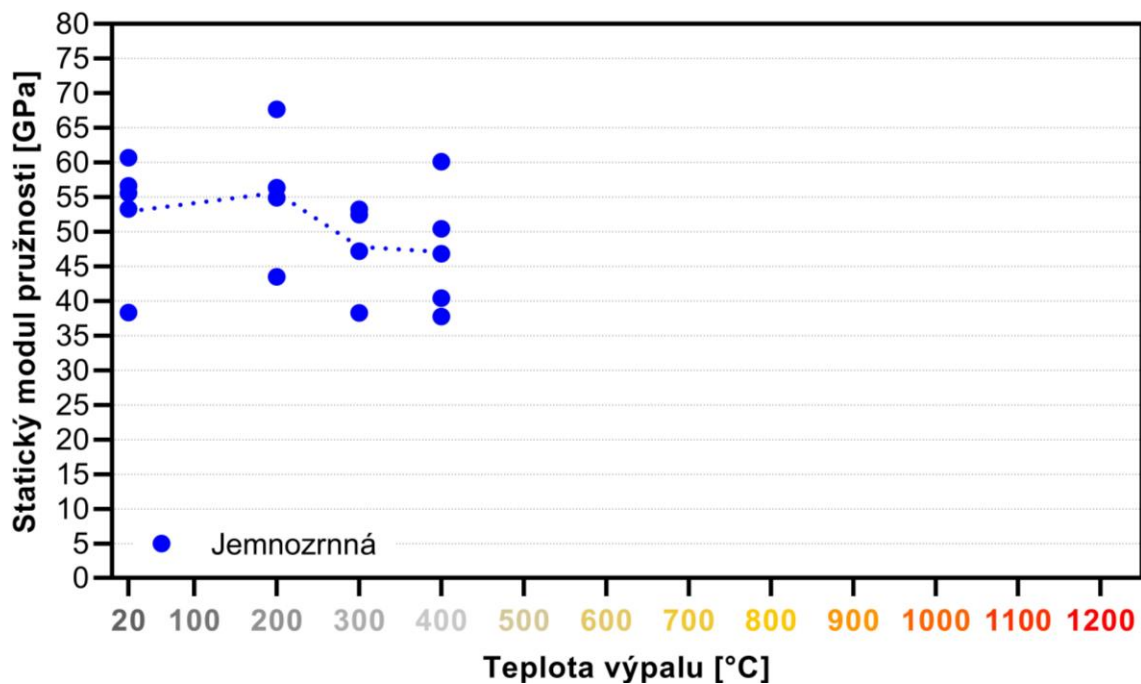
Hrubozrná droba vykazuje oproti té jemnozrné výrazně vyšší prostou tlakovou pevnost, přibližně 190 MPa. Tato hodnota byla převzata z předchozího výzkumu realizovaného na Ústavu geotechniky [37], jelikož těleso testované v rámci tohoto výzkumu bylo oslabeno uskupením zrn jílovité břidlice, což způsobilo porušení již při 50 % reálné pevnosti horniny. Po výpalu tělesa na 400 °C pevnost horniny mírně vzrostla na necelých 200 MPa. Vypálení tělesa na 800 °C se projevilo poklesem pevnosti na 165 MPa. Po zahřátí droby na 1200 °C byla tlaková pevnost redukována na desetinu původní hodnoty (viz Obr. 6-3) vlivem radikálních změn v její struktuře (viz Obr. 5-3). Záznamy porušení těchto těles jsou také dostupné v podobě videa na tomto odkazu: <https://doi.org/10.7910/DVN/VBJS0S>



Obr. 6-3: Závislost prosté tlakové pevnosti na teplotě výpalu: hodnoty stanovené na tělesech s puklinami označeny světle šedým okrajem, vyřazená hodnota pevnosti označena křížkem, pevnostní třídy hornin dle ČSN 73 6133 [38]

## 6.4 Vliv teploty výpalu na statický modul pružnosti

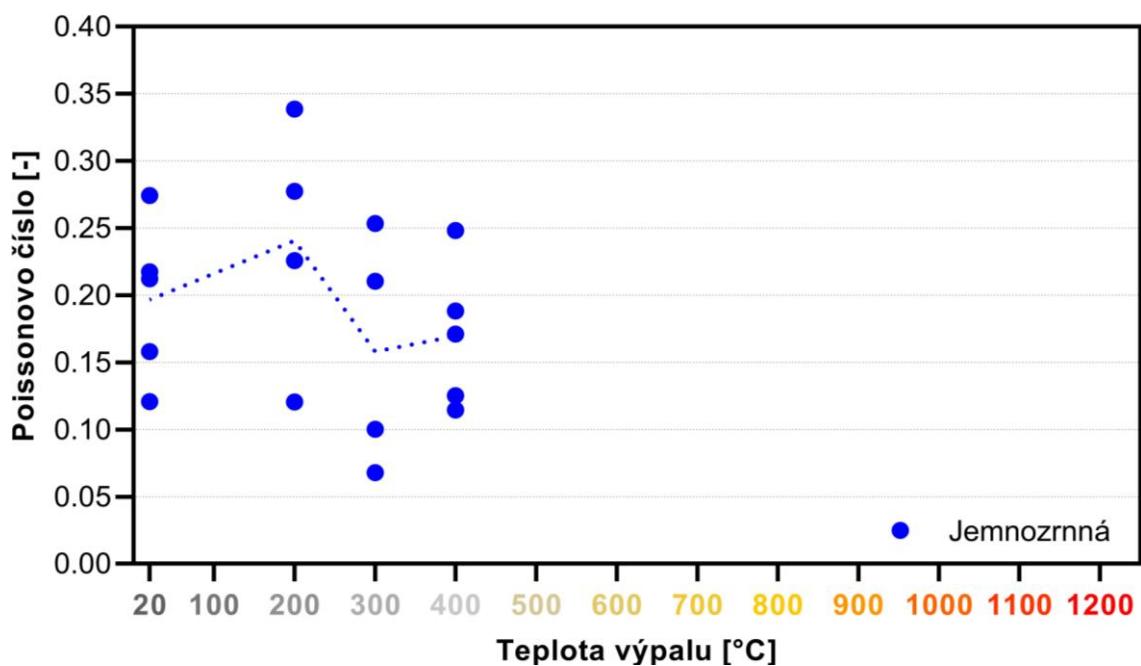
Stanovená průměrná hodnota statického modulu pružnosti zkoumané droby se v přirozeném stavu pohybuje okolo 53 GPa. Výpal na 200 °C způsobil mírný nárůst modulu na 56 GPa, po výpalu na 300 a 400 °C hodnota modulu klesla a pohybuje se mezi 47 a 48 GPa. I přes použití dvou osových tenzometrů a zprůměrování takto stanovených deformací vykazují hodnoty modulu pružnosti velkou variabilitu (viz Obr. 6-4).



Obr. 6-4: Závislost statického modulu pružnosti na teplotě výpalu

## 6.5 Vliv teploty výpalu na hodnotu Poissonova čísla

Průměrná hodnota Poissonova čísla pro nevypálenou drobu se pohybuje okolo 0,20. Výpalem na 200 °C tato hodnota mírně vzrostla na 0,24. Zahřátím na 300 a 400 °C dochází k poklesu hodnoty Poissonova čísla na 0,16 až 0,17. Všechny sady těles vykazují značnou variabilitu jednotlivých hodnot (viz Obr. 6-5), podobně jako modul pružnosti.



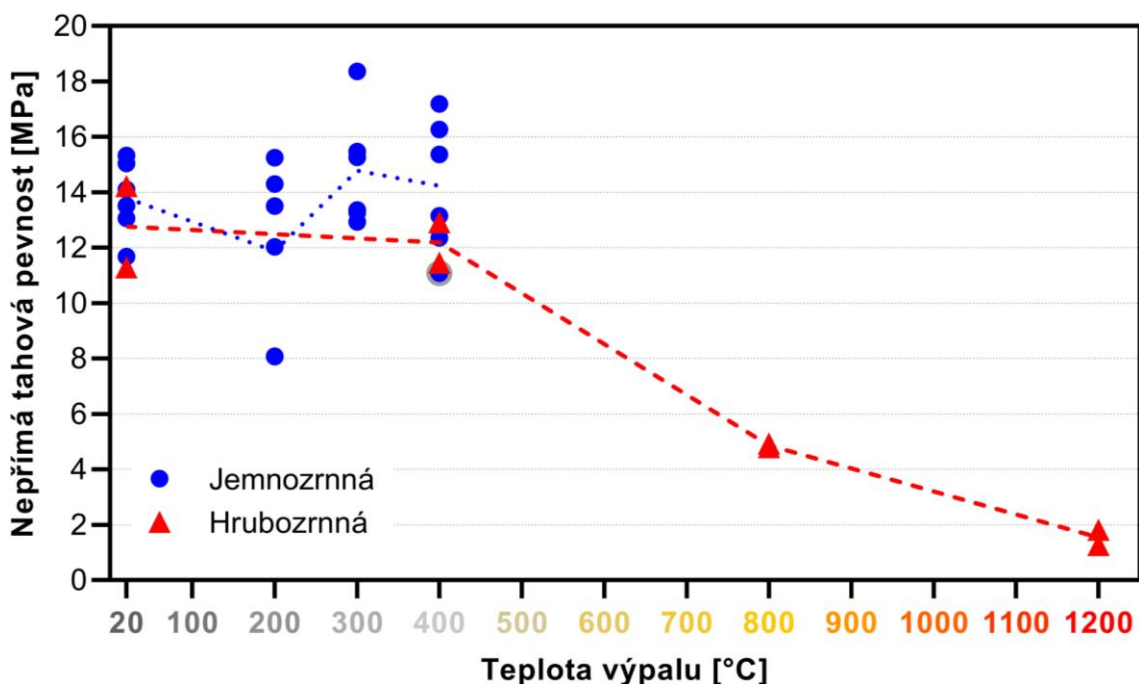
Obr. 6-5: Závislost Poissonova čísla na teplotě výpalu

## 6.6 Vliv teploty výpalu na nepřímou tahovou pevnost

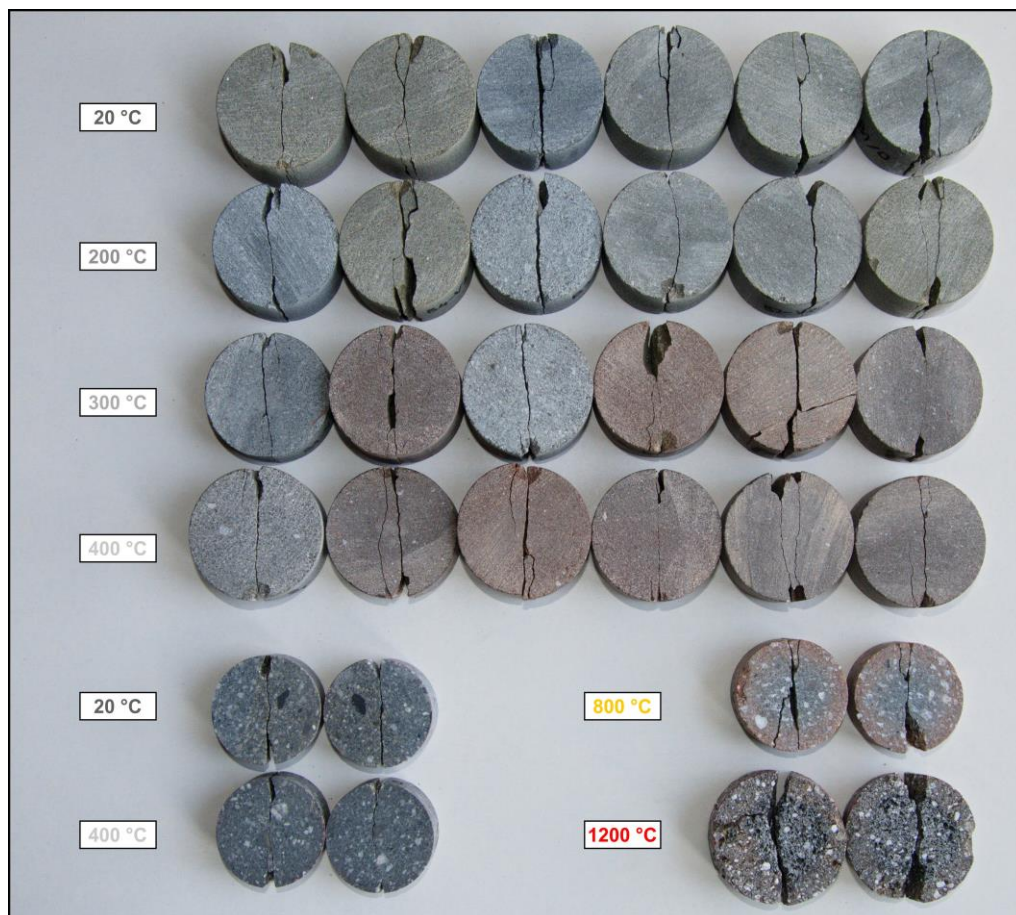
Jemnozrná droba vykázala průměrnou nepřímou tahovou pevnost 13,8 MPa. Výpal na 200 °C se na této pevnosti projevil poklesem na 11,9 MPa, u dvou hodnot dokonce až na 8 MPa. Obě sady vypálené na vyšší teploty vykázaly nárůst pevnosti nad původní hodnotu (14,8 MPa pro 300 °C a 14,2 MPa pro 400 °C). Těleso s puklinou, zařazené do sady vypálené na 400 °C, vykazuje jen mírnou odchylku od ostatních hodnot. Tato odchylka není jednoznačně odlišitelná od přirozeného rozptylu pevnosti, viz Obr. 6-6.

Hrubozrná droba se po stránce nepřímé tahové pevnosti v nevypáleném stavu příliš neliší od jemnozrné, průměrná hodnota se pohybuje okolo 12,6 MPa. Výpal na 400 °C způsobil téměř neznamatelný pokles hodnoty na 12,2 MPa. Teplota 800 °C měla za následek výrazný pokles tahové pevnosti na hodnotu 4,9 MPa. Po výpalu na 1200 °C už hornina nevykazuje téměř žádnou tahovou pevnost (přibližně 1,5 MPa), viz Obr. 6-6.

U všech těles testovaných Brazílskou zkouškou došlo k porušení způsobem pro tuto zkoušku typickým, jen s drobnými odchylkami v podobě občasné vedlejší trhliny. Drcené zóny v kontaktu s čelistmi lisu jsou na porušených tělesech rovněž patrné, viz Obr. 6-7.



Obr. 6-6: Závislost nepřímé tahové pevnosti na teplotě výpalu: hodnota stanovená na tělese s puklinou označena světle šedým okrajem



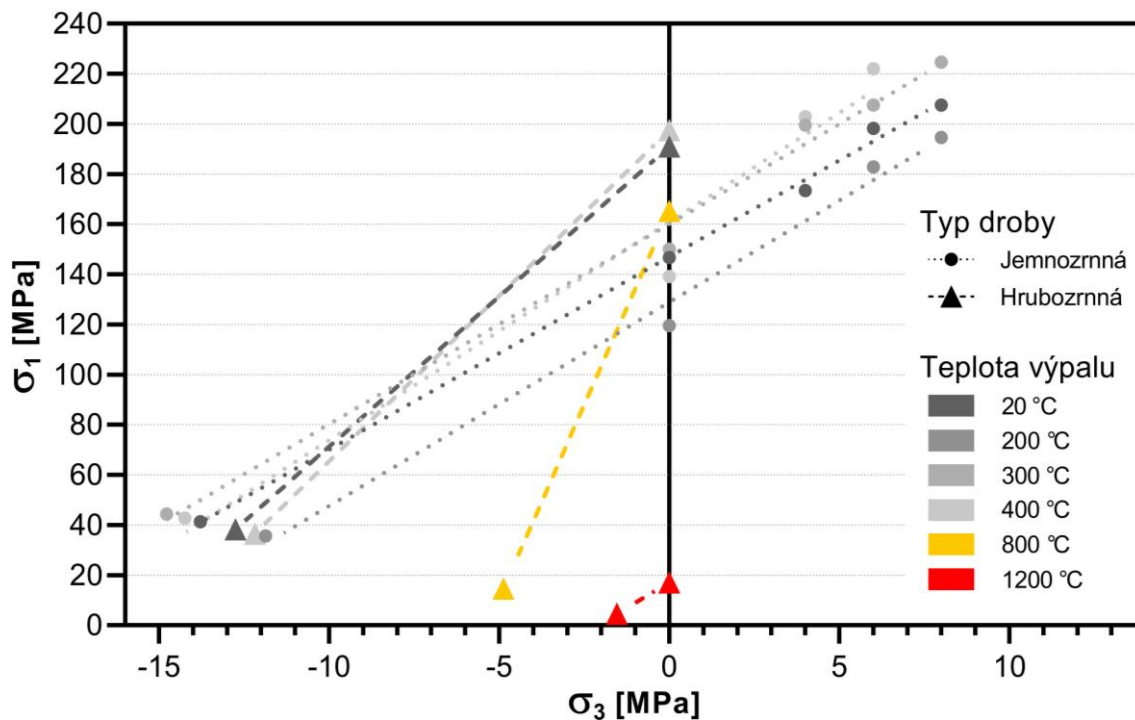
Obr. 6-7: Tělesa porušená v příčném tahu

## 6.7 Sestavení MC podmínky porušení pro jednotlivé sady

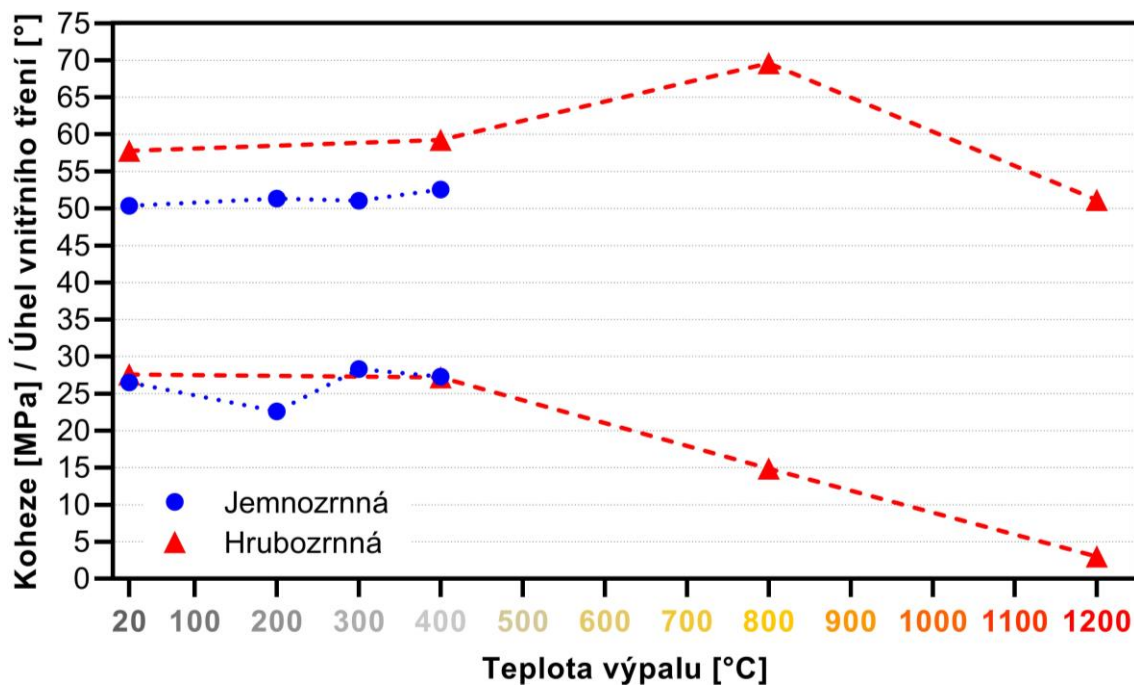
Výsledky prostých tlakových a nepřímých tahových zkoušek byly doplněny o triaxiální tlakové zkoušky a zobrazeny v prostoru  $\sigma_3$ - $\sigma_1$  (viz Obr. 6-8) pro výpočet koheze a úhlu vnitřního tření (dle Rov. 3-9 a Rov. 3-10). Dvě triaxiální zkoušky byly z dat vyloučeny, jelikož neodpovídaly trendu ostatních výsledků (u sady vypálené na 200 °C zkouška s bočním tlakem 4 MPa, u sady vypálené na 400 °C zkouška s bočním tlakem 8 MPa).

Koheze u jemnozrnné droby sleduje trend nepřímé tahové pevnosti s hodnotami mezi 22,6 a 28,3 MPa. Úhel vnitřního tření se s rostoucí teplotou jen mírně zvyšuje, s hodnotami mezi 50,3° a 52,6° (viz Obr. 6-9). U hrubozrnné droby se orientační hodnota koheze do teploty výpalu 400 °C pohybuje na podobných hodnotách, jako u jemnozrnné droby, s rostoucí teplotou následně lineárně klesá k hodnotě 3 MPa při teplotě výpalu 1200 °C. Orientační hodnota úhlu vnitřního tření roste na intervalu do 400 °C z hodnoty 57,8° na 59,2°. Při teplotě výpalu 800 °C dochází ke skoku na hodnotu 69,6°, vypálením na 1200 °C pak hodnota klesá na 51,2° (viz Obr. 6-9).





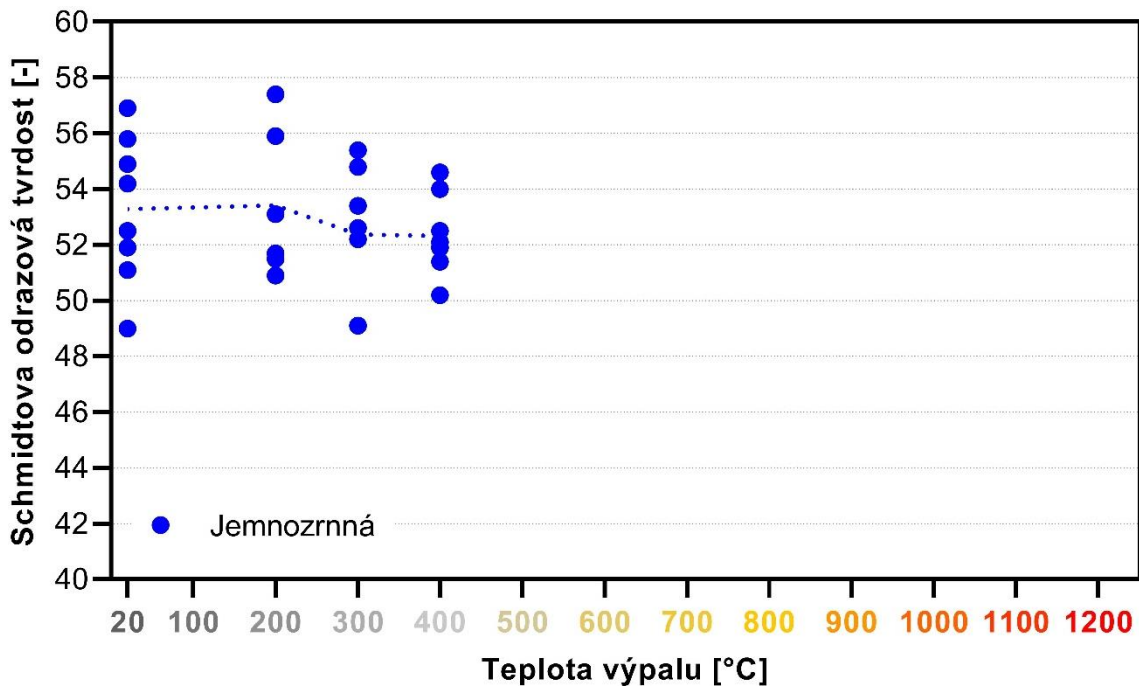
Obr. 6-8: Zobrazení výsledků destruktivních zkoušek v prostoru  $\sigma_3$ - $\sigma_1$



Obr. 6-9: Závislost koheze a úhlu vnitřního tření na teplotě výpalu

## 6.8 Vliv teploty výpalu na Schmidtovu odrazovou tvrdost

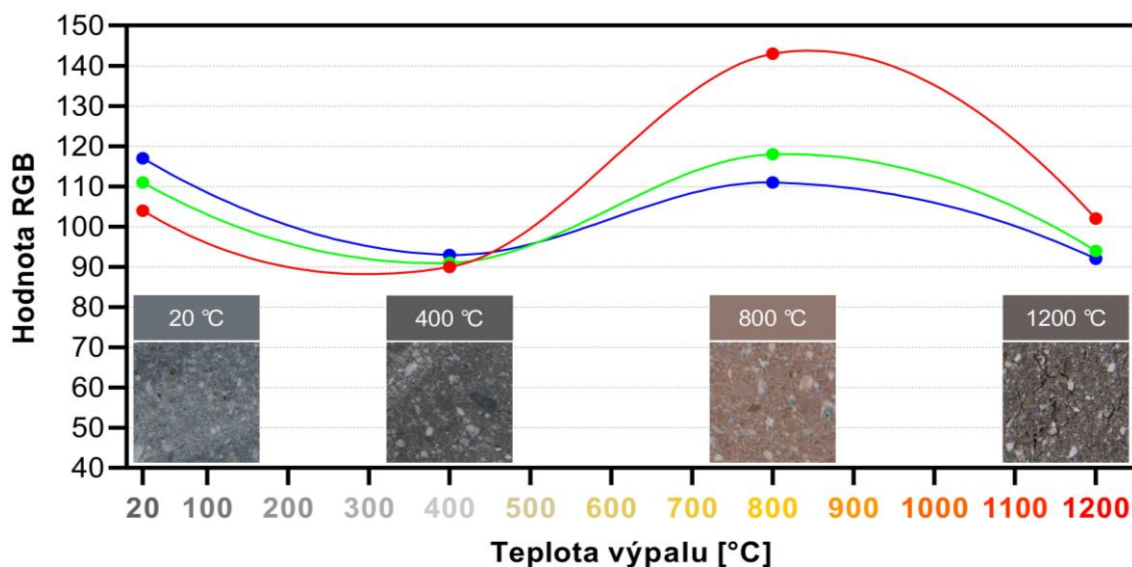
Výpal zkušebních těles na 200 °C se prakticky neprojevil na hodnotě Schmidtovy odrazové tvrdosti, která se pohybuje průměrně okolo 53. Tělesa vypálená na 300 a 400 °C vykazují nepatrně nižší hodnotu odrazu, orientačně okolo 52. Rozptyl hodnot s rostoucí teplotou mírně klesá, viz Obr. 6-10.



Obr. 6-10: Závislost Schmidtovy odrazové tvrdosti na teplotě výpalu

## 6.9 Kolorimetrická analýza

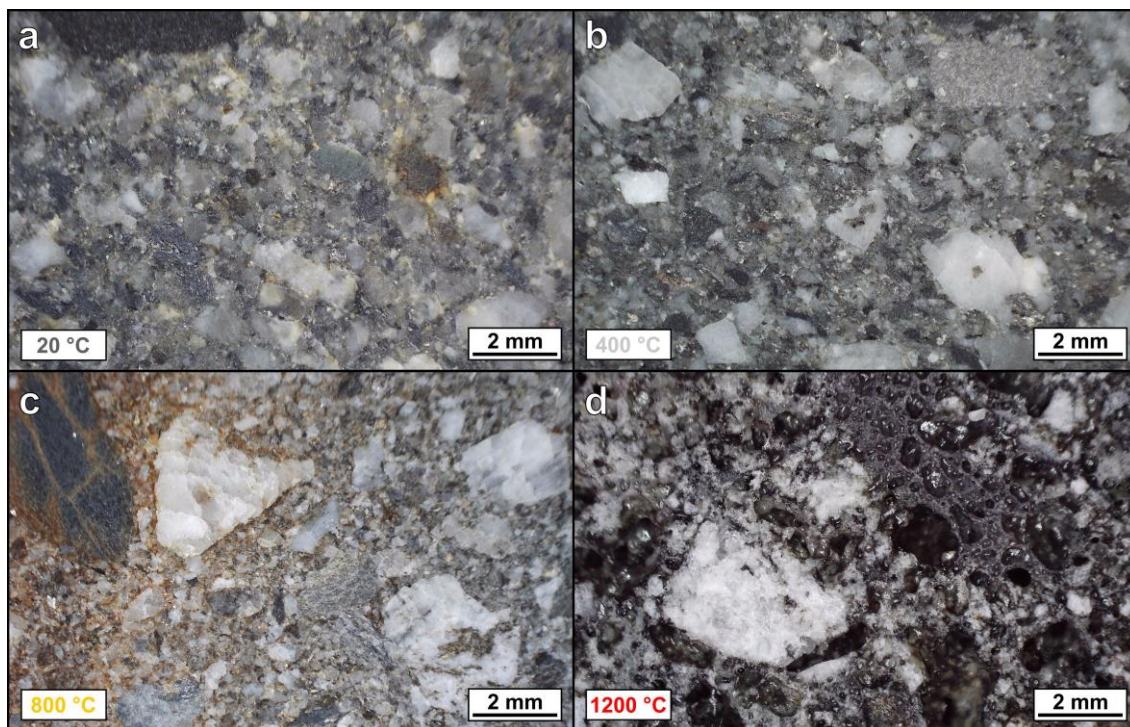
Zprůměrované barvy povrchů vypálených zkušebních těles z hrubozrnné droby byly rozloženy na RGB složky (červená, zelená a modrá). U nevypálené droby dosahuje nejvyšší hodnoty modrá složka, nejnižší hodnotu má červená složka. Při výpalu na 400 °C hodnoty všech složek klesnou na téměř stejnou úroveň, přibližně 91. Výpal na 800 °C způsobí nárůst zelené a modré složky na úroveň výchozích hodnot, u červené složky pak dochází k výraznému zvýšení až na hodnotu 143. U sady zahřáté na 1200 °C dochází k poklesu zelené a modré složky na úroveň hodnot odpovídajících výpalu na 400 °C, červená složka vykazuje vyšší hodnotu, odpovídající nezahřátému stavu (viz Obr. 6-11).



Obr. 6-11: Závislost hodnot RGB složek na teplotě výpalu, pro jednotlivé teploty je také přiložen analyzovaný výřez z fotografie povrchu a odpovídající zprůměrovaná barva

## 6.10 Petrografický rozbor hrubozrnné droby

Studovaná hrubozrnná droba je převážně šedě zbarvená, textura je většinou homogenní, původní vrstevnatost je neznatelná. Většina zrn tvořících základní hmotu dosahuje průměru do 1 mm, s výskytem větších částic až do průměru 8 mm (viz Obr. 6-12). Zjištěn byl obsah zrn křemene, živce, muskovitu, biotitu a úlomků jílovitých břidlic.



Obr. 6-12: Fotografie leštěných průřezů zkušebních těles z hrubozrnné droby po výpalu

Klasy křemene dosahují velikosti až 5 mm a jsou tzv. undulózně zhášejí (běžný projev tlakového namáhání horniny [60], viz např. Obr. 6-14g). Vliv teploty se viditelně projevil až u vzorku vypáleného na 800 °C, kdy dochází ke vzniku systému mikrotrhlin uvnitř zrn křemene (viz Obr. 6-12c). Po výpalu na 1200 °C jsou zrna již silně rozpukaná a částečně natavená (viz Obr. 6-12d a Obr. 6-14h).

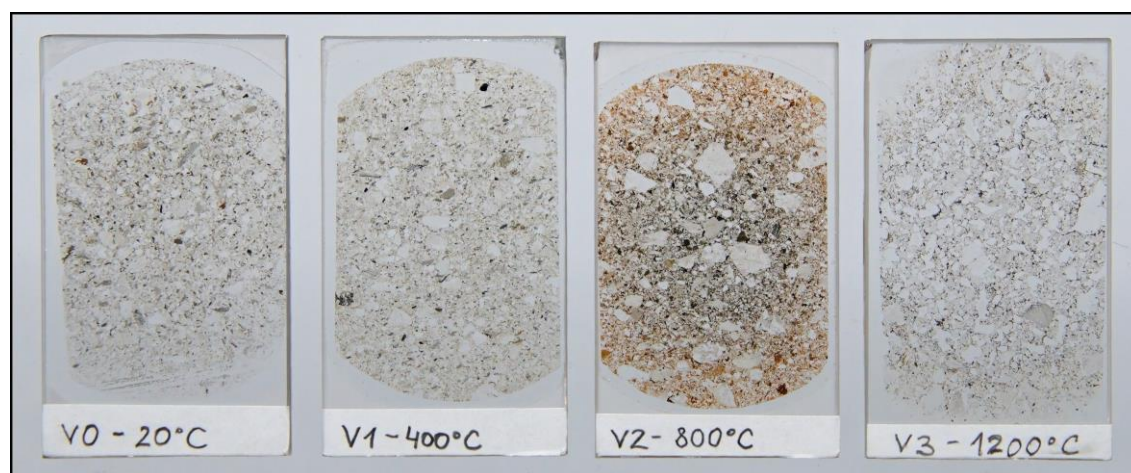
Zrna živce dosahují různé velikosti pohybující se od 0,5 až do 5 mm a jsou většinou sericitizovaná (viz např. Obr. 6-15f). Největší zrno živce z jádra vzorku vypáleného na 800 °C také vykazuje značnou karbonatizaci v podobě žilek uhličitanů (viz Obr. 6-15e) a obsahuje několik puklin. Zrno živce ze vzorku vypáleného na 1200 °C je částečně natavené a rozpukané, nevykazuje přítomnost produktů sericitizace (viz Obr. 6-15g, h).

Protáhlá zrna muskovitu jsou ve studované drobě spíše zřidkavá, s délkou mezi 0,1 a 1 mm. Po výpalu na 1200 °C jsou zrna muskovitu v drobě stále přítomná, ale dochází u nich zaoblení vlivem částečného natavení (viz Obr. 6-15g nebo Obr. 6-16g).

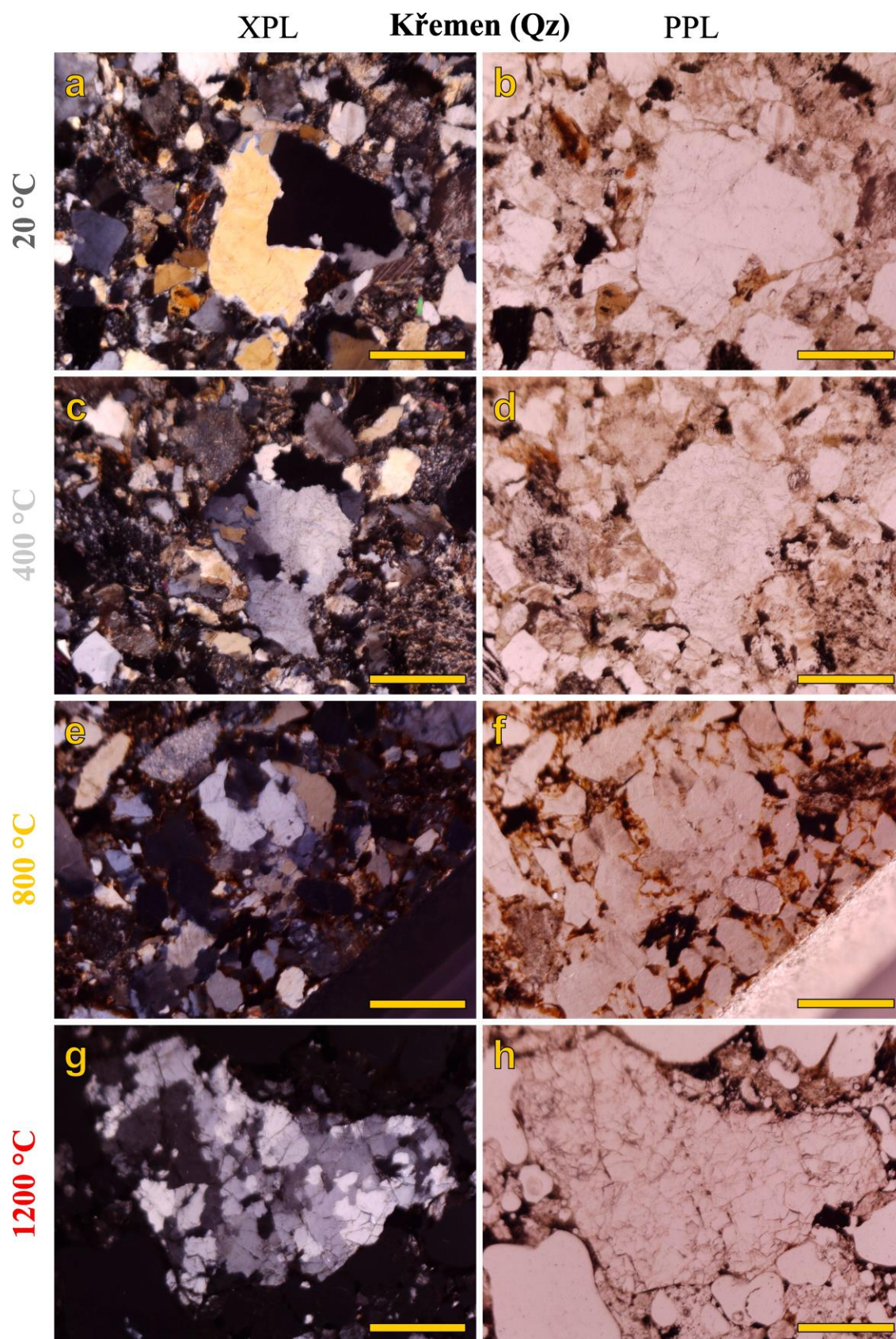
Biotit je ve studované drobě zastoupen zrny o délce do 2 mm. Vliv teploty je patrný až po výpalu na 1200 °C, kdy jsou zrna stále v omezené míře přítomna a vykazují povrchové natavení (viz Obr. 6-17h).

Převážně oblá a protáhlá úlomky jílovité břidlice nejčastěji dosahují délky do 8 mm. Po výpalu na 800 °C dochází k rozpukání zrna (viz Obr. 6-12c). Vypálení na 1200 °C již způsobí natavení celého zrna, doprovázené vznikem pórů (viz Obr. 6-12d a Obr. 6-18h).

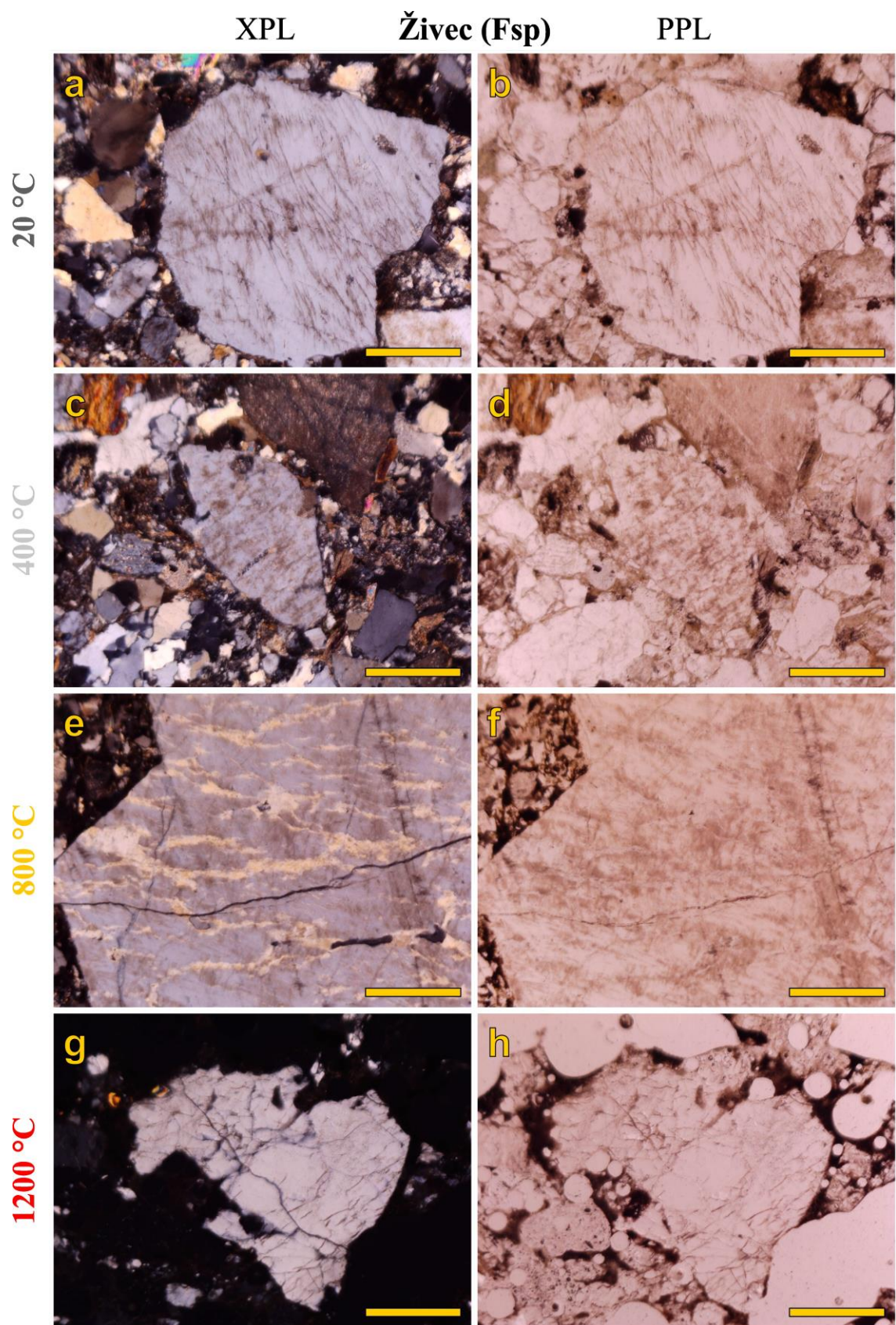
U vzorku droby vypáleného na 800 °C také dochází k změně barvy způsobené přítomností rezavě zbarvených oxidů železa v tmelu a úlomcích břidlic (viz Obr. 6-12, Obr. 6-14f nebo Obr. 6-18f). Po výpalu na 1200 °C již tyto oxidy nejsou patrné.



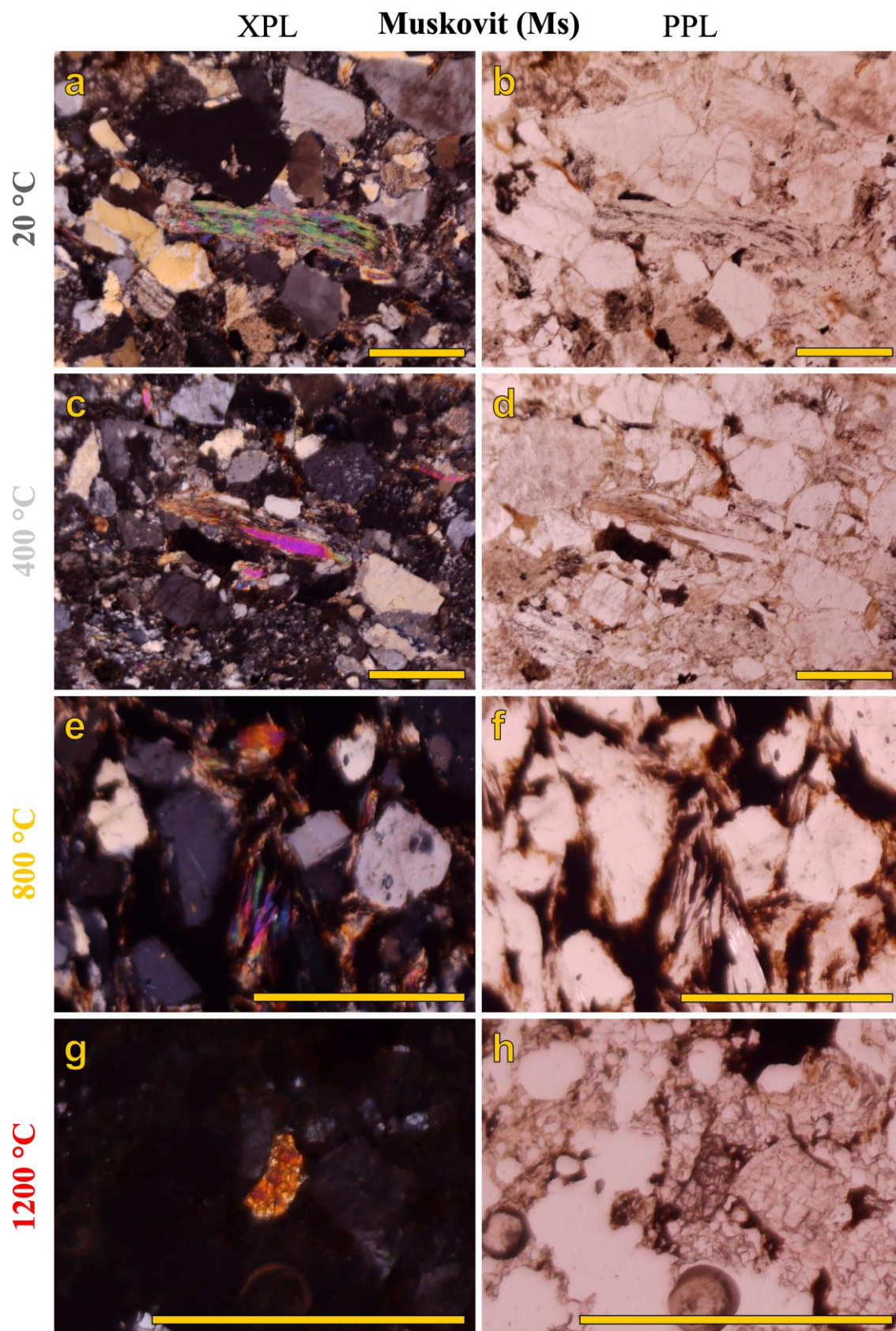
Obr. 6-13: Fotografie horninových výbrusů



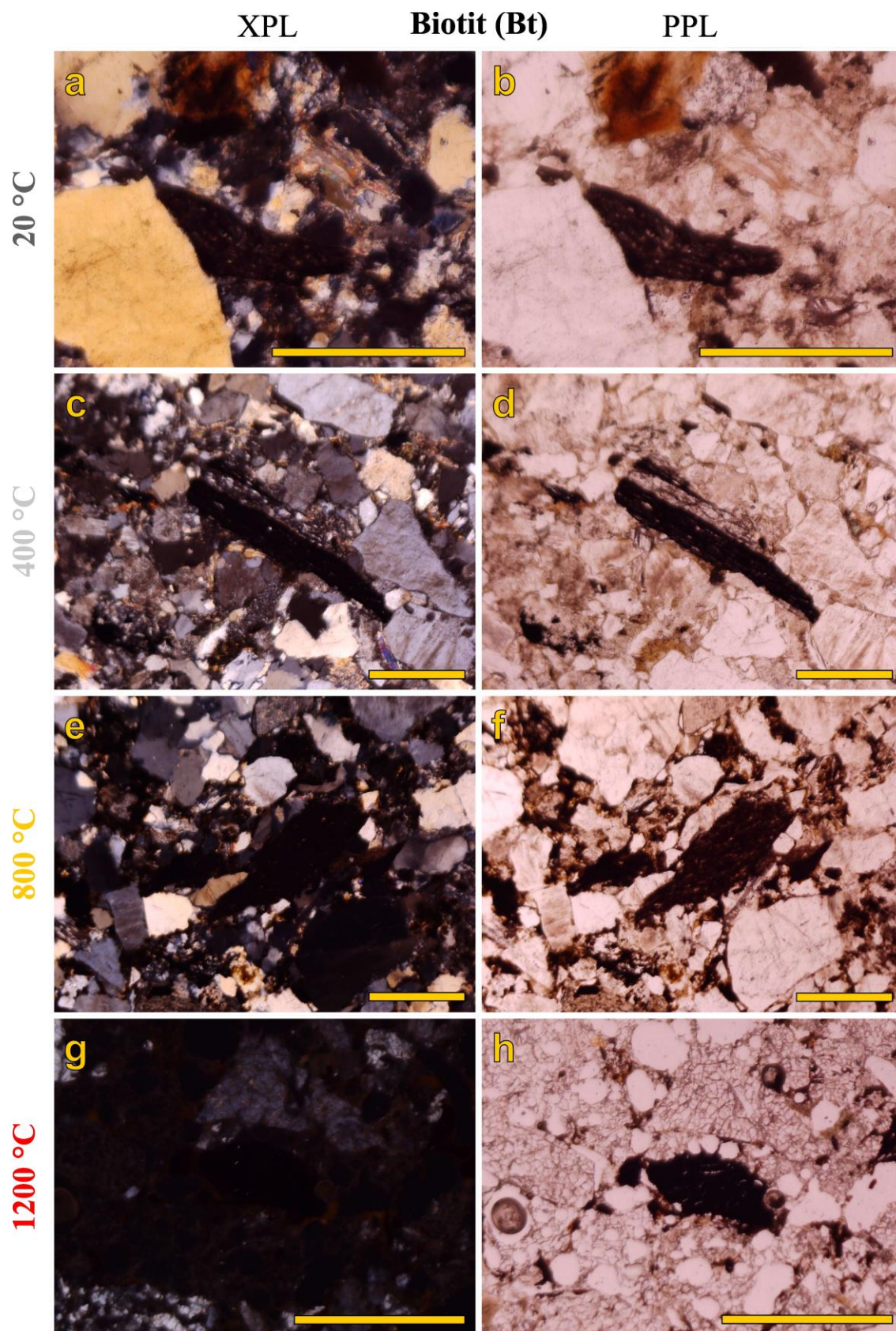
Obr. 6-14: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna křemene, pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm



Obr. 6-15: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna živce (plagioklasu), pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm

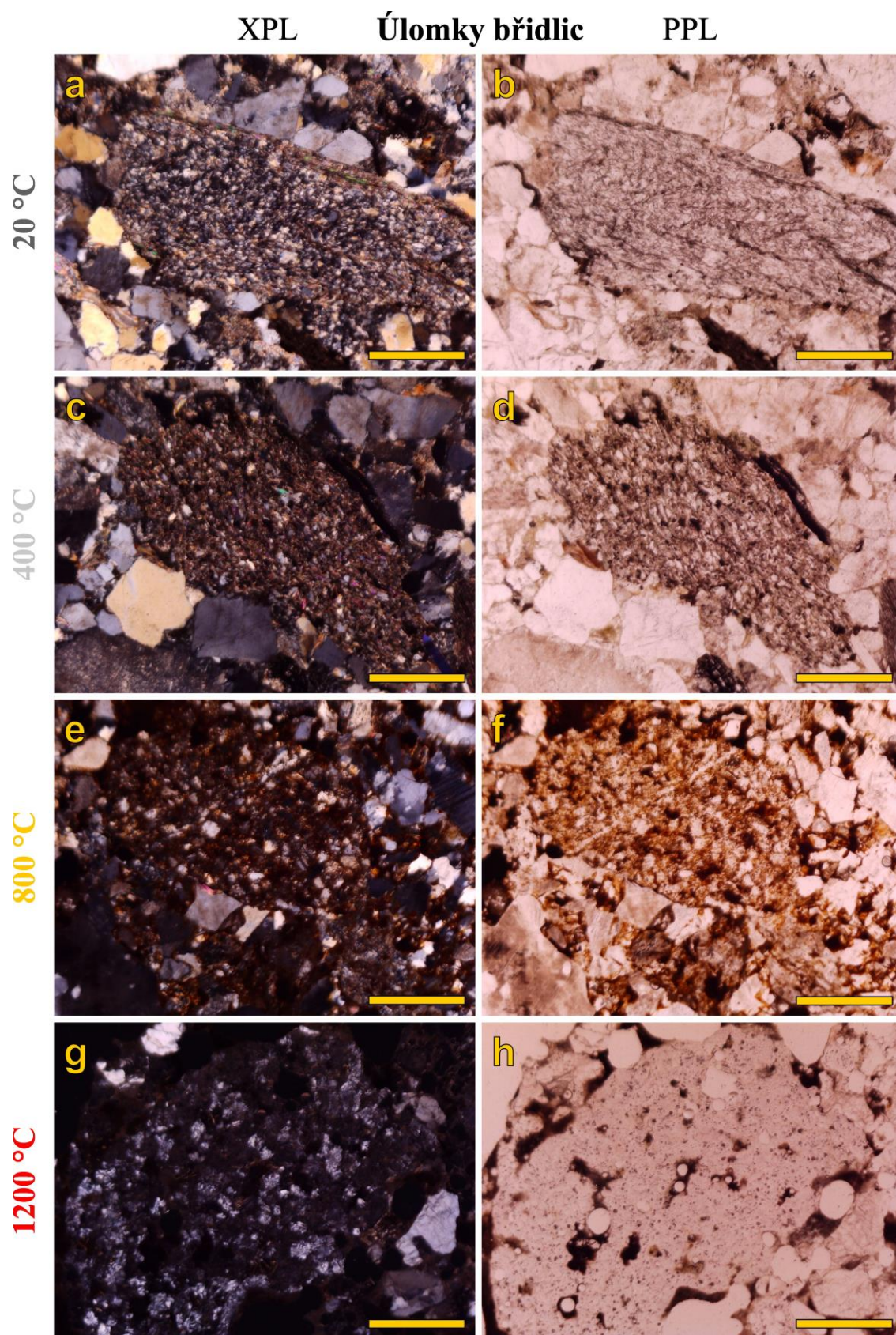


Obr. 6-16: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna muskovitu, pořizeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm



Obr. 6-17: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna biotitu pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm





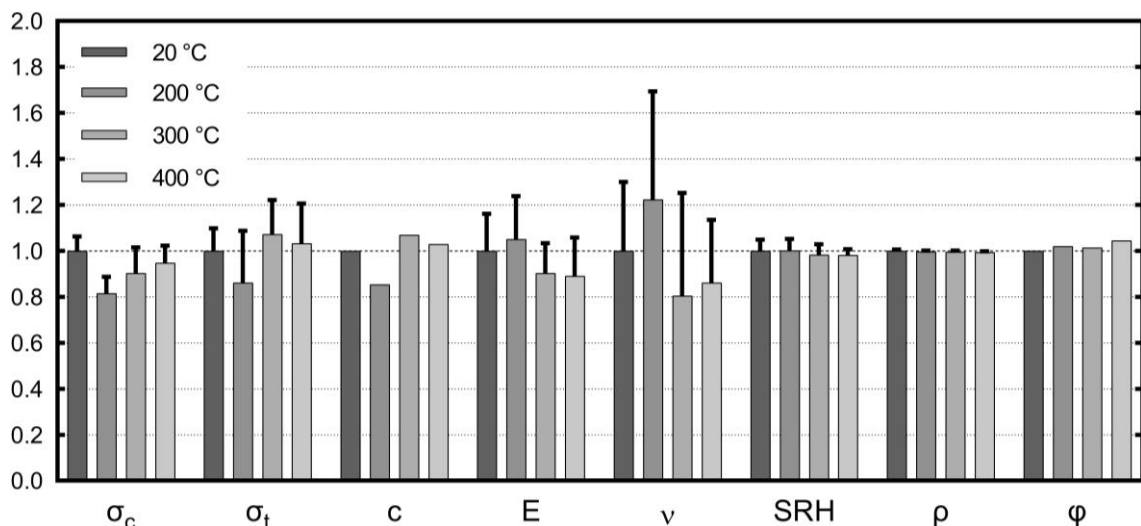
Obr. 6-18: Snímky horninových výbrusů zachycující úlomky jílovitých břidlic, pořizeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm

## 7 SHRNU TÍ A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Výsledky laboratorních zkoušek byly shrnuty v Tab. 7-1 a Tab. 7-2, pro oba typy drob odděleně, uvedením průměrné hodnoty parametru, směrodatné odchylky a počtu hodnot pro danou teplotu výpalu. Pro znázornění trendů v závislosti na rostoucí teplotě výpalu a souvislosti mezi těmito parametry byly výsledky také tzv. normalizovány (tzn. vyděleny průměrnou hodnotou parametru pro nevypálenou drobu), viz Obr. 7-1 a Obr. 7-2.

Tab. 7-1: Shrnutí stanovených parametrů jemnozrné droby

	20 °C	200 °C	300 °C	400 °C
<b>SRH [%]</b>	53,29 ± 2,63 (n = 8)	53,42 ± 2,65 (n = 6)	52,37 ± 2,50 (n = 7)	52,33 ± 1,40 (n = 8)
<b>ρ [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2667 ± 15 (n = 8)	2660 ± 13 (n = 8)	2654 ± 15 (n = 8)	2650 ± 13 (n = 8)
<b>σ<sub>c</sub> [MPa]</b>	146,7 ± 9,2 (n = 5)	119,6 ± 10,7 (n = 4)	132,5 ± 16,5 (n = 5)	139,1 ± 10,9 (n = 5)
<b>E [GPa]</b>	52,91 ± 8,57 (n = 5)	55,62 ± 9,91 (n = 4)	47,79 ± 6,90 (n = 4)	47,11 ± 8,85 (n = 5)
<b>ν [-]</b>	0,20 ± 0,06 (n = 5)	0,24 ± 0,09 (n = 4)	0,16 ± 0,09 (n = 4)	0,17 ± 0,05 (n = 5)
<b>σ<sub>t</sub> [MPa]</b>	13,79 ± 1,35 (n = 6)	11,87 ± 3,12 (n = 6)	14,78 ± 2,06 (n = 6)	14,24 ± 2,40 (n = 6)
<b>c [MPa]</b>	26,50	22,60	28,33	27,27
<b>φ [°]</b>	50,3	51,3	51,0	52,6



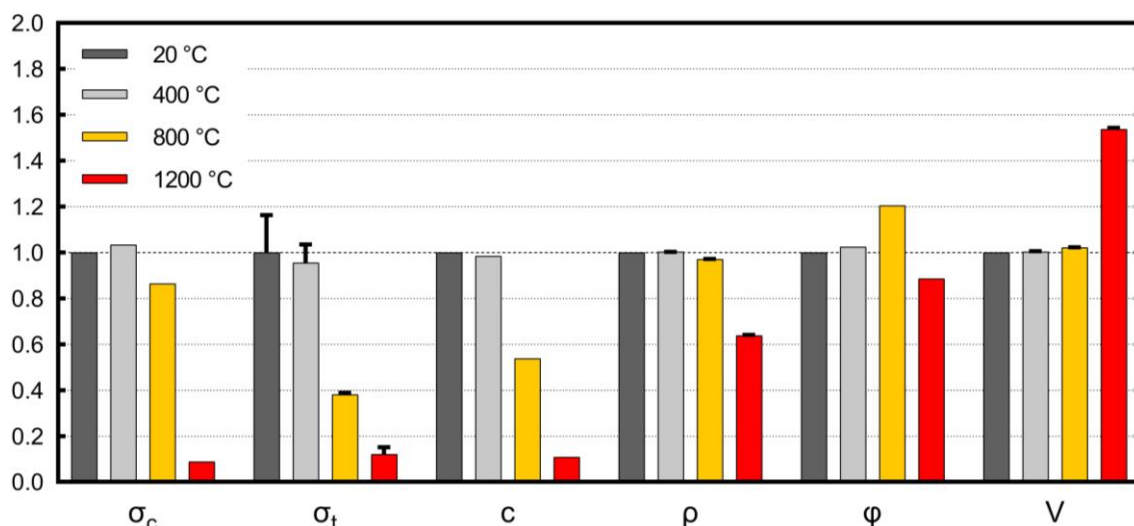
Obr. 7-1: Statistické vyhodnocení normalizovaných hodnot parametrů jemnozrné droby v závislosti na teplotě výpalu

Tab. 7-2: Shrnutí stanovených parametrů hrubozrnné droby

	20 °C	400 °C	800 °C	1200 °C
V [%]	100	100,33 ± 0,28 (n = 2)	102,07 ± 0,30 (n = 2)	153,81 ± 0,61 (n = 2)
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2655 (n = 1)	2662 ± 4 (n = 2)	2575 ± 7 (n = 2)	1693 ± 10 (n = 2)
$\sigma_c$ [MPa]	191,0**	197,5 (n = 1)	165,3 (n = 1)	17,0 (n = 1)
$\sigma_t$ [MPa]	12,76 ± 2,07 (n = 2)	12,19 ± 1,03 (n = 2)	4,87 ± 0,10 (n = 2)	1,54 ± 0,39 (n = 2)
$c^*$ [MPa]	27,60	27,18	14,86	3,00
$\phi^*$ [°]	57,8	59,2	69,6	51,2

\* tyto parametry slouží díky absenci triaxiálních zkoušek jen jako orientační

\*\* označená hodnota byla převzata z [37]



Obr. 7-2: Statistické vyhodnocení normalizovaných hodnot parametrů hrubozrnné droby v závislosti na teplotě výpalu

## 7.1 Chování droby při teplotách výpalu do 400 °C

Analýza trendů vlastností jemnozrnné droby v závislosti na teplotě výpalu poukázala na relativně významnou reakci této droby na teplotu 200 °C. Při této teplotě výpalu dochází ke kombinaci poklesu hodnot prosté tlakové a příčné tahové pevnosti se zvýšením hodnot modulu pružnosti a Poissonova čísla (viz Obr. 7-1). Při teplotách výpalu 300 a 400 °C hodnoty obou pevností rostou přibližně na úroveň původní hodnoty, u modulu pružnosti a Poissonova čísla dochází naopak k poklesu pod úroveň původní hodnoty. Koheze sleduje trend příčné tahové pevnosti (viz Obr. 7-1), což by mohlo souviset s faktem, že Mohrova kružnice pro Brazílskou zkoušku prochází oblastí s nulovým normálovým

napětím, kde se odečítá hodnota koheze (viz Obr. 3-6). Úhel vnitřního tření s teplotou výpalu až do 400 °C mírně roste (viz Obr. 7-1).

Vlastnosti droby jsou významně ovlivněny komplexními metamorfními procesy, reprezentovanými historií působení teplot a tlaků. U drob Dražanské vrchoviny bylo realizováno několik studií s cílem stanovit průběh tzv. paleoteploť. Pomocí teplotních modelů, založených na stanovení indexu krystalinity illitu a odrazivosti vitrinitu, bylo zjištěno, že nadloží v okolí studované lokality dosahovalo v období namuru mocnosti přibližně 4,6 km, s odpovídající maximální paleoteploťou přes 200 °C (dle [63] a [69]). V místních drobách byl také doložen výskyt autigenního monazitu, který vznikl při teplotách v rozsahu 200 až 300 °C [67]. Z výsledků těchto studií vyplývá, že studované klastické horniny teploty 200 °C v minulosti dosáhly. Je tedy možné uvažovat, zdali tyto náhlé změny v trendu parametrů droby nesouvisí s jejím opakovaným vystavením této teplotě.

Při teplotě nad 200 °C ale také dochází k uvolňování pevně vázané vody [27]. Tmel v kulmských drobách obsahuje jílové minerály, které jsou citlivé na změny vlhkosti, což může mít na pevnost těchto drob dvojí efekt [15]. Ztráta vlhkosti může způsobit kolaps struktury jílu a následný vznik vad způsobený vlivem smršťování [70]. Na druhou stranu, jílové minerály v průběhu dehydratace tvrdnou a tření mezi zrny minerálů roste, což může naopak přispět k zpětnému zvýšení pevnosti droby při teplotách výpalu nad 200 °C.

Parametry jemnozrnné droby vykazují relativně velké odchylky (viz Obr. 7-1), což může být způsobeno použitím různých bloků droby při výrobě zkušebních těles, z nichž každý může mít mírně odlišné vlastnosti. Tělesa s puklinami, zmíněná v příslušných sekcích (viz Obr. 6-3 a Obr. 6-6) vykazují nižší, ale nepřilíš rozdílné hodnoty pevností oproti ostatním hodnotám. Pukliny ale ve všech třech případech neoslabují tělesa přímo ve směru porušení.

## **7.2 Degradace vlastností droby působením vysokých teplot**

Do teploty výpalu 400 °C nebyly u testovaných těles sledovány žádné objemové změny, u objemové hmotnosti došlo pouze k mírnému poklesu, který odpovídá postupnému uvolňování vázané a krystalické vody.

Dle literatury začíná po překročení 400 °C docházet k vzniku mikrotrhlin uvnitř minerálních zrn [15] a po 475 °C také k dehydroxylaci slíd, illitu a chloritu [23]. Významná je také  $\alpha$ - $\beta$  transformace křemene probíhající při teplotách nad 573 °C, která

je spojená s objemovými změnami [29]. Kombinace těchto faktorů způsobila mírný nárůst objemu zkušebních těles vypálených na 800 °C, spojený s poklesem objemové hmotnosti (viz Obr. 7-2). Zmíněné změny ve struktuře se také projeví na pevnosti studované droby. U tlakové pevnosti není pokles příliš významný, testovaná hrubozrnná droba stále spadá do kategorie R1. U tahové pevnosti je pokles po výpalu výrazný, téměř až na třetinu původní hodnoty. Jelikož orientační hodnoty koheze a úhlu vnitřního tření byly stanoveny jen s použitím těchto dvou pevností, tento nepoměr v trendech způsobil náhlé zvětšení orientačního úhlu vnitřního tření (viz Obr. 7-2). Trend koheze reflektuje vývoj obou pevností, odpovídá přibližně jejich průměru (viz Obr. 7-2).

Při výpalu nad 800 °C dochází k postupnému rozkladu krystalických mřížek jílových minerálů a muskovitu [28]. Po překročení 1100 °C už dochází k jejich částečnému nebo plnému tavení spojeném s uvolněním strukturně vázaných volatilních složek (OH, F, Cl) v podobě plynné fáze [30]. Plyny se také uvolňují při rozkladu uhličitánů [30], které byly ve studované drobě prokázány v podobě karbonatizace živců (viz Obr. 6-15e). Strukturní změny u těles vypálených na 1200 °C reflektují zmíněné jevy. Jelikož byly vzorky při výpalu zahřívány zvenčí, povrchová vrstva byly vypálena dříve, než došlo k dostatečnému prohřátí jádra tělesa. Plyny uvolňující se v jádře způsobily vznik systému pórů a následný výrazný nárůst objemu pak zapříčinil tahové porušení křehké povrchové vrstvy (viz Obr. 5-3). Podobné objemové změny byly prokázány i u pískovce [71]. Výsledkem těchto jevů je výrazně nižší objemová hmotnost, silně redukováná tlaková pevnost a téměř zanedbatelná tahová pevnost (viz Obr. 7-2). Orientační úhel vnitřního tření vlivem výraznějšího poklesu tlakové pevnosti klesá pod původní hodnotu.

### **7.3 Srovnání studovaných typů drob**

Oba studované typy drob (tzn. jemnozrnná i hrubozrnná) vykazují jisté podobnosti v nevypáleném stavu, co se týče objemové hmotnosti (Obr. 6-2) nebo tahové pevnosti (Obr. 6-6). Hrubozrnná droba ale vykazuje o asi 40 MPa vyšší tlakovou pevnost, což zároveň koresponduje s vyšším úhlem vnitřního tření, pravděpodobně způsobeným výskytem větších klastických částic.

## **7.4 Poznámky k výpalu těles a pokračování výzkumu**

### **7.4.1 Objemové změny těles při výpalu**

Jak bylo popsáno v této diplomové práci, od určité teploty výpalu dochází k nárůstu objemu zkušebních těles z droby vlivem strukturních změn horninové hmoty. U běžných laboratorních testů mechaniky horniny tento jev nemá vliv na realizovatelnost zkoušky. Výjimku ale tvoří triaxiální tlaková zkoušky prováděná v Hoekově buňce, u které je nutné dodržet průměr horninového tělesa. U teplot výpalu nad 400 °C (v této diplomové práci nebyla stanovena přesná hraniční teplota) by bylo nutné změnit metodiku výroby a výpalu těles. Řešením by například mohl být výpal menšího bloku, ze kterého by následně bylo odvráceno těleso o přesném průměru odpovídajícím Hoekově buňce. Bylo by ale nutné stanovit vhodnou dobu prohřívání horninového bloku, aby došlo k adekvátnímu působení zamýšlené teploty i uvnitř bloku.

### **7.4.2 Vhodná doba prohřívání**

Důležitým faktorem v termomechanické studii hornin je doba prohřívání těles, která se v rámci citované literatury značně liší. Vhodnost zvolené doby výpalu je možné u studované droby posoudit na tělesech vypálených na 800 °C. U těchto těles totiž došlo ke vzniku rezavě zbarvených oxidů železa, které slouží jako jednoduchý vizuální indikátor. Z Obr. 5-3 je patrné, že těleso nebylo prohříváno dostatečně dlouho na to, aby bylo v jádře dosaženo stejné teploty, jako na povrchu. Pro tělesa o průměru přibližně 45 mm tedy není zvolená doba prohřívání (60 minut) dostatečná. Fakt, že i po výpalu na 1200 °C byla ve studovaném vzorku droby nalezena zrna muskovitu i biotitu, která by již měla být podle citované literatury rozložena, poukazuje na nedostatečnou dobu prohřívání. Bylo by vhodné v budoucnu realizovat studii zaměřenou na stanovení nutné minimální doby prohřívání tělesa.

## 8 ZÁVĚR

V rámci této práce autor studoval vliv teploty výpalu na vlastnosti spodnokarbonské droby odebrané v lomu Koberice, reprezentované jemnozrnnými a hrubozrnnými vzorky. Získané poznatky mohou posloužit při posouzení účinku požárů a zvýšených teplot na konstrukce či masivy z této horniny.

V úvodních kapitolách diplomové práce je stručně popsána problematika termomechaniky hornin. V následujících kapitolách jsou sepsány teoretické poznatky k použitým laboratorním zkouškám a geologický kontext Dražanské vrchoviny a lomu Koberice, odkud pochází odebrané vzorky droby.

V praktické části je pak popsána konkrétní použitá metodika spolu s výsledky této studie a jejich interpretací. Při zpracování diplomové práce byly také dokumentovány potenciální problémy, které by bylo nutné překonat v rámci případného navazujícího výzkumu. Všechny stanovené cíle byly splněny v plánovaném rozsahu. Z poznatků uvedených v této diplomové práci autor vyvodil následující závěry:

- 1) Testovaná droba reaguje na teplotu 200 °C snížením tlakové i tahové pevnosti v kombinaci s nárůstem hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla. Teplota 200 °C také odpovídá přibližné maximální paleoteplotě, při které se tato droba formovala. Právě opětovné vystavení této teplotě by mohlo vysvětlit popsanou reakci. Při výpalu na 300, respektive 400 °C se pevnosti vracejí přibližně na původní úroveň, zatímco hodnoty obou deformačních charakteristik klesají pod počáteční hodnoty. Celkové chování droby až do výpalu na 400 °C by také mohlo být ovlivněno strukturními změnami jílových minerálů přítomných v tmelu v kombinaci s uvolňováním vázané vody.
- 2) Výpal na 800 °C zapříčinil u studované droby výrazný pokles tahové pevnosti při zachování relativně vysoké tlakové pevnosti. Tento jev způsobil náhlé zvětšení orientačního úhlu vnitřního tření. Při této teplotě už také dochází k nepatrnému nárůstu objemu těles.
- 3) Zahřátím na 1200 °C dochází k částečnému natavení a značné alteraci struktury zkoumané droby, což vede k výraznému růstu objemu zkušebních těles. Vypálený materiál vykazuje oproti původní drobě jen zanedbatelné hodnoty tlakové i tahové pevnosti.

- 4) Studovaná jemnozrnná droba vykazuje značné odchylky u deformačních charakteristik nezávisle na teplotě výpalu, což může být způsobeno variabilitou odebraných bloků.
- 5) Oba testované typy droby jsou charakteristické podobnou tahovou pevností, významně se ale liší v tlakové pevnosti. Toto je možné vysvětlit vyšším orientačním úhlem vnitřního tření u hrubozrnné droby.
- 6) Z makroskopické a petrografické analýzy struktury a složení průřezu vypálených zkušebních těles z droby vyplývá, že prohřívání tělesa o průměru 45 mm po dobu 60 minut není dostačující.
- 7) Pro orientační sledování vlivu teploty výpalu na parametry smykové pevnosti je možné použít kombinaci prosté tlakové a nepřímé tahové zkoušky. Platnost takto stanovených hodnot koheze a úhlu vnitřního tření je ale nutné ověřit dodatečnou realizací triaxiálních tlakových zkoušek.
- 8) Vzhledem k výraznému poklesu tahové pevnosti při výpalu na 800 °C je nutné poukázat na riziko vzniku poruch v tahem namáhaných zónách u konstrukcí či masivů z této droby v případě vypuknutí požáru.



## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KRMÍČEK, L. *Rozvoj a perspektivy geotechnické vědní disciplíny „Mechanika hornin“ na VUT v Brně: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Konstrukce a dopravní stavby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2021. ISBN 978-80-214-5949-6.
- [2] AUTORSKÝ KOLEKTIV. *Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR*. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES, 2006. [https://www.ita-aites.cz/files/edice\\_CTuK/ctuk\\_02.pdf](https://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_02.pdf)
- [3] GAUTAM, P. K., A. K. VERMA, S. MAHESHWAR a T. N. SINGH. Thermomechanical Analysis of Different Types of Sandstone at Elevated Temperature. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(5), 1985–1993. <http://doi.org/10.1007/s00603-015-0797-8>
- [4] GUIBAUD, A., J. C. MINDEGUIA, A. ALBUERNE, T. PARENT a J. TORERO. Notre-Dame de Paris as a validation case to improve fire safety modelling in historic buildings. *Journal of Cultural Heritage* (revidovaný článek v tisku), 2023. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.008>
- [5] KIM, S., J. SHIM, J. Y. RHEE, D. JUNG a C. PARK. Temperature Distribution Characteristics of Concrete during Fire Occurrence in a Tunnel. *Applied Sciences*, 2019, **9**(22), 4740. <http://doi.org/10.3390/app9224740>
- [6] MISKOVSKY, K. a C. SAIANG. Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types – a laboratory study. In: Q. QIAN a Y. ZHOU (eds), *Harmonising Rock Engineering and the Environment*. London: CRC Press, 2011, 815–820. <http://doi.org/10.1201/b11646-149>
- [7] SHAO, S., P. G. RANJITH, P. L. P. WASANTHA a B. K. CHEN. Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy. *Geothermics*, 2015, **54**, 96–108. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.11.005>
- [8] GIBB, F. G. F. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? *Waste Management*, 1999, **19**(3), 207–211. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00050-1)
- [9] FREIESLEBEN, H. Final disposal of radioactive waste. *EPJ Web of Conferences*, 2013, **54**, 01006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135401006>
- [10] PAN, S. Y., M. GAO, K. J. SHAH, J. ZHENG, S. L. PEI a P. C. CHIANG. Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies. *Renewable Energy*, 2019, **132**, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.126>

- [11] OLASOLO, P., M. C. JUÁREZ, M. P. MORALES, S. D'AMICO a I. A. LIARTE. Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **56**, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>
- [12] MYSLIL, V., J. BURDA, J. ČTYROKÁ, J. DRÁBKOVÁ, K. POŠMOURNÝ, Z. TÁBORSKÝ a V. ŽÁČEK. První hlubinný geotermální vrt v Českém masivu. *Zprávy o geologických výzkumech*, 2007, 228–231. ISSN 0514-8057.
- [13] DIPIPO, R. Geothermal Power Plants. In: A. SAYIGH (eds), *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, 2012, 209–239. ISBN 978-0-08-087873-7.
- [14] PEKSEN, M. Chapter 6: Thermomechanical Modelling of Materials and Components. In: M. PEKSEN, *Multiphysics Modelling*. Elsevier, 2018, 161–180. ISBN 978-0-12-811824-5.
- [15] WONG, L. N. Y., Y. ZHANG a Z. WU. Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range? *Engineering Geology*, 2020, **272**, 105619. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105619>
- [16] ZHU, Z., H. TIAN, G. MEI, G. JIANG, B. DOU a P. XIAO. Experimental investigation on mechanical behaviors of Nanán granite after thermal treatment under conventional triaxial compression. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(2), 46. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09326-3>
- [17] OZGUVEN, A. a Y. OZCELIK. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. *Engineering Geology*, 2014, **183**, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.006>
- [18] TOMÁS, R., M. CANO, L. F. PULGARÍN, V. BROTONS, D. BENAVENTE, T. MIRANDA a G. VASCONCELOS. Thermal effect of high temperatures on the physical and mechanical properties of a granite used in UNESCO World Heritage sites in north Portugal. *Journal of Building Engineering*, 2021, **43**, 102823. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102823>
- [19] GARRIDO, M. E., F. B. PETNGA, V. MARTÍNEZ-IBÁÑEZ, J. B. SERÓN, C. HIDALGO-SIGNES a R. TOMÁS. Predicting the Uniaxial Compressive Strength of a Limestone Exposed to High Temperatures by Point Load and Leeb Rebound Hardness Testing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, **55**(1), 1–17. <http://doi.org/10.1007/s00603-021-02647-0>
- [20] BROTONS, V., R. TOMÁS, S. IVORRA a J. C. ALARCÓN. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology*, 2013, **167**, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.012>

- [21] YANG, S. Q., P. G. RANJITH, H. W. JING, W. L. TIAN a Y. JU. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics*, 2017, **65**, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.09.008>
- [22] ZHU, Z., T. KEMPKA, P. G. RANJITH, H. TIAN, G. JIANG, B. DOU a G. MEI. Changes in thermomechanical properties due to air and water cooling of hot dry granite rocks under unconfined compression. *Renewable Energy*, 2021, **170**, 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.019>
- [23] HANDZELOVÁ, B., P. MARTINEC, J. ŠČUČKA a H. VIČAROVÁ. Vliv tepelného namáhání na interakci moravské droby s vodou. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*, 2013. <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/101698>
- [24] ASTM E831-19: Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis. ASTM International, 2019. <https://doi.org/10.1520/E0831-19>
- [25] YAVUZ, H., S. DEMIRDAG a S. CARAN. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, **47**(1), 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.09.014>
- [26] WEIGLOVÁ, K. *Mechanika zemin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [27] ZHANG, W., Q. SUN, S. HAO, J. GENG a C. LV. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **98**, 1297–1304. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.010>
- [28] LIU, X., S. YUAN, Y. SIEFFERT, S. FITYUS a O. BUZZI. Changes in Mineralogy, Microstructure, Compressive Strength and Intrinsic Permeability of Two Sedimentary Rocks Subjected to High-Temperature Heating. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(8), 2985–2998. <http://doi.org/10.1007/s00603-016-0950-z>
- [29] RINGDALEN, E. Changes in Quartz During Heating and the Possible Effects on Si Production. *JOM*, 2015, **67**, 484–492. <http://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
- [30] CULTRONE, G., E. SEBASTIÁN, K. ELERT, M. J. DE LA TORRE, O. CAZALLA a C. RODRIGUEZ-NAVARRO. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, **24**(3), 547–564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8)

- [31] HORÁK, V. *Mechanika hornin: modul BF05-M01 - Laboratoř mechaniky hornin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [32] HOEK, E. a E. T. BROWN. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, **11**(3), 445–463. <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- [33] KOMURLU, E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *International Journal of Geo-Engineering*, 2018, **9**(1), 17. <http://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
- [34] ČSN EN 1997-2: *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2008.
- [35] FAIRHURST, C. E. a J. A. HUDSON. Draft ISRM Suggested Method for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(3), 281–289.
- [36] ASTM D7012-14: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. In: *Annual Book of ASTM Standards (04.09)*. Philadelphia: ASTM International, 2014. <http://doi.org/10.1520/D7012-14>
- [37] ZÁVACKÝ, M. *Korelace parametrů vybraných typů hornin na základě laboratorních zkoušek*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2021. <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/201664>
- [38] ČSN 73 6133: *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2010.
- [39] ZHAO, X. G. a M. CAI. A mobilized dilation angle model for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, **47**(3), 368–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.12.007>
- [40] BRABEC, M. *Studium pevnostních charakteristik granitoidních hornin moldanubického plutonu ve vztahu k plánovanému hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2022. <https://dspace.vut.cz/items/62f2d44f-c2e1-4547-ac80-ddac1a776564>
- [41] WAWERSIK, W. R. a C. FAIRHURST. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1970, **7**(5), 561–575. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90007-0)

- [42] DURMEKOVÁ, T., P. WAGNER a J. FRANKOVSKÁ. *Vlastnosti hornin a ich stanovenie v laboratóriu - I. Skálne horniny*. Bratislava: Univerzita Komenského, 2013. ISBN 978-80-223-3330-6.
- [43] ČSN EN 14580: Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení statického modulu pružnosti. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2005.
- [44] LANGFORD, J. C. a M. A. PERRAS. Obtaining Reliable Estimates of Intact Tensile Strength. In: *48th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. 2014.
- [45] BIENIAWSKI, Z. T. a I. HAWKES. ISRM Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, **15**(3), 99–103. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90003-7](http://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90003-7)
- [46] ASTM D3967-16: Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. In: *Annual Book of ASTM Standards (04.08)*. Philadelphia: ASTM International, 2016. <http://doi.org/10.1520/D3967-16>
- [47] LIU, Y., F. DAI, N. XU a T. ZHAO. Cyclic flattened Brazilian disc tests for measuring the tensile fatigue properties of brittle rocks. *Review of Scientific Instruments*, 2017, **88**(8), 083902. <http://doi.org/10.1063/1.4995656>
- [48] LELOVIC, Selimir a Dejan VASOVIC. Determination of Mohr-Coulomb Parameters for Modelling of Concrete. Crystals [online]. 2020, **10**(9), 808. ISSN 2073-4352. Dostupné z: [doi:10.3390/cryst10090808](https://doi.org/10.3390/cryst10090808)
- [49] KOVÁRI, K., A. TISA, H. EINSTEIN a J. FRANKLIN. ISRM Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, **20**(6), 285–290. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90598-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90598-3)
- [50] HOEK, E. a J. A. FRANKLIN. A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining technology*. 1968, **77**, A22-26.
- [51] HOEK, E. a E. T. BROWN. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1980, **106**(9), 1013–1035. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>
- [52] RAFIEI RENANI, H. a C. D. MARTIN. Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, **106**, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.04.003>

- [53] BASU, A. a A. AYDIN. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, **41**(7), 1211–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.05.001>
- [54] PŘIKRYL, R. a P. SNÍŽEK. Critical assessment of the “non-destructiveness” of Schmidt hammer test on monumental sandstones: A microscopic and microstructural approach. *Journal of Cultural Heritage*, 2023, **59**, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.12.011>
- [55] AYDIN, A. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, **46**, 627–634. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.020>
- [56] ASTM D5873-14: Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. In: *Annual Book of ASTM Standards (04.08)*. Philadelphia: ASTM International, 2014.
- [57] KATZ, O., Z. RECHES a J.-C. ROEGIERS. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(4), 723–728. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00004-6](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00004-6)
- [58] WANG, H., H. LIN a P. CAO. Correlation of UCS Rating with Schmidt Hammer Surface Hardness for Rock Mass Classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(1), 195–203. <http://doi.org/10.1007/s00603-016-1044-7>
- [59] PETRÁNEK, J. a J. CHÁB. *Encyklopedie geologie*. Vyd. 1. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.
- [60] MACKENZIE, W. S., A. E. ADAMS a K. H. BRODIE. *Rocks and minerals in thin section*. Revised 2nd ed. Boca Raton: CRC press, 2017. ISBN 978-1-315-11636-5.
- [61] DVOŘÁK, J. Synsedimentary tectonics of the Palaeozoic of the Drahany Upland (Sudeticum, Moravia, Czechoslovakia). *Tectonophysics*, 1973, **17**(4), 359–391. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(73\)90126-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(73)90126-1)
- [62] HARTLEY, A. J. a J. OTAVA. Sediment provenance and dispersal in a deep marine foreland basin: the Lower Carboniferous Culm Basin, Czech Republic. *Journal of the Geological Society*, 2001, **158**(1), 137–150. <https://doi.org/10.1144/jgs.158.1.137>
- [63] FRANCU, E., F. FRANCU, J. KALVODA, H. S. POELCHAU a J. OTAVA. Burial and uplift history of the Palaeozoic Flysch in the Variscan foreland basin (SE Bohemian Massif, Czech Republic). *Stephan Mueller Special Publication Series*, 2002, **1**, 167–179. <http://doi.org/10.5194/smsps-1-167-2002>

- [64] Geologická mapa 1 : 50 000. Praha: Česká geologická služba [cit. 2023-07-06] <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- [65] KUMPERA O. a P. MARTINEC. The development of the Carboniferous accretionary wedge in the Moravian-Silesian Paleozoic Basin. *Journal of Geosciences*, 1995, **40**(1–2), 47–64. ISSN 1802-6222, 1803-1943.
- [66] HAVLÍČKOVÁ, D., M. ZÁVACKÝ a L. KRMÍČEK. Anisotropy of mechanical properties of greywacke. *GeoScience Engineering*, 2019, **65**(1). <http://doi.org/10.35180/gse-2019-0005>
- [67] ČOPJAKOVÁ, R., M. NOVÁK a E. FRANČŮ. Formation of authigenic monazite-(Ce) to monazite-(Nd) from Upper Carboniferous graywackes of the Drahany Upland: Roles of the chemical composition of host rock and burial temperature. *Lithos*, 2011, **127**(1–2), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.001>
- [68] ZÁVACKÝ, M., T. MAJDA, I. ROZSYPALOVÁ aj. ŠTEFAŇÁK. Moravian greywacke – evaluation of fracture, strength and deformability properties. *E3S Web of Conferences*, 2019, **133**, 02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913302003>
- [69] FRANČŮ, E., J. FRANČŮ a J. KALVODA. Illite crystalinity and vitrinite reflectance in Paleozoic siliciclastics in the Bohemian Massif as evidence of thermal history. *Geologica Carpathica*, 1999, **50**(5), 65–71. ISSN 1335-0552.
- [70] HAJPÁL, M. a Á. TÖRÖK. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology*, 2004, **46**(3–4) <http://doi.org/10.1007/s00254-004-1034-z>
- [71] WU, G., Y. WANG, G. SWIFT a J. CHEN. Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, **31**(2), 809–816. <http://doi.org/10.1007/s10706-013-9614-x>

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1: Teplotní profily stanovené na vrtných jádrech odebraných z klenby katedrály Notre-Dame po požáru v roce 2019, převzato z [4] .....	13
Obr. 2-2: Průběh teplot v ostění tunelu v závislosti na hloubce, převzato z [5] .....	13
Obr. 2-3: Srovnání konvenčního úložiště a tzv. hlubokého vrtu, převzato z [9] .....	14
Obr. 2-4: Koncept vylepšeného geotermálního systému, převzato z [13] .....	15
Obr. 3-1: Princip prosté tlakové zkoušky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro prostou tlakovou pevnost v prostoru $\sigma$ - $\tau$ dle [31] (vpravo), $\sigma_c$ – stanovená pevnost .....	18
Obr. 3-2: Záznam měření deformací zkušebního tělesa z granitu typu Čeřínek při prosté tlakové zkoušce, fáze dle [39], naměřeno v rámci autorovy bakalářské práce [40] .....	19
Obr. 3-3: Postup zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení statického modulu pružnosti dle ČSN EN 14580 [43], deformace pro výpočet modulu (případně Poissonova čísla) jsou odečteny v bodech A a B .....	20
Obr. 3-4: Princip Brazílské nepřímé tahové zkoušky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro Brazílskou nepřímou tahovou pevnost v prostoru $\sigma$ - $\tau$ dle [48] (vpravo), $\sigma_t$ – stanovená pevnost .....	22
Obr. 3-5: Princip Hoekovy buňky (vlevo) a vykreslení Mohrovy kružnice pro triaxiální tlakovou pevnost v prostoru $\sigma$ - $\tau$ dle [31] (vpravo), $\sigma_1$ – osové napětí vyvolané lisem, $\sigma_3$ – komorové napětí vyvolané hydraulickým olejem (červená) .....	23
Obr. 3-6: Běžná konfigurace laboratorních zkoušek pro stanovení Mohr-Coulombovy podmínky porušení s omezenou tahovou pevností v prostoru $\sigma$ - $\tau$ , BITT – zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilian indirect tensile test), UCT – zkouška pevnosti v prostém tlaku (uniaxial compressive test), CTT – „nepravá“ triaxiální zkouška (conventional triaxial test), $c$ – koheze, $\varphi$ – úhel vnitřního tření .....	24
Obr. 3-7: Zobrazení M-C podmínky porušení v prostoru $\sigma_3$ - $\sigma_1$ doplněné o přepočty výsledků laboratorních zkoušek, odvozené z Mohrových kružnic, BITT – zkouška pevnosti v příčném tahu (Brazilian indirect tensile test), UCT – zkouška pevnosti v prostém tlaku (uniaxial compressive test), CTT – „nepravá“ triaxiální zkouška (conventional triaxial test) .....	24



Obr. 4-1: Geologické schéma Drahanské vrchoviny a lomu Koberžice, podklady pro vytvoření mapy převzaty z databáze České geologické služby [64] .....	27
Obr. 4-2: Lom Koberžice: A – pohled na jihozápadní stěnu, B – pohled na jižní stěnu, ukazující blokovou odlučnost horniny, C – pohled na západní stěnu, kde je znatelné zvrásnění místního masivu.....	28
Obr. 4-3: Variabilita velikosti zrn místních hornin: A – jemnozrná droba, B – slepenec (lokálně extrémní případ obsahující velké úlomky jílovitých břidlic) .....	29
Obr. 5-1: Sada těles vyrobená z jemnozrné droby.....	30
Obr. 5-2: Idealizované křivky výpalu zkušebních těles.....	32
Obr. 5-3: Sada těles z hrubozrné droby po výpalu: nahoře - tělesa určená pro prostou tlakovou zkoušku, dole – nařezaná tělesa určená pro Brazílskou zkoušku .....	32
Obr. 5-4: Schéma použité metodiky pro stanovení Schmidovy odrazové tvrdosti .....	33
Obr. 6-1: Závislost objemu tělesa na teplotě výpalu .....	35
Obr. 6-2: Závislost objemové hmotnosti tělesa na teplotě výpalu.....	36
Obr. 6-3: Závislost prosté tlakové pevnosti na teplotě výpalu: hodnoty stanovené na tělesech s puklinami označeny světle šedým okrajem, vyřazená hodnota pevnosti označena křížkem, pevnostní třídy hornin dle ČSN 73 6133 [38].....	37
Obr. 6-4: Závislost statického modulu pružnosti na teplotě výpalu .....	38
Obr. 6-5: Závislost Poissonova čísla na teplotě výpalu .....	38
Obr. 6-6: Závislost nepřímé tahové pevnosti na teplotě výpalu: hodnota stanovená na tělese s puklinou označena světle šedým okrajem.....	39
Obr. 6-7: Tělesa porušená v příčném tahu .....	40
Obr. 6-8: Zobrazení výsledků destruktivních zkoušek v prostoru $\sigma_3$ - $\sigma_1$ .....	41
Obr. 6-9: Závislost koheze a úhlu vnitřního tření na teplotě výpalu .....	41
Obr. 6-10: Závislost Schmidovy odrazové tvrdosti na teplotě výpalu .....	42
Obr. 6-11: Závislost hodnot RGB složek na teplotě výpalu, pro jednotlivé teploty je také přiložen analyzovaný výřez z fotografie povrchu a odpovídající zprůměrovaná barva .	43

Obr. 6-12: Fotografie leštěných průřezů zkušebních těles z hrubozrnné droby po výpalu .....	43
Obr. 6-13: Fotografie horninových výbrusů .....	44
Obr. 6-14: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna křemene, pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm.....	45
Obr. 6-15: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna živce (plagioklasu), pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm.....	46
Obr. 6-16: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna muskovitu, pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm.....	47
Obr. 6-17: Snímky horninových výbrusů zachycující zrna biotitu pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm .....	48
Obr. 6-18: Snímky horninových výbrusů zachycující úlomky jílovitých břidlic, pořízeny polarizačním mikroskopem v režimech PPL a XPL, délka měřítka 0,5 mm.....	49
Obr. 7-1: Statistické vyhodnocení normalizovaných hodnot parametrů jemnozrnné droby v závislosti na teplotě výpalu.....	50
Obr. 7-2: Statistické vyhodnocení normalizovaných hodnot parametrů hrubozrnné droby v závislosti na teplotě výpalu.....	51

## **11 SEZNAM TABULEK**

Tab. 3-1: Výtah pevnostních tříd hornin z ČSN 73 6133 [38] .....	19
Tab. 7-1: Shrnutí stanovených parametrů jemnozrné droby.....	50
Tab. 7-2: Shrnutí stanovených parametrů hrubozrné droby .....	51

## 12 SEZNAM ROVNIC

Rov. 3-1: Definice objemové hmotnosti [31] .....	17
Rov. 3-2: Definice prosté tlakové pevnosti [31] .....	18
Rov. 3-3: Definice poměrného přetvoření [31] .....	19
Rov. 3-4: Definice objemového přetvoření [35] .....	20
Rov. 3-5: Definice modulu pružnosti [43] .....	21
Rov. 3-6: Definice Poissonova čísla [36] .....	21
Rov. 3-7: Definice příčné tahové pevnosti [46] .....	22
Rov. 3-8: Definice (M-C) podmínky porušení v $\sigma$ - $\tau$ [37] .....	24
Rov. 3-9: Výpočet koheze na základě lineární regrese dle Obr. 3-7, odvozeno z rovnice převzaté z [52] .....	25
Rov. 3-10: Výpočet úhlu vnitřního tření na základě lineární regrese dle Obr. 3-7, odvozeno z rovnice převzaté z [52] .....	25

## 13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>BITT</i>	<i>Brazilian indirect tensile test</i>
<i>Bt</i>	biotit ( <i>biotite</i> )
ČSN	Česká technická norma
<i>CTT</i>	<i>conventional triaxial test</i>
<i>EGS</i>	<i>Enhanced geothermal systems</i>
FAST	Fakulta stavební
<i>Fsp</i>	živec ( <i>feldspar</i> )
GTN	Ústav geotechniky
H-B	Hoek-Brownova podmínka porušení
<i>ISRM</i>	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
m n. m.	metrů nad mořem
M-C	Mohr-Coulombova podmínka porušení
<i>Ms</i>	muskovit ( <i>muscovite</i> )
NQ	průměr 47,6 mm
NX	průměr 54,7 mm
<i>PPL</i>	<i>plane-polarised light</i>
<i>Qz</i>	křemen ( <i>quartz</i> )
<i>RGB</i>	<i>red, green, blue</i>
<i>UCT</i>	<i>uniaxial compressive test</i>
VUT	Vysoké učení technické v Brně
<i>XPL</i>	<i>cross-polarized light</i>

## 14 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
a	-	parametr lineární regrese
A	mm <sup>2</sup>	počáteční průřezová plocha zkušebního tělesa
b	-	parametr lineární regrese
c	MPa	koheze ( <i>cohesion</i> )
D	mm	průměr válcového zkušebního tělesa
E	GPa	modul pružnosti ( <i>modulus of elasticity</i> )
F	kN	síla při porušení
l	m	měrná základna
L	mm	délka válcového zkušebního tělesa
L/D	-	štíhlostní poměr ( <i>length-to-diameter ratio</i> )
m	g	hmotnost zkušebního tělesa
SRH	%	Schmidtova odrazová tvrdost ( <i>Schmidt rebound hardness</i> )
UCS	MPa	<i>uniaxial compressive strength</i>
V	mm <sup>3</sup>	objem zkušebního tělesa
$\Delta l$	$\mu\text{m}$	deformace
$\Delta V$	%	objemová změna
$\Delta \varepsilon_a$	$\mu\text{m}/\text{m}$	změna osových přetvoření
$\Delta \varepsilon_r$	$\mu\text{m}/\text{m}$	změna příčných přetvoření
$\Delta \sigma$	MPa	obor zatížení
$\varepsilon$	$\mu\text{m}/\text{m}$	poměrné přetvoření, poměrná deformace
$\varepsilon_a$	$\mu\text{m}/\text{m}$	osové poměrné přetvoření
$\varepsilon_r$	$\mu\text{m}/\text{m}$	příčné poměrné přetvoření
$\varepsilon_v$	$\mu\text{m}/\text{m}$	objemové poměrné přetvoření
$\nu$	-	Poissonovo číslo ( <i>Poisson's ratio</i> )
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	objemová hmotnost ( <i>bulk density</i> )
$\sigma$	MPa	normálové napětí
$\sigma_1$	MPa	osové/hlavní napětí
$\sigma_3$	MPa	komorový tlak/hlavní napětí
$\sigma_c$	MPa	prostá tlaková pevnost
$\sigma_t$	MPa	tahová pevnost
$\tau$	MPa	smykové napětí
$\varphi$	°	úhel vnitřního tření ( <i>internal friction angle</i> )

# 15 SEZNAM PŘÍLOH

## Příloha A: Hrubá data ke grafům

A.1: Data k Obr. 6-1 (Objem zkušebního tělesa po výpalu, v %) .....	1
A.2: Data k Obr. 6-2 (Objemová hmotnost po výpalu, v kg/m <sup>3</sup> ).....	1
A.3: Data k Obr. 6-3 (Prostá tlaková pevnost po výpalu, v MPa) .....	1
A.4: Data k Obr. 6-4 (Statický modul pružnosti po výpalu, v GPa).....	1
A.5: Data k Obr. 6-5 (Poissonovo číslo po výpalu, bez jednotky) .....	2
A.6: Data k Obr. 6-6 (Nepřímá tahová pevnost po výpalu, v MPa) .....	2
A.7: Data k Obr. 6-8 (Výsledky triaxiálních tlakových zkoušek, v MPa).....	2
A.8: Data k Obr. 6-9 (koheze po výpalu, v MPa).....	2
A.9: Data k Obr. 6-9 (úhel vnitřního tření po výpalu, ve stupních).....	2
A.10: Data k Obr. 6-10 (Schmidtova odrazová tvrdost po výpalu, v %).....	3
A.11: Data k Obr. 6-11 (Složky RGB po výpalu) .....	3

## Příloha B: M-C podmínky porušení

B.1: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro jemnozrnnou drobu).....	1
B.2: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro jemnozrnnou drobu, 200 °C).....	1
B.3: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro jemnozrnnou drobu, 300 °C).....	2
B.4: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro jemnozrnnou drobu, 400 °C).....	2
B.5: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro hrubozrnnou drobu).....	3
B.6: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro hrubozrnnou drobu, 400 °C) .....	3
B.7: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro hrubozrnnou drobu, 800 °C) .....	4
B.8: Rozšíření Obr. 6-8 (M-C podmínka porušení pro hrubozrnnou drobu, 1200 °C) ....	4