

Technická zpráva číslo 88/2017

**STANOVENÍ MECHANICKÝCH
VLASTNOSTÍ HLAVNÍCH
PETROGRAFICKÝCH TYPŮ NA
POTENCIÁLNÍCH LOKALITÁCH HÚ**

Autor: Mgr. Matěj Petružálek, PhD.

Geologický ústav AV ČR, v. v. i.

Praha, leden 2017

Název projektu: Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů na potenciálních lokalitách HÚ

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: OV2016-6120, OV2016-6212

Evidenční číslo poskytovatele: 2016-7045

ŘEŠITEL:

Geologický ústav AV ČR, v. v. i.

Autor: Mgr. Matěj Petružálek, PhD.

Schválil				
Funkce	Instituce	Jméno	Datum	Podpis
Osoba poskytovatele zodpovědná za technické řešení	GLÚ AVČR, v.v.i.	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.		
Osoba poskytovatele zodpovědná za koordinaci projektu	GLÚ AVČR, v.v.i.	Mgr. Matěj Petružálek, PhD.		
Vedoucí Laboratoře fyzikálních vlastností hornin	GLÚ AVČR, v.v.i.	Ing. Tomáš Lokajíček, CSc.		
Ředitel GLÚ AV ČR, v. v. i.	GLÚ AVČR, v.v.i.	prof. RNDr. Pavel Bosák, DrSc.		
Osoba objednatele zodpovědná za koordinaci projektu	SÚRAO	Mgr. Jozef Urík		

Obsah

1	Úvod	10
1.1	Dodaný horninový materiál	10
1.2	Požadované laboratorní zkoušky	10
1.3	Příprava zkušebních tělísek	10
2	Fyzikálně popisné vlastnosti	13
3	Ultrazvukové prozařování	14
4	Zkoušky v prostém tlaku	18
5	Triaxiální zkoušky	37
6	Zkoušky v příčném tahu	55
7	Stanovení koeficientu filtrace	66
8	Citace a seznam literatury	76

Seznam obrázků:

Obr. 1	Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači.	14
Obr. 2	Horninový vzorek při jednoosé zkoušce osazený dvěma extenzometry relativní podélné deformace a extenzometrem měřícím relativní příčnou deformaci.	19
Obr. 3	Polární graf znázorňující závislost Youngova modulu na orientaci foliace, biotitická rula z lokality Olkiluoto, Finsko (převzato z Hakala et al., 2007).	19
Obr. 4	Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granodioritu z lokality Březový potok. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	21
Obr. 5	Pracovní diagramy, prostý tlak, granodiorit, Březový potok. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	22
Obr. 6	Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Čertovka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	23
Obr. 7	Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Čertovka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	24

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obr. 8 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Čihadlo. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	25
Obr. 9 Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Čihadlo. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	26
Obr. 10 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na durbachitu z lokality Horka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	27
Obr. 11 Pracovní diagramy, prostý tlak, durbachit, Horka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	28
Obr. 12 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Hrádek. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	29
Obr. 13 Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Hrádek. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	30
Obr. 14 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na migmatitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	31
Obr. 15 Pracovní diagramy, prostý tlak, migmatit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	32
Obr. 16 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granulitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	33
Obr. 17 Pracovní diagramy, prostý tlak, granulit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	34
Obr. 18 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na melasyenitu z lokality Magdaléna. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	35
Obr. 19 Pracovní diagramy, prostý tlak, melasyenit, Magdaléna. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	36
Obr. 20 Triaxiální komora Ergotech osazená v zatěžovacím rámu MTS 815.....	38

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obr. 21 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granodioritu z lokality Březový potok. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	39
Obr. 22 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granodiorit, Březový potok. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	40
Obr. 23 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Čertovka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	41
Obr. 24 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Čertovka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	42
Obr. 25 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Čihadlo. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	43
Obr. 26 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Čihadlo. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	44
Obr. 27 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na durbachitu z lokality Horka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	45
Obr. 28 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, durbachit, Horka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	46
Obr. 29 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Hrádek. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.....	47
Obr. 30 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Hrádek. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.....	48
Obr. 31 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na migmatitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	49
Obr. 32 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, migmatit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	50
Obr. 33 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granulitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	51

Obr. 34 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granulit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	52
Obr. 35 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na melasyenitu z lokality Magdaléna. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.	53
Obr. 36 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, melasyenit, poslední pracovní diagram – melasyenit*, Magdaléna. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.	54
Obr. 37 Fotografie zkoušky v příčném tahu.	55
Obr. 38 Brazílská zkouška, graf závislosti osově síly na posunutí lisu, červeně: granit z lokality Čihadlo (vzorek C112, BTS = 13,9 MPa), modře: durbachit z lokality Horka (vzorek HO11, BTS = 3,6 MPa).	56
Obr. 39 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Březový potok, hornina granodiorit.	58
Obr. 40 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Čertovka, hornina granit.	59
Obr. 41 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Čihadlo, hornina granit.	60
Obr. 42 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Horka, hornina durbachit.	61
Obr. 43 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Hrádek, hornina granit.	62
Obr. 44 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Kraví hora, hornina migmatit.	63
Obr. 45 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Kraví hora, hornina granulit.	64
Obr. 46 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Magdaléna, melasyenit.	65
Obr. 47 Fotografie permeometru Quizix 5000.	67
Obr. 48 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Březový potok, granodiorit.	68
Obr. 49 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Čertovka, granit.	69
Obr. 50 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Čihadlo, granit.	70
Obr. 51 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Horka, durbachit.	71
Obr. 52 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Hrádek, granit.	72
Obr. 53 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Kraví hora, migmatit.	73
Obr. 54 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Kraví hora, granulit.	74
Obr. 55 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Magdaléna, melasyenit*.....	75

Seznam tabulek:

Tab. 1 Identifikace lokalit a horninových typů	10
Tab. 2 Požadované laboratorní zkoušky, včetně norem a pracovních postupů, podle kterých jsou prováděny a kalibrovaných měřidel (tab. 3).....	11
Tab. 3 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v Tab. 2.	12
Tab. 4 Fyzikálně-popisné vlastnosti stanovené pro 8 testovaných horninových typů.	13
Tab. 5 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem \pm je směrodatná odchylka; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.....	15
Tab. 6 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených na vzorcích pro jednoosé a triaxiální zkoušky; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.....	16
Tab. 7 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených na vzorcích pro jednoosé a triaxiální zkoušky; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.....	17
Tab. 8 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky statických modulů a pevnosti v prostém tlaku. Hodnoty uvedených vlastností pro každý měřený vzorek jsou na obrázcích 4–19.....	20
Tab. 9 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky statických modulů a pevnosti stanovené při triaxiální zkoušce za plášťového tlaku 13 MPa. Hodnoty uvedených vlastností pro každý měřený vzorek jsou na obrázcích 21–36.	38
Tab. 10 Výsledky zkoušek v příčném tahu, průměrné hodnoty a směrodatné odchylky z pěti zkoušek provedených v rámci každého horninového typu. Vzorky byly vysušené (24 hodin při 105 °C), fotografie odpovídajících porušených vzorků na obrázcích 39–46.	57
Tab. 11 Koeficient hydraulické vodivosti měřený při 18°C a přepočtený na teplotu vody 10°C. Každá hodnota k a k_{10} je průměrem ze šesti měření (3 testované vzorky X 2 tlakové diference). Za symbolem \pm je směrodatná odchylka ze šesti měření.	67

Seznam elektronických příloh:

1. *zprava.pdf*: souhlas obsahující zprávu v elektronickém formátu (PDF)
2. *tabulky.xlsx*: soubor obsahující textové tabulky v elektronickém formátu (XLSX)
3. *UNIAX*: složka obsahující měřená data (relativní deformace, osová napětí) z jednoosých zkoušek a pracovní diagramy z těchto dat vykreslené (formát viz *stress_strain.doc*)
4. *TRIAx*: složka obsahující měřená data (relativní deformace, osová napětí) z triaxiálních zkoušek a pracovní diagramy z těchto dat vykreslené (formát viz *stress_strain.doc*)
5. *BRAZ*: složka obsahující měřená data (posunutí lisu, osová síla) ze zkoušek v příčném tahu (soubory *specimen.dat*, formát viz *stress_strain.doc*)
6. *FOTO*: složka obsahující fotografie všech dodaných horninových bloků a všech testovaných zkušebních tělísek

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Abecední seznam použitých zkratk a symbolů:

<i>BTS</i>	pevnost v příčném tahu
<i>d</i>	průměr zkušebního tělíska
<i>DTS</i>	pevnost v prostém tahu
<i>E</i>	statický Youngův modul
<i>Ed</i>	dynamický Youngův modul
<i>Fmax</i>	maximální osová síla naměřená při zkoušce v příčném tahu
<i>K</i>	statický objemový modul
<i>Kd</i>	dynamický objemový modul
<i>k</i>	koeficient filtrace
<i>k10</i>	koeficient filtrace přepočtený na teplotu vody 10°C
<i>L</i>	výška zkušebního tělíska
<i>m</i>	hmotnost zkušebního tělíska
<i>N_C</i>	celková pórovitost
<i>N_EF</i>	efektivní pórovitost
<i>v</i>	statický Poissonův poměr
<i>vd</i>	dynamický Poissonův poměr
<i>u</i>	statický smykový modul
<i>ud</i>	dynamický smykový modul
<i>ρSPEC</i>	specifická objemová hmotnost
<i>ρSAT</i>	objemová hmotnost nasycené horniny
<i>ρDRY</i>	objemová hmotnost vysušené horniny
<i>ρSPEC</i>	specifická objemová hmotnost
<i>tP</i>	čas průchodu podélné vlny vzorkem
<i>tS</i>	čas průchodu příčné vlny vzorkem
<i>vP</i>	rychlost šíření podélných vln
<i>vS</i>	rychlost šíření příčných vln
<i>ρDRY</i>	objemová hmotnost vysušené horniny

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Abstrakt

Zpráva obsahuje výsledky laboratorních zkoušek, popisné a mechanické vlastností osmi typů granitoidních a metamorfovaných hornin potenciálních lokalit hlubinného úložiště (HÚ). Horninový materiál byl z vytipovaných lokalit odebrán a dodán ve formě bloků. Lokality a horninové typy: Kraví hora (granulit, migmatit), Čihadlo (granit), Březový potok (granodiorit), Horka (durbachit), Hrádek (granit), Čertovka (granit), Magdaléna (melasyenit). Zkušební tělíska byla připravena odvrtáním z dodaných horninových bloků a následným přesným zabroušením. Stanovené vlastnosti: popisné vlastnosti (objemová hmotnost nasycená, suchá a specifická; pórovitost celková a efektivní, rychlosti podélných a příčných vln); pevnost v příčném tahu; pevnost v prostém tlaku; triaxiální pevnost při plášťovém tlaku 13 MPa; elastické konstanty stanovené při zkoušce v prostém tlaku; elastické konstanty stanovené při triaxiální zkoušce; dynamické elastické moduly; hydraulická vodivost.

Klíčová slova

Pevnost v prostém tlaku, triaxiální pevnost, pevnost v příčném tahu, elastické moduly, koeficient hydraulické vodivosti

Abstract

The report consists of the results of laboratory tests, namely the descriptive and mechanical properties of eight granitic rocks. The rock material together with its description was supplied by the SÚRAO. Locations and rock types: Kraví hora (granulite, migmatite), Čihadlo (granite), Březový potok (granodiorite), Horka (durbachite), Hrádek (granite), Čertovka (granite), Magdaléna (melasyenite). The specimens were drilled and milled from the supplied rock blocks. The established properties: descriptive properties (saturated, dried and specific density, porosity and effective porosity, P and S wave velocity); brazilian tension strength; uniaxial compressive strength; triaxial strength at 13 MPa of lateral pressure; static elastic moduli from uniaxial and triaxial loading; dynamic elastic moduli; coefficient of hydraulic conductivity.

Keywords

Uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength, Brazilian tension strength, elastic moduli, coefficient of hydraulic conductivity

1 Úvod

1.1 Dodaný horninový materiál

Testovaný horninový materiál pochází z lokalit, kde probíhají pro geologické průzkumy za účelem stavby hlubinného úložiště radioaktivního odpadu. Horninový materiál byl z vytipovaných lokalit odebrán a dodán ve formě bloků. Lokality a horninové typy: Kraví hora (granulit, migmatit), Čihadlo (granit), Březový potok (granodiorit), Horka (durbachit), Hrádek (granit), Čertovka (granit), Magdaléna (melasyenit). Tab. 1 obsahuje soupis lokalit a horninových typů. Z každého horninového typu byly dodány 3 bloky s rozměry cca 20X20X20 cm. Tyto bloky byly až na melasyenit z Magdalény odebrány orientované. Zkušební tělíška z nich byla vrtána kolmo k orientované ploše, jejíž směr sklonu a sklon je spolu s číslem bloku uveden v tabulkách popisujících výsledky pevnostních zkoušek na jednotlivých vzorcích. Fotky dodaných horninových bloků jsou obsaženy v elektronických přílohách ve složce *FOTO\BLOKY*.

Tab. 1 Identifikace lokalit a horninových typů

lokality	typ horniny	popis lokality	souřadnice		kod
			z. šířka	z. délka	
Březový potok	granodiorit	Defurovy Lažany	N49°24'25.6"	E13°39'57.9"	110GYS0001
Čertovka	tiský granit	Tis u Blatna	N50°05'30.4"	E13°22'28.0"	120GYS0005
Čihadlo	granit	lom Deštná	N49°15'9.688"	E14°55'20.150"	130GYS0001
Horka	durbachit	Oslavička	N49°20'16.0"	E15°59'10.0"	140GYS0001
Hrádek	granit Bílý Kámen	lom Boršov	N49°23'46.710"	E15°25'49.789"	150GYS0001
Kraví hora	migmatit	Věžná	N49°26'56.9"	E16°16'15.5"	170GYS0001
Kraví hora	granulit	Moravecké Pavlovice	N49°25'00.9"	E16°15'09.6"	170GYS0003
Magdaléna	melasyenit	lom Dražice	N49° 23' 59.8"	E14° 36' 48.0"	160GYS0002

1.2 Požadované laboratorní zkoušky

Tab. 2 uvádí požadované zkoušky. Jejich kvalita vychází z dodržování uvedených norem a zkušebních postupů. Uvedené zkoušky provádí a interpretují zaměstnanci *Laboratoře fyzikálních vlastností hornin, GLÚ AV ČR, v. v. i.* Použitá měřidla a jejich kalibrace je uvedena v tabulce 3.

1.3 Příprava zkušebních tělísek

Jak pro pevnostní zkoušky, tak i pro stanovení koeficientu filtrace, byla použita válcová tělíška s průměrem 50 mm. Tato tělíška byla připravena odvrtáním, seříznutím a zabroušením z dodaných horninových bloků (viz kapitola 1.1). Dodané horninové bloky byly orientované, s výjimkou melasyenitu z lokality Magdaléna. U každého z testovaných vzorků je uvedeno, ze kterého bloku pochází a orientace plochy, jejíž normála odpovídá ose vrtání. Například vzorek s označením BP1 je popsán jako 1-113/72, což znamená, že pochází z bloku 1 a jeho osa je kolmá k ploše určené směrem sklonu 113° a sklonem 72°. Šipka na vzorku určuje směr sklonu. Po zaříznutí byly podstavy válcových tělísek zabroušeny pro zajištění rovinnosti a paralelnosti s přesností na 0,01 mm. Přesnost výroby tělísek je základním předpokladem pro kvalitní provedení zkoušky, přesného měření relativních deformací a tím i určení statických elastických modulů.

 SÚRAO	Stanovení mechanických vlastností hlavních petrografických typů potenciálních lokalit HÚ	Evidenční označení:
		TZ 88/2017

Tab. 2 Požadované laboratorní zkoušky, včetně norem a pracovních postupů, podle kterých jsou prováděny a kalibrovaných měřidel (Tab. 3).

Zkouška	Norma	Zkušební postup	Čísla měřidel
stanovení zdánlivé hustoty pevných částic	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892-3 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru	3
stanovení objemové hmotnosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	odpovídá uvedené normě	1, 2
stanovení pórovitosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	odpovídá uvedené normě	1, 2, 3
stanovení pevnosti v prostém tlaku	ČSN EN 1926 (2007) Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku	odpovídá uvedené normě	6
stanovení pevnosti v příčném tahu	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování betonů	ČSN EN 12390-6 (2010) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles	6
stanovení pevnosti při daném komorovém tlaku	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 15. Triaxiální zkoušky ve Zavoral, J. et al. (1987), Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	6, 17
stanovení statických elastických modulů při jednoosé zkoušce	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v normě, která přestala platit v roce 2006	ČSN 721165 (1984) Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku přírodního stavebního kamene (neplatná 2006)	6, 7, 8
stanovení statických elastických modulů při triaxiální zkoušce	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v normě, která přestala platit v roce 2006	ČSN 721165 (1984) Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku přírodního stavebního kamene (neplatná 2006)	6, 15, 16, 17
stanovení dynamických elastických modulů	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987), Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	1, 2, 13, 14
stanovení rychlosti šíření seismických vln	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987), Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	1, 13, 14
stanovení koeficientu hydraulické vodivosti	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu	1, 18

Tab. 3 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v Tab. 2.

Číslo měřidla	Měřidlo	Značka	Rozsah	Dílek	Datum Kalibrace	Perioda kalibrace	Provedl	č. kalib. Listu
1	elektronické posuvné měřítko	Proma	150 mm	0.01 mm	5.10.2016	měsíčně	vlastní	-
3	elektronická váha	Mettler Toledo PB 3002-S/FACT	3200 g	0.01 g	3.6.2016	ročně	LABO - MS, spol. s r.o.	K-16-613-2
2	elektronická váha	Precisa 240A	240 g	0.0001 g	3.6.2016	ročně	LABO - MS, spol. s r.o.	K-16-613-1
6	servohydraulický zatěžovací rám MTS 815 se snímačem	Snimac sily MTS 661.98	1000 kN	0.01 kN	14.6.2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4225-1-16
7	měřidlo relativní podélné deformace	extezometr MTS 632.11F-90	10 mm	0.0001 mm	14.6.2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4228-16
8	měřidlo obvodové deformace	extenzometr MTS 632.12F-20	20 mm	0.0001 mm	14.6.2016	ročně	AKL ZÁLEŠÁK s.r.o.	4229-16
13	ultrazvukové snímače podélného vlnění	PANAMETRICS V150	-	0.01 us	10.3.2016	ročně	vlastní	-
14	ultrazvukové snímače příčného vlnění	PANAMETRICS V153	-	0.01 us	10.3.2016	ročně	vlastní	-
15	měřidlo podélné deformace	LVDT GT 2500	5 mm	0.0001 mm	4.2.2016	ročně	vlastní	-
16	měřidlo příčné deformace	cantilever ergotech	6 mm	0.0001 mm	4.2.2016	ročně	vlastní	-
17	triaxiální buňka Ergotech, snímač komorového tlaku	ADZ Nagano SMX	200 MPa	0.1 MPa	14.1.2016	ročně	vlastní	-
18	Permeameter	Quizix 5000	9 ml; 70 MPa	0.1 ul; 0.01 MPa	20.4.2016	ročně	vlastní	-

2 Fyzikálně popisné vlastnosti

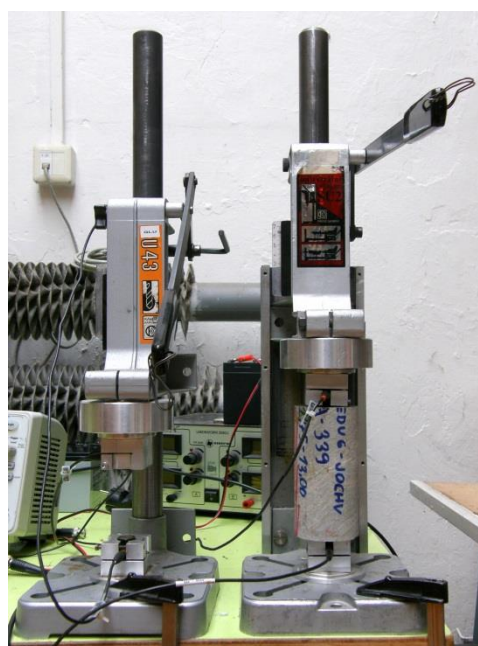
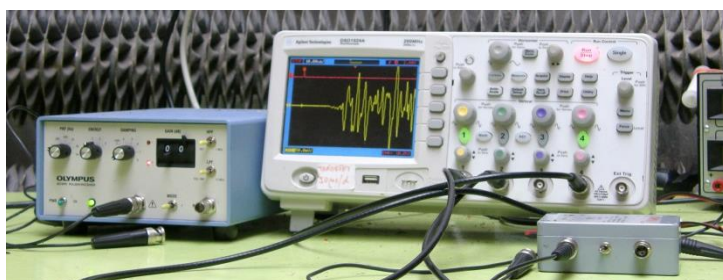
Mezi stanovené fyzikálně popisné vlastnosti patří suchá objemová hmotnost ρ_{DRY} , nasycená objemová hmotnost ρ_{SAT} , specifická objemová hmotnost ρ_{SPEC} , celková pórovitost N_C a efektivní pórovitost N_{EF} . ρ_{SAT} byla stanovená jako průměrná hodnota ze tří měření na vzorcích saturovaných při měření koeficientu hydraulické vodivosti. ρ_{DRY} byla stanovená jako průměrná hodnota z deseti měření na pravidelných tělískách pro jednoosou a triaxiální zkoušku. ρ_{SPEC} byla stanovená jako průměrná hodnota ze tří pyknometrických měření. Směrodatné odchylky pro nasycenou a suchou objemovou hmotnost byly menší než $0,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Směrodatné odchylky pro specifickou objemovou hmotnost nepřesahují $0,005 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Z průměrných objemových hmotností byla vypočtena celková a efektivní pórovitost. Zmíněné vlastnosti hornin byly stanoveny standardním způsobem podle platných norem a zkušebních postupů (tab. 2) a průměrné hodnoty jsou uvedené v Tab. 4. Použité váhy jsou pravidelně kalibrované, spolehlivost posuvného měřítka je pravidelně ověřována měřením standardizovaného etalonu (Tab. 3). V blocích melasyenitu z lokality Magdaléna byly obsaženy bazičtější, méně prožilkované enklávy s odlišnými vlastnostmi (porovnej vzorky MG11A-MG31 se vzorkem MG33 na Obr. 35). Horninový typ těchto enkláv je v následujícím textu označen jako melasyenit*. Všechny tři vzorky na měření koeficientu hydraulické vodivosti a jeden vzorek na měření triaxiální pevnosti (MG33) byly připraveny z bazičtějších enkláv (melasyenit*). Z toho důvodu, že všechna měření propustnosti byla dělaná na bazičtějších enklávách, neobsahuje Tab. 4 hodnoty ρ_{SAT} a N_{EF} .

Tab. 4 Fyzikálně-popisné vlastnosti stanovené pro 8 testovaných horninových typů.

lokalita	typ horniny	ρ_{SAT}	ρ_{DRY}	ρ_{SPEC}	N_C	N_{EF}
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]
Březový potok	granodiorit	2,660	2,658	2,711	1,97	0,27
Čertovka	granit	2,630	2,627	2,680	1,96	0,22
Čihadlo	granit	2,623	2,618	2,676	2,17	0,57
Horka	durbachit	2,728	2,712	2,789	2,77	1,66
Hrádek	granit	2,609	2,587	2,669	3,05	2,15
Kraví hora	migmatit	2,624	2,618	2,664	1,73	0,61
Kraví hora	granulit	2,662	2,655	2,692	1,37	0,75
Magdaléna	melasyenit	-	2,760	2,786	0,93	-
Magdaléna	melasyenit*	3,047	3,044	3,051	0,23	0,32

3 Ultrazvukové prozařování

Válcová zkušební tělíska (výška 100 mm, průměr 50 mm) připravená pro zkoušky v prostém tlaku a triaxiální zkoušky (kapitola 1.3) byla po vysušení (24 hodin, 105 °C) v podélném směru ultrazvukově prozářena. Využito bylo snímačů *PANAMETRICS V150* (podélné vlny) a *PANAMETRICS V153* (příčné vlny), zesilovače *Sedlak PA31*, pulzního zdroje *Olympus 5072PR* a osciloskopu *Agilent Technologies, DSO1024A*. Celý tento systém (Obr. 1) je kalibrovaný. Kalibrace je kontrolována pomocí prozařování duralového etalonu před každou sérií měření (Tab. 3).



Obr. 1 Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači.

Podle vztahů (1) byly z naměřených rychlostí (v_p rychlost podélné vlny, v_s rychlost příčné vlny) a suché objemové hmotnosti (ρ_{DRY}) spočteny dynamické elastické parametry: Youngův modul E_d , smykový modul μ_d , objemový modul K_d a poissonův poměr ν_d .

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

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

(1)

$$\mu_d = \rho_{DRY} v_s^2$$

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

Všechny elastické parametry, dynamické i statické, uvedené v této zprávě, jsou počítány za předpokladu, že testovaná hornina představuje homogenní izotropní prostředí. Vzhledem k tomu, že některé testované horniny jsou viditelně strukturně anizotropní (migmatit a granulit, Kraví hora), bylo by potřeba k popisu jejich elastického chování více než dvou nezávislých elastických parametrů, které jsou dostatečné v případě izotropního prostředí. Pro jejich stanovení by bylo potřeba provést ultrazvukové prozařování ve větším počtu nezávislých směrů.

Pro každý horninový typ byly rychlosti seismických vln a dynamické moduly určeny jako průměrná hodnota z 10 měření (5 vzorků pro jednoosé zkoušky + 5 vzorků pro triaxiální zkoušky). V Tab. 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky charakterizující každý z horninových typů. V

Tab. 6 a 7 jsou rychlosti seismických vln a z nich počítané dynamické moduly pro každý ze vzorků určených na jednoosou nebo triaxiální zkoušku.

Tab. 5 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených pro jednoosé zkoušky, za znaménkem \pm je směrodatná odchylka; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	vP	vS	ρ_{DRY}	Ed	ud	vd	Kd
			[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
Březový potok	granodiorit	10	5.046 ± 0.175	3.033 ± 0.136	2.658 ± 0.003	59.5 ± 4.7	24.5 ± 2.2	0.22 ± 0.02	35.1 ± 3.0
Čertovka	granit	10	4.920 ± 0.118	2.886 ± 0.074	2.627 ± 0.006	54.2 ± 2.7	21.9 ± 1.2	0.24 ± 0.01	34.4 ± 2.2
Čihadlo	granit	10	4.799 ± 0.032	3.054 ± 0.024	2.618 ± 0.008	56.6 ± 0.7	24.4 ± 0.4	0.16 ± 0.01	27.7 ± 0.8
Horka	durbachit	10	3.725 ± 0.328	2.143 ± 0.138	2.712 ± 0.021	31.3 ± 4.5	12.5 ± 1.7	0.25 ± 0.03	21.3 ± 4.9
Hrádek	granit	10	4.369 ± 0.390	2.789 ± 0.220	2.587 ± 0.011	46.9 ± 7.9	20.3 ± 3.2	0.15 ± 0.02	22.8 ± 4.7
Kraví hora	migmatit	10	3.922 ± 0.184	2.458 ± 0.119	2.618 ± 0.010	37.2 ± 3.4	15.9 ± 1.6	0.17 ± 0.03	19.2 ± 2.7
Kraví hora	granulit	10	4.049 ± 0.457	2.450 ± 0.292	2.655 ± 0.007	38.9 ± 8.7	16.2 ± 3.7	0.21 ± 0.04	22.5 ± 5.6
Magdaléna	melasyenit	10	5.170 ± 0.652	3.072 ± 0.291	2.793 ± 0.100	65.5 ± 14.7	26.7 ± 5.4	0.22 ± 0.03	40.6 ± 13.1

Tab. 6 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených na vzorcích pro jednoosé a triaxiální zkoušky; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.

lokality hornina	Číslo vzorku	L [mm]	d [mm]	m [g]	tP [us]	tS [us]	vP [km/s]	vS [km/s]	ρ_{DRY} [g/cm ³]	E_d [GPa]	u_d [GPa]	v_d	K_d [GPa]
Březový potok granodiorit	BP1	99,79	49,49	509,24	21,20	34,80	4,707	2,868	2,653	52,6	21,8	0,205	29,7
	BP2	100,65	49,69	518,95	20,80	33,00	4,839	3,050	2,659	57,9	24,7	0,170	29,3
	BP5	99,73	49,72	514,06	19,80	34,20	5,037	2,916	2,655	56,3	22,6	0,248	37,3
	BP6	100,74	49,69	519,39	19,40	32,00	5,193	3,148	2,659	63,7	26,3	0,209	36,6
	BP9	100,65	49,66	518,9	19,60	33,00	5,135	3,050	2,662	60,8	24,8	0,227	37,2
	BP3	100,36	49,71	517,15	19,90	34,30	5,043	2,926	2,655	56,7	22,7	0,246	37,2
	BP4	100,19	49,71	516,66	20,60	35,40	4,864	2,830	2,657	53,0	21,3	0,244	34,5
	BP8	100,22	49,68	516,52	19,20	32,10	5,220	3,122	2,659	63,3	25,9	0,221	37,9
	BP10	100,22	49,65	516,29	19,40	31,70	5,166	3,162	2,661	63,9	26,6	0,201	35,5
	BP11	99,8	49,65	513,7	19,00	30,60	5,253	3,261	2,659	67,1	28,3	0,186	35,6
	Čertovka granit	CE11	100,8	49,4	507,72	21,20	35,20	4,755	2,864	2,628	52,4	21,6	0,215
CE21		101,32	49,75	517,45	20,20	34,80	5,016	2,911	2,627	55,5	22,3	0,246	36,4
CE22		101,02	49,75	517,13	20,40	34,20	4,952	2,954	2,633	56,2	23,0	0,224	33,9
CE23		101,74	49,78	521,2	20,40	34,60	4,987	2,940	2,632	56,1	22,8	0,234	35,1
CE31		100,69	49,85	514,02	20,40	35,60	4,936	2,828	2,616	52,5	20,9	0,256	35,8
CE24		100,46	49,92	517,57	20,20	34,20	4,973	2,937	2,632	56,0	22,7	0,232	34,8
CE25		100,46	49,86	516,89	20,60	34,30	4,877	2,929	2,635	55,1	22,6	0,218	32,5
CE26		101,56	49,9	522,31	19,8	34,2	5,129	2,970	2,630	57,9	23,2	0,248	38,3
CE32		100,84	49,79	514,22	20,70	36,20	4,871	2,786	2,619	51,1	20,3	0,257	35,1
CE33		101,12	49,85	517,38	21,50	36,90	4,703	2,740	2,622	48,9	19,7	0,243	31,7
Čihadlo granit	CI11	100,08	49,52	508,78	20,90	32,50	4,789	3,079	2,640	57,4	25,0	0,147	27,2
	CI12	101,29	50,07	521,89	21,10	33,50	4,800	3,024	2,617	56,0	23,9	0,171	28,4
	CI21	100,51	50,3	522,92	20,70	32,80	4,856	3,064	2,618	57,5	24,6	0,169	28,9
	CI22	100,96	50,2	521,83	21,00	32,90	4,808	3,069	2,611	56,9	24,6	0,156	27,6
	CI23	101,08	50,3	525,76	21,00	33,4	4,813	3,026	2,618	56,2	24,0	0,173	28,7
	CI13A	100,86	50,05	519,64	20,90	32,90	4,826	3,066	2,619	57,2	24,6	0,162	28,2
	CI14A	101,26	50,08	522,34	21,00	32,80	4,822	3,087	2,619	57,5	25,0	0,153	27,6
	CI24	101,29	50,35	526,26	21,30	33,40	4,755	3,033	2,609	55,5	24,0	0,157	27,0
	CI25	100,12	50,2	518,36	21,10	32,60	4,745	3,071	2,616	56,2	24,7	0,140	26,0
	CI26	99,75	50,24	516,3	20,90	33,00	4,773	3,023	2,611	55,6	23,9	0,165	27,7
Horka durbachit	HO11	100,75	49,61	527,85	25,60	46,40	3,936	2,171	2,710	32,7	12,8	0,281	24,9
	HO12	100,16	49,47	523,99	24,80	46,40	4,039	2,159	2,722	33,0	12,7	0,300	27,5
	HO21	101,32	49,26	514,76	32,00	54,00	3,166	1,876	2,666	23,1	9,4	0,229	14,2
	HO23A	100,8	49,46	524,6	27,60	48,40	3,652	2,083	2,709	29,6	11,7	0,259	20,5
	HO32	101,27	49,31	527,12	23,60	42,40	4,291	2,388	2,726	39,7	15,5	0,276	29,5
	HO13	100,92	49,64	528,08	26,20	45,80	3,852	2,203	2,704	33,0	13,1	0,257	22,6
	HO14	101,28	49,47	531,61	29,20	49,00	3,468	2,067	2,731	28,6	11,7	0,225	17,3
	HO24	100,78	49,42	520,44	29,80	50,00	3,382	2,016	2,692	26,8	10,9	0,225	16,2
	HO31	100,47	49,27	520,42	28,60	46,60	3,513	2,156	2,717	30,3	12,6	0,198	16,7
	HO33	101,1	49,4	531,49	25,60	43,80	3,949	2,308	2,743	36,3	14,6	0,241	23,3

Tab. 7 Rychlosti seismických vln a dynamické moduly určené prozařováním v ose válcových vzorků určených na vzorcích pro jednoosé a triaxiální zkoušky; vzorky byly sušeny 24 hodin při teplotě 105 °C.

lokality	Číslo vzorku	L [mm]	d [mm]	m [g]	tP [us]	tS [us]	vP [km/s]	vS [km/s]	ρ_{DRY} [g/cm ³]	E_d [GPa]	u_d [GPa]	v_d	K_d [GPa]
Hrádek granit	HR1	101.12	49.63	508.55	21	33.70	4.815	3.001	2.600	55.4	23.4	0.183	29.1
	HR2	100.58	49.68	507.22	20.90	33.00	4.812	3.048	2.602	56.3	24.2	0.165	28.0
	HR5	100.65	49.26	492.58	25.00	39.10	4.026	2.574	2.568	39.3	17.0	0.154	18.9
	HR6	100.79	49.3	496.39	23.80	37.00	4.235	2.724	2.580	43.9	19.1	0.147	20.7
	HR9	100.99	49.66	504.34	26.60	40.50	3.797	2.494	2.578	35.9	16.0	0.121	15.8
	HR3	100.45	49.65	505.78	20.80	32.70	4.829	3.072	2.601	56.9	24.5	0.160	27.9
	HR4	100.66	49.62	504.96	21.60	34.20	4.660	2.943	2.594	52.5	22.5	0.168	26.4
	HR7	100.66	49.32	497.82	23.00	35.60	4.377	2.828	2.589	47.3	20.7	0.142	22.0
	HR8	100.65	49.38	498.55	23.00	36.20	4.376	2.780	2.586	46.4	20.0	0.162	22.9
	HR10	100.82	49.66	503	26.80	41.50	3.762	2.429	2.576	34.7	15.2	0.142	16.2
Kráví hora migmatit	KH11	101.58	50.48	528.54	27	44.2	3.762	2.298	2.600	33.0	13.7	0.202	18.5
	KH22A	101.15	50.37	526.39	24.8	39.6	4.079	2.554	2.612	40.1	17.0	0.177	20.7
	KH31	100.94	50.36	529.92	25.9	41.8	3.897	2.415	2.636	36.5	15.4	0.188	19.5
	KH32	101.29	50.47	529.08	26	39.4	3.896	2.571	2.611	38.5	17.3	0.114	16.6
	KH36A	90.27	50.45	472.7	21.9	38.1	4.122	2.369	2.620	36.9	14.7	0.253	24.9
	KH12	101.48	50.38	530.86	27.8	43.6	3.650	2.328	2.624	32.9	14.2	0.157	16.0
	KH13	101.12	50.45	528.03	27.4	42.8	3.691	2.363	2.612	33.6	14.6	0.153	16.1
	KH21	101.64	50.44	532.02	23.8	37.8	4.271	2.689	2.620	44.4	18.9	0.172	22.5
	KH33	101.32	50.32	530.82	25.8	40.2	3.927	2.520	2.634	38.5	16.7	0.150	18.3
	KH34	101.27	50.46	529.51	25.8	41	3.925	2.470	2.615	37.4	16.0	0.172	19.0
Kráví hora granulit	KH41	101.38	50.38	535.42	30.4	50.4	3.335	2.012	2.649	26.0	10.7	0.214	15.2
	KH51	101.48	50.45	538.13	24.6	38.3	4.125	2.650	2.653	42.8	18.6	0.149	20.3
	KH52A	102.45	49.02	511.48	25.2	43.8	4.065	2.339	2.645	36.3	14.5	0.253	24.4
	KH53B	101.37	50.34	534.06	20.7	35.5	4.897	2.855	2.647	53.6	21.6	0.242	34.7
	KH61	84.3	50.38	447.58	18.6	30.5	4.532	2.764	2.663	49.0	20.3	0.204	27.6
	KH42	101.3	50.38	535.62	26.2	46	3.866	2.202	2.652	32.4	12.9	0.260	22.5
	KH43	100.51	50.37	533.17	30	51.2	3.350	1.963	2.662	25.4	10.3	0.239	16.2
	KH54A	100.23	50.36	530.42	24.8	38.8	4.042	2.583	2.657	40.9	17.7	0.155	19.8
	KH55	101.4	50.37	538.44	25.8	40	3.930	2.535	2.665	39.2	17.1	0.144	18.3
	KH62	98.18	50.39	520.74	22.6	37.8	4.344	2.597	2.660	43.8	17.9	0.222	26.3
Magdaléna melasyenit	MG13	101.65	50.35	555.6	21.20	33.80	4.795	3.007	2.745	58.4	24.8	0.176	30.0
	MG14	100.19	50.3	548.33	21.40	35.50	4.682	2.822	2.754	53.3	21.9	0.215	31.1
	MG32	101.53	50.39	563.21	17.40	30.30	5.835	3.351	2.782	78.3	31.2	0.254	53.1
	MG34	101.57	50.36	562.27	17.9	30.6	5.674	3.319	2.779	75.9	30.6	0.240	48.7
	MG37	90.87	50.48	503.29	15.4	26.7	5.901	3.403	2.767	80.2	32.1	0.251	53.6
	MG11A	100.49	50.36	548.1	22.80	36.40	4.407	2.761	2.738	49.1	20.9	0.177	25.4
	MG12	101.78	50.34	556.74	22.20	35.80	4.585	2.843	2.748	52.8	22.2	0.188	28.1
	MG15	101.12	50.31	552.95	24.00	39.40	4.213	2.566	2.751	43.7	18.1	0.205	24.7
	MG31	100.4	50.45	557.66	17.40	30.40	5.770	3.303	2.779	76.2	30.3	0.256	52.1
melasyenit*	MG33	100.34	50.36	617.52	17.20	30.00	5.834	3.345	3.090	86.8	34.6	0.255	59.1

4 Zkoušky v prostém tlaku

Válcová zkušební tělíska s výškou 100 mm a průměrem 50 mm byla z dodaných horninových bloků (kapitola 1.1) připravena a orientována tak, jak je popsáno v kapitole 1.3.

Jednoosé tlakové zkoušky byly provedeny podle norem a pracovních postupů uvedených v Tab. 2. Snímače relativních deformací a osová síly jsou pravidelně kalibrované (Tab. 3).

Jednoosé zatěžování bylo prováděno pomocí zatěžovacího rámu MTS, bylo řízeno pravidelným přírůstkem deformace, který byl navržen tak, aby k porušení vzorku došlo do 15 minut po začátku zatěžování. Tělíska byla zkoušena ve vysušeném stavu (24 hodin, 105 °C). V průběhu zatěžování byla pomocí extenzometrů měřena relativní podélná a obvodová deformace, jak je vidět na Obr. 2. Obvodová deformace byla přepočtena na relativní příčnou deformaci. Naměřené relativní deformace jsou spolu s fotografiemi porušených vzorků na obrázcích 4–19.

Z naměřených relativních deformací (ε_a – podélná relativní deformace, ε_r – příčná relativní deformace) a působícího osového napětí σ_1 byly v oblasti lineární závislosti mezi napětím a relativními deformacemi (20–40 % pevnosti v prostém tlaku) podle vztahu (2) stanoveny statické elastické moduly: Youngův modul a Poissonův poměr.

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_a} \qquad E = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (2)$$

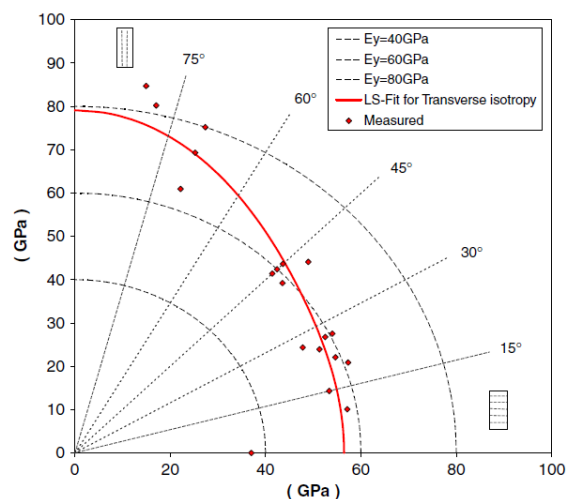
Na základě znalosti těchto dvou elastických konstant a za předpokladu, že se jedná o homogenní izotropní materiál, byl spočítán podle vztahů (3) střižný modul μ a objemový modul K . Takto určené statické moduly jsou spolu s naměřenou pevností uvedeny pro všechny vzorky v obrázcích 4–19.

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

Statické elastické parametry jsou počítány za předpokladu, že testovaná hornina představuje homogenní izotropní prostředí. Pro anizotropní migmatit a granulit z lokality Kraví hora by pro přesnější popis elastického chování bylo potřeba více než dva elastické parametry, což by znamenalo zkoušet vzorky s různou orientací foliace vzhledem k ose zatěžování. Pro ilustraci vlivu vzájemné orientace foliace a působícího jednoosého napětí na směrovou závislost elastických konstant je v této zprávě uveden Obr. 3. Testovanou horninou byla v tomto případě biotitická rula z lokality Olkiluoto, která je uvažovaná jako potenciální hlubinné uložště radioaktivního odpadu. Obr. 3 zachycuje směrovou závislost statického Youngova modulu na orientaci foliace anizotropní biotitické ruly. V případě horizontální foliace je Youngův modul 55 GPa, v případě vertikální foliace je Youngův modul 80 GPa.



Obr. 2 Horninový vzorek při jednoosé zkoušce osazený dvěma extenzometry relativní podélné deformace a extenzometrem měřícím relativní příčnou deformaci.



Obr. 3 Polární graf znázorňující závislost Youngova modulu na orientaci foliace, biotitická rula z lokality Olkiluoto, Finsko (převzato z Hakala et al., 2007).

Na horninových vzorcích byly také určeny sklony foliace a trhlin existujících v hornině před vlastní zkouškou (primárních trhlin). Sklon je měřený od horizontální roviny. Pokud je za sklonem u trhlin uvedeno písmeno f , jsou diskontinuity paralelní s foliací.

V Tab. 8 jsou shrnuty naměřené pevnosti a stanovené statické moduly. Za znakem \pm je uvedena směrodatná odchylka pro pět vzorků měřených v rámci každého horninového typu. Hodnoty stanovené pro každý měřený vzorek jsou v tabulkách pod fotografiemi porušených vzorků. Fotografie a stanovené parametry jsou doplněné o pracovní diagramy proběhlých zkoušek. V elektronických přílohách jsou měřená napěťo-deformační data i fotografie porušených vzorků. Napěťový interval pro stanovení elastických parametrů (20–40 % z UCS) je uveden v obrázkových tabulkách a vyznačen červenou čárkovanou čarou v pracovních diagramech.

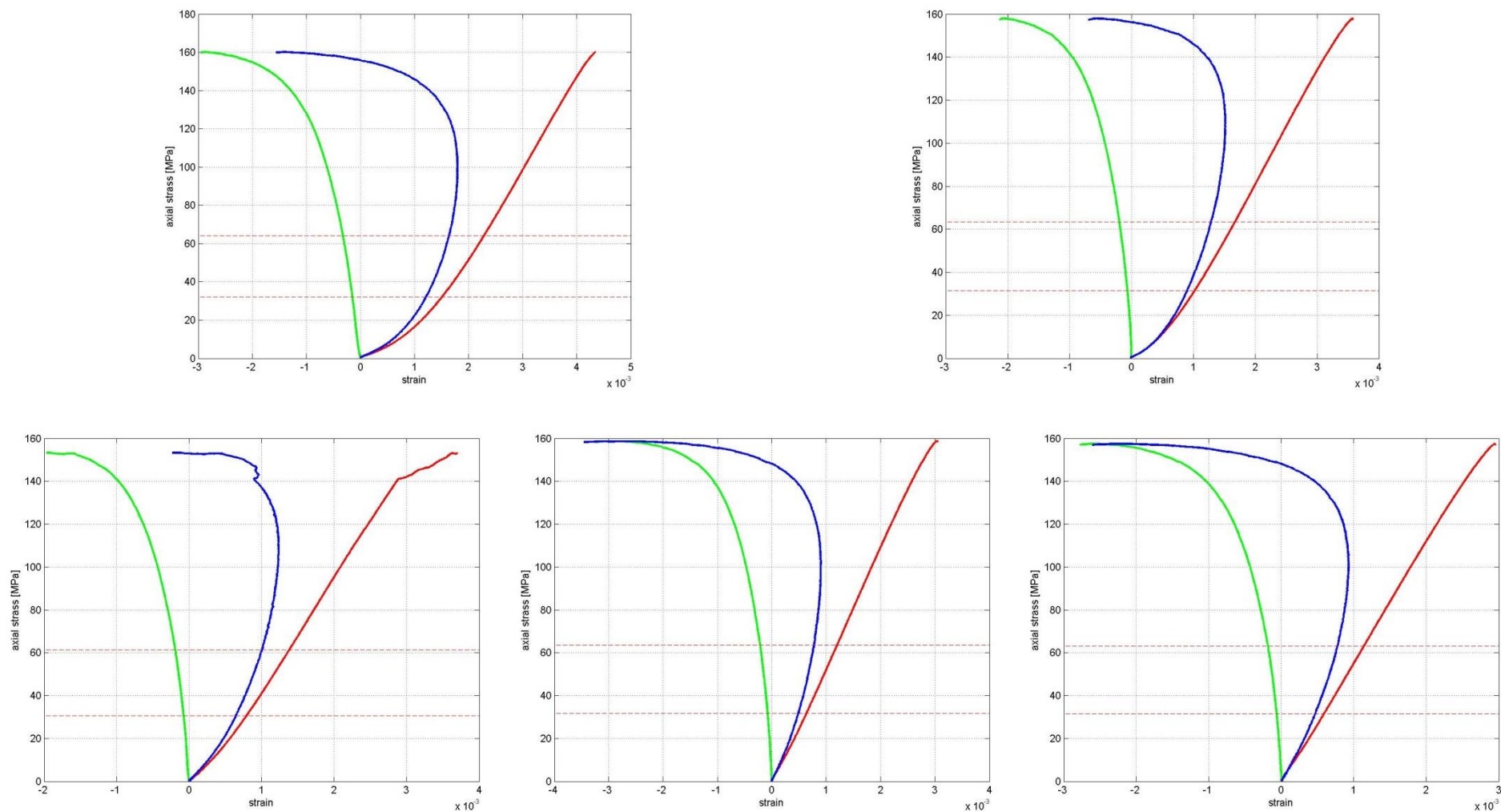
Tab. 8 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky statických modulů a pevnosti v prostém tlaku. Hodnoty uvedených vlastností pro každý měřený vzorek jsou na obrázcích 4–19.

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	E	u	v	K	Pevnost
			[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]
Březový potok	granodiorit	5	51.4 ± 5.8	21.1 ± 2.4	0.21 ± 0.02	30.2 ± 4.3	157.6 ± 2.3
Čertovka	granit	5	64.4 ± 2.7	27.2 ± 1.0	0.18 ± 0.01	34.1 ± 2.5	190.4 ± 2.1
Čihadlo	granit	5	61.4 ± 2.6	25.8 ± 0.7	0.19 ± 0.03	33.4 ± 4.2	227.4 ± 49.5
Horka	durbachit	5	19.9 ± 4.7	08.4 ± 2.0	0.18 ± 0.08	11.5 ± 4.6	73.7 ± 10.3
Hrádek	granit	5	38.3 ± 8.5	16.0 ± 3.7	0.20 ± 0.01	20.8 ± 4.2	175.6 ± 27.5
Kraví hora	migmatit	5	49.3 ± 3.1	21.1 ± 1.6	0.17 ± 0.03	24.8 ± 2.3	201.8 ± 20.0
Kraví hora	granulit	5	49.8 ± 6.1	20.9 ± 2.2	0.19 ± 0.03	27.3 ± 5.5	215.3 ± 25.4
Magdaléna	melasyenit	5	58.1 ± 7.9	23.7 ± 3.3	0.22 ± 0.02	35.6 ± 4.9	183.2 ± 8.3



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L	d	E	u	v	K	interval		Pevnost
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Březový potok granodiorit	BP1	1-113/72	-	15	99.79	49.49	41.33	16.88	0.22	24.98	32.1	64.2	160.3
	BP2	1-113/72	-	15	100.65	49.69	49.28	20.53	0.2	27.38	31.6	63.2	158.1
	BP5	2-113/72	-	-	99.73	49.72	52.21	21.88	0.19	28.39	30.7	61.3	153.4
	BP6	2-113/72	-	-	100.74	49.69	56.54	22.73	0.24	36.76	31.7	63.4	158.8
	BP9	3-84/79	-	-	100.65	49.66	57.53	23.69	0.21	33.58	31.5	63.1	157.6
							51.4 ± 5.8	21.1 ± 2.4	0.21 ± 0.02	30.2 ± 4.3			157.6 ± 2.3

Obr. 4 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granodioritu z lokality Březový potok. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

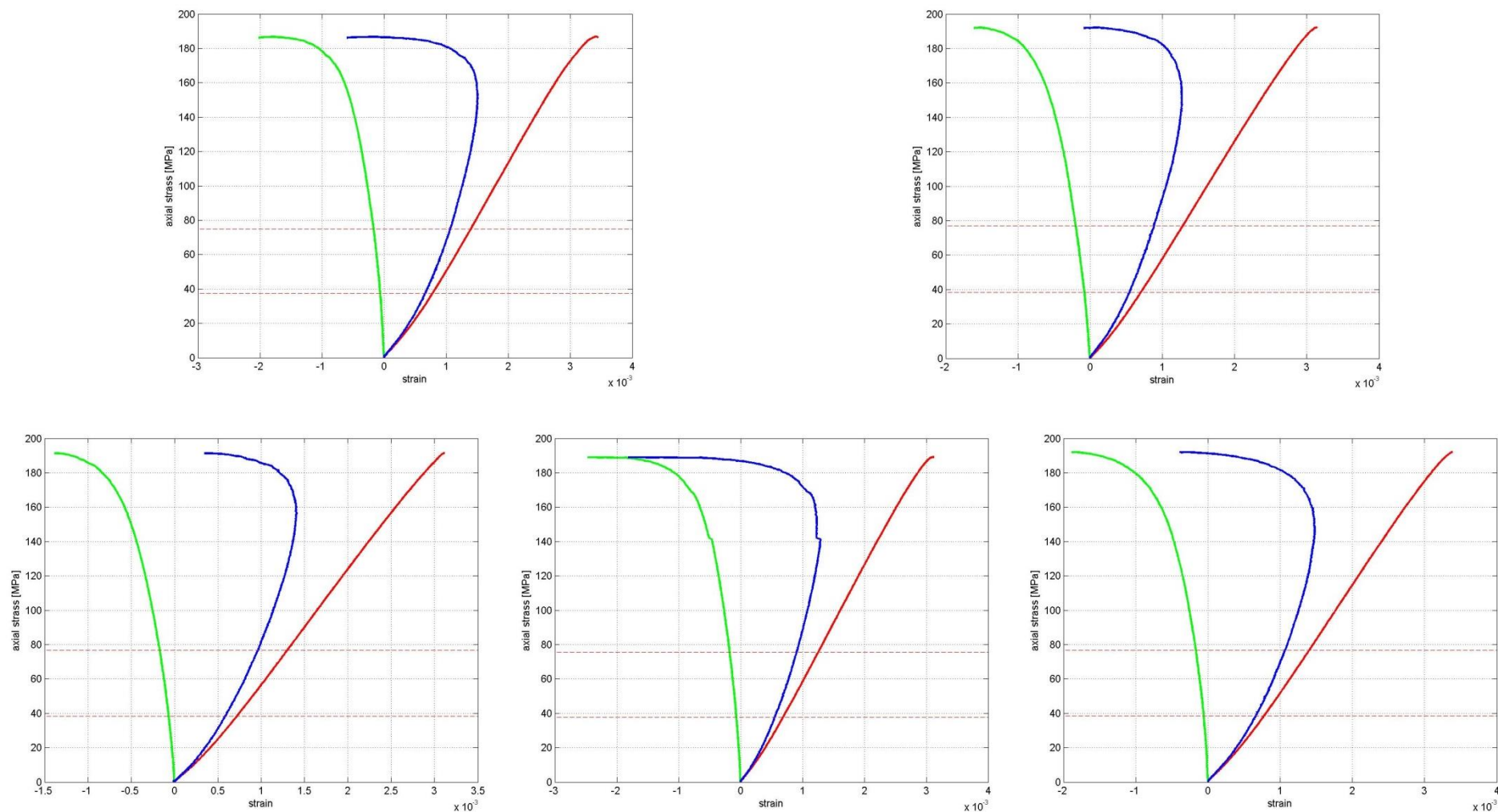


Obr. 5 Pracovní diagramy, prostý tlak, granodiorit, Březový potok. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Čertovka granit	CE11	1-308/46	-	-	100.8	49.4	60.98	26.02	0.17	30.95	37.4	74.8	186.8
	CE21	2-295/74	-	-	101.32	49.75	66.83	27.73	0.2	37.75	38.4	76.9	192.3
	CE22	2-295/74	-	-	101.02	49.75	66.05	28.07	0.18	34.04	38.3	76.7	191.5
	CE23	2-295/74	-	-	101.74	49.78	66.78	28.07	0.19	35.83	37.9	75.6	189.2
	CE31	3-127/80	-	-	100.69	49.85	61.29	26	0.18	31.77	38.5	76.8	192.1
							64.4 ± 2.7	27.2 ± 1.0	0.18 ± 0.01	34.1 ± 2.5			190.4 ± 2.1

Obr. 6 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Čertovka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

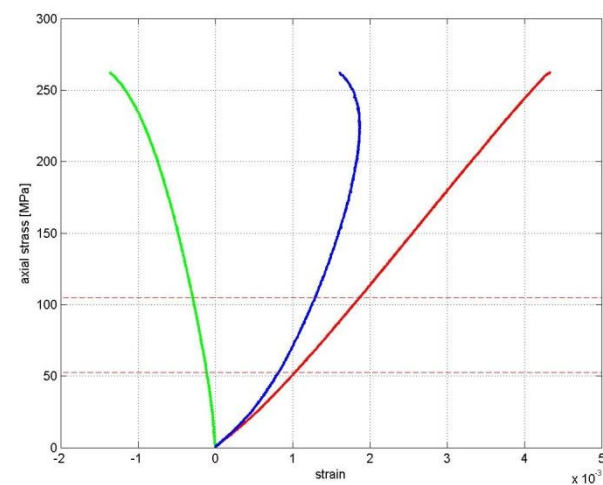
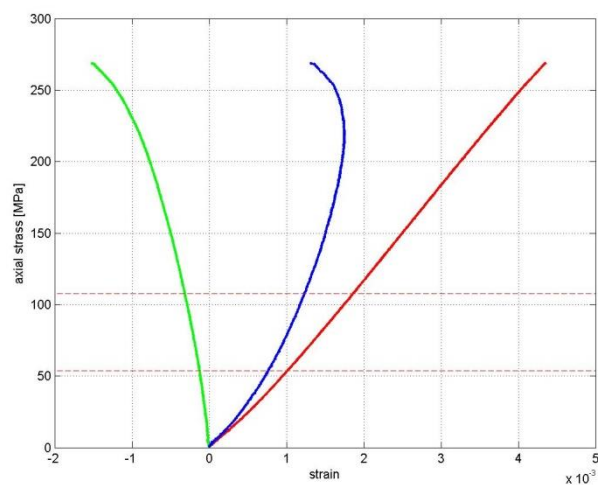
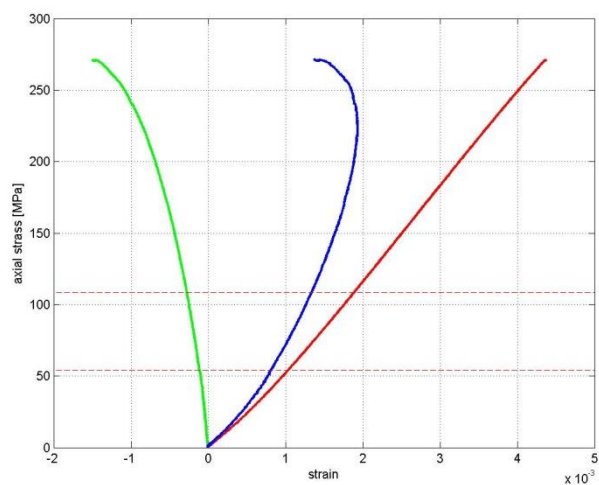
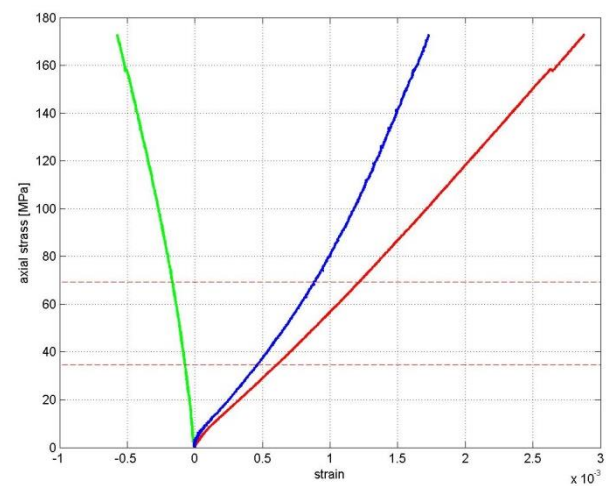
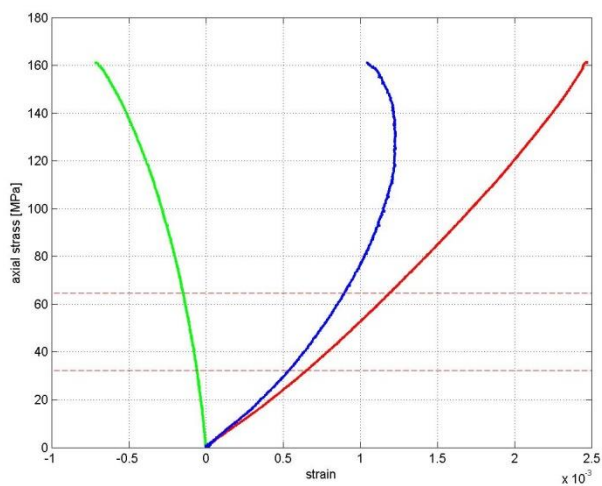


Obr. 7 Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Čertovka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

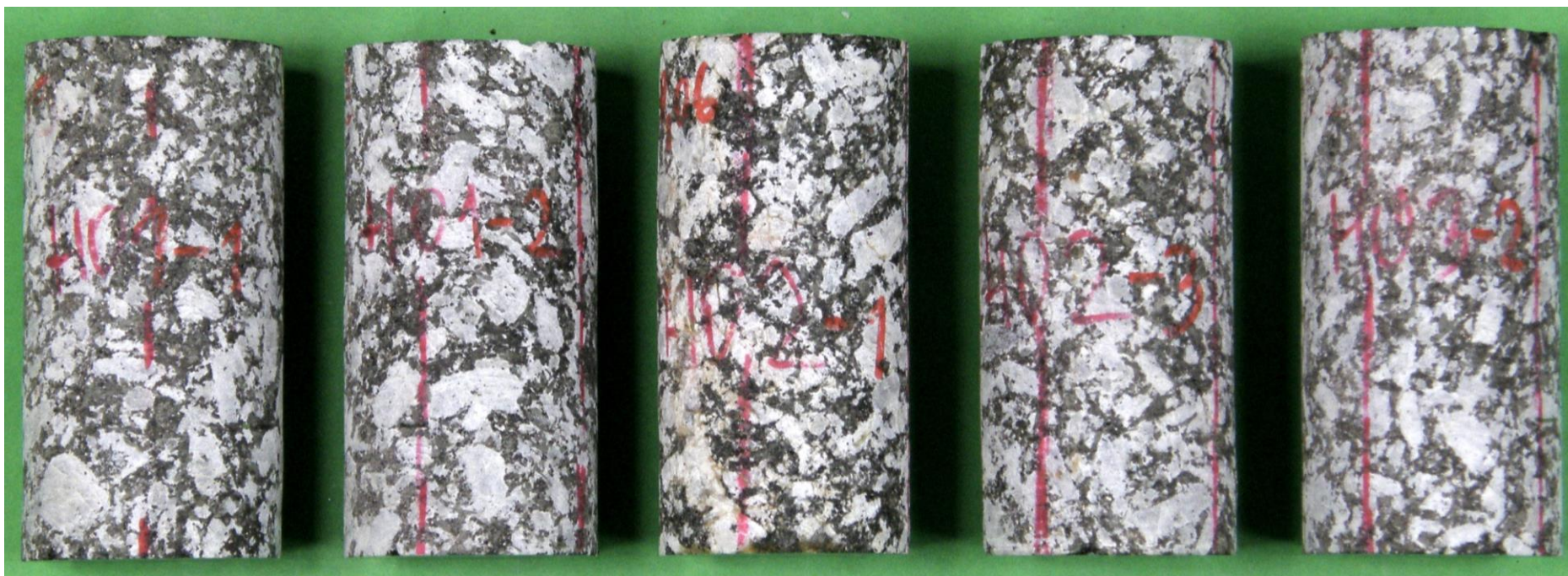


lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Čihadlo granit	CI11	1-233/13	-	-	100.08	49.52	60.09	25.76	0.17	30.04	32.3	64.5	161.2
	CI12	1-233/13	-	-	101.29	50.07	56.93	24.72	0.15	27.24	34.6	69.2	172.8
	CI21	2-233/13	-	-	100.51	50.3	63.78	26.79	0.19	34.32	54.3	108.5	271.3
	CI22	2-233/13	-	-	100.96	50.2	63.57	25.97	0.22	38.37	53.8	107.6	269.0
	CI23	2-233/13	-	-	101.08	50.3	62.65	25.69	0.22	37.2	52.5	105.0	262.5
							61.4 ± 2.6	25.8 ± 0.7	0.19 ± 0.03	33.4 ± 4.2			227.4 ± 49.5

Obr. 8 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Čihadlo. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

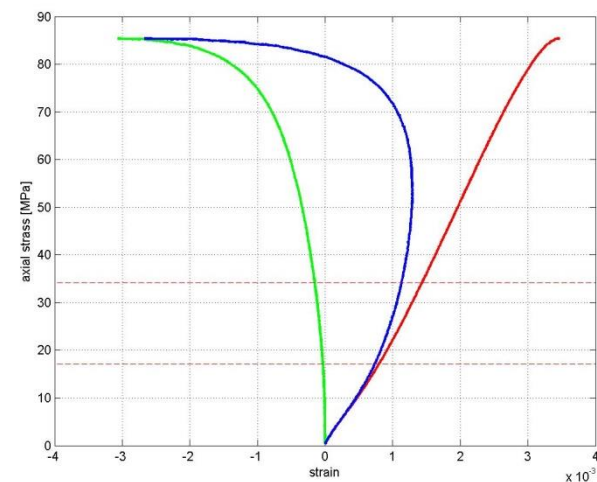
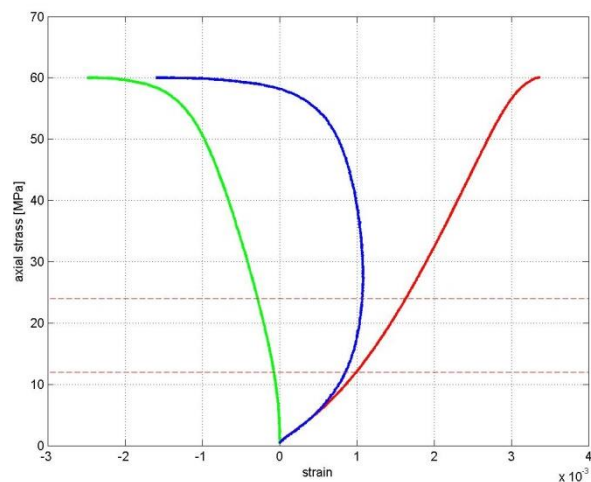
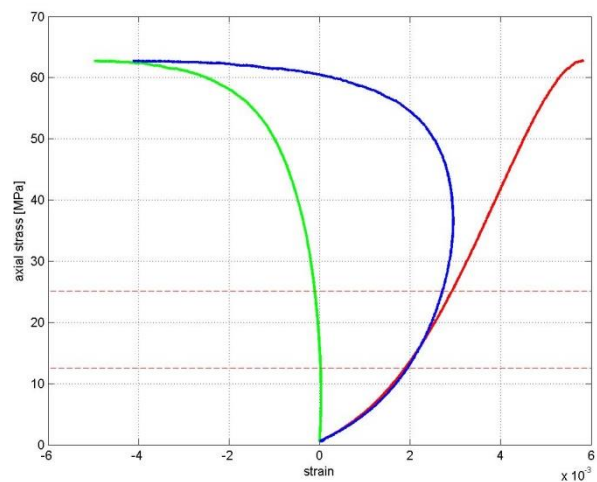
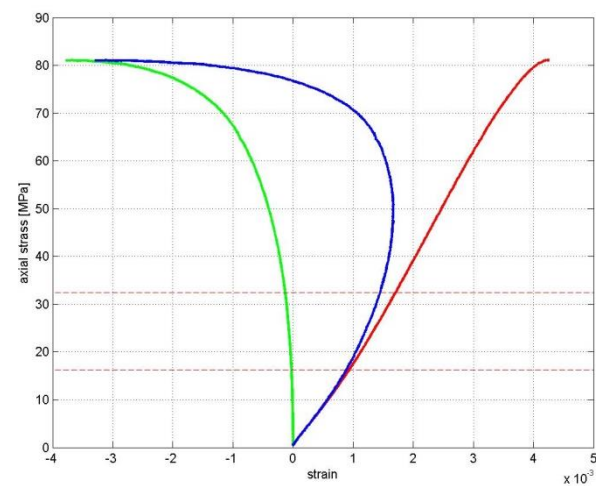
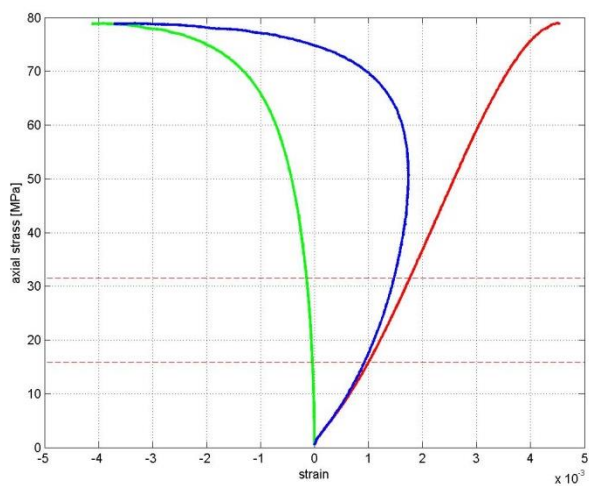


Obr. 9 Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Čihadlo. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



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

Obr. 10 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na durbachitu z lokality Horka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

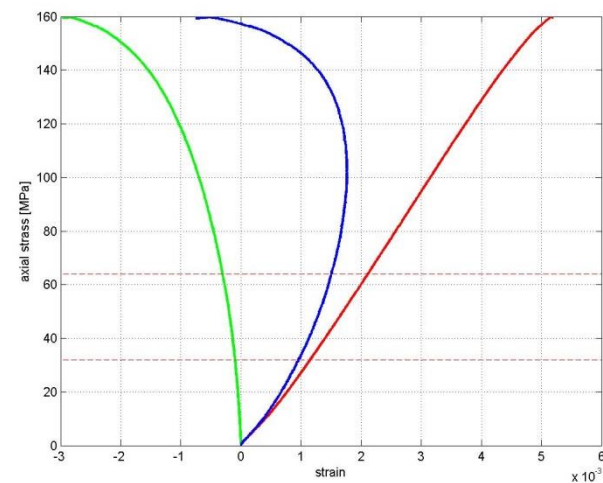
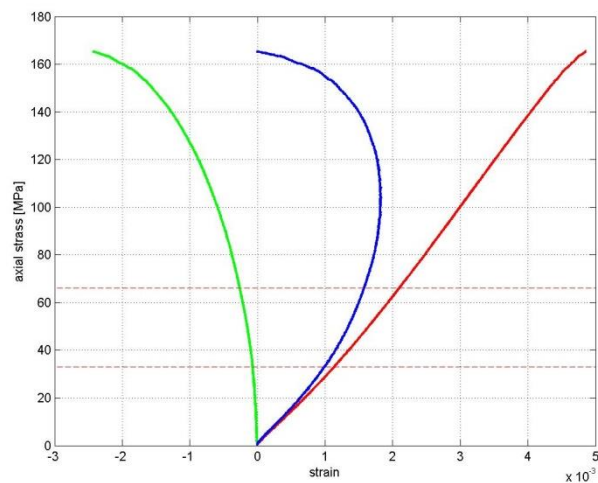
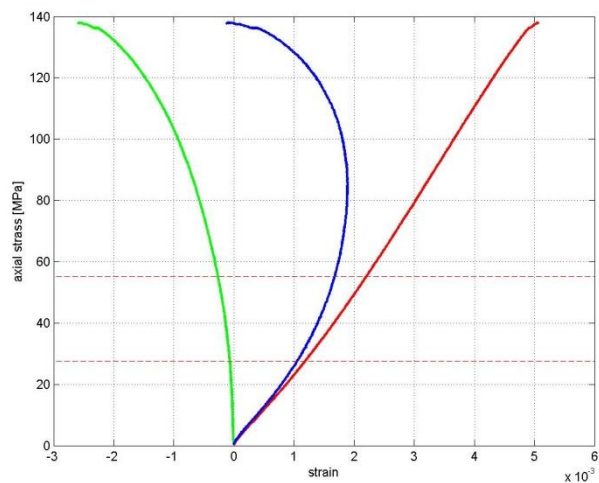
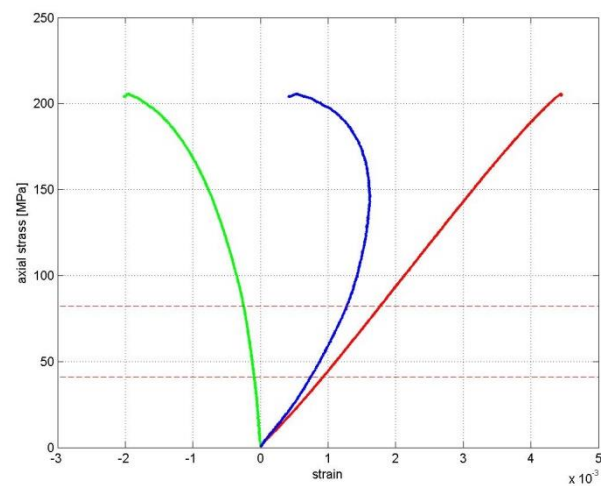
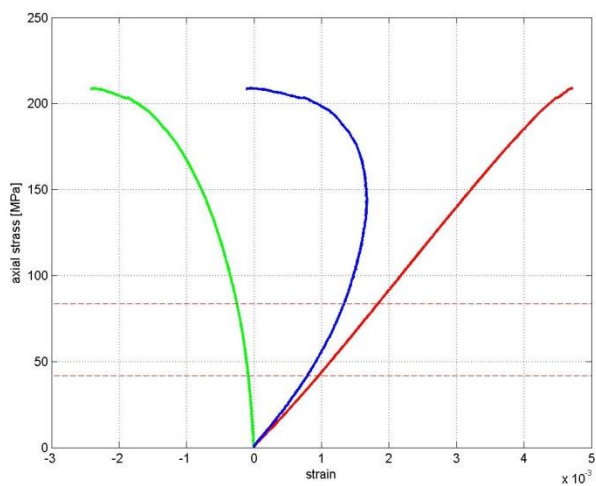


Obr. 11 Pracovní diagramy, prostý tlak, durbachit, Horka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

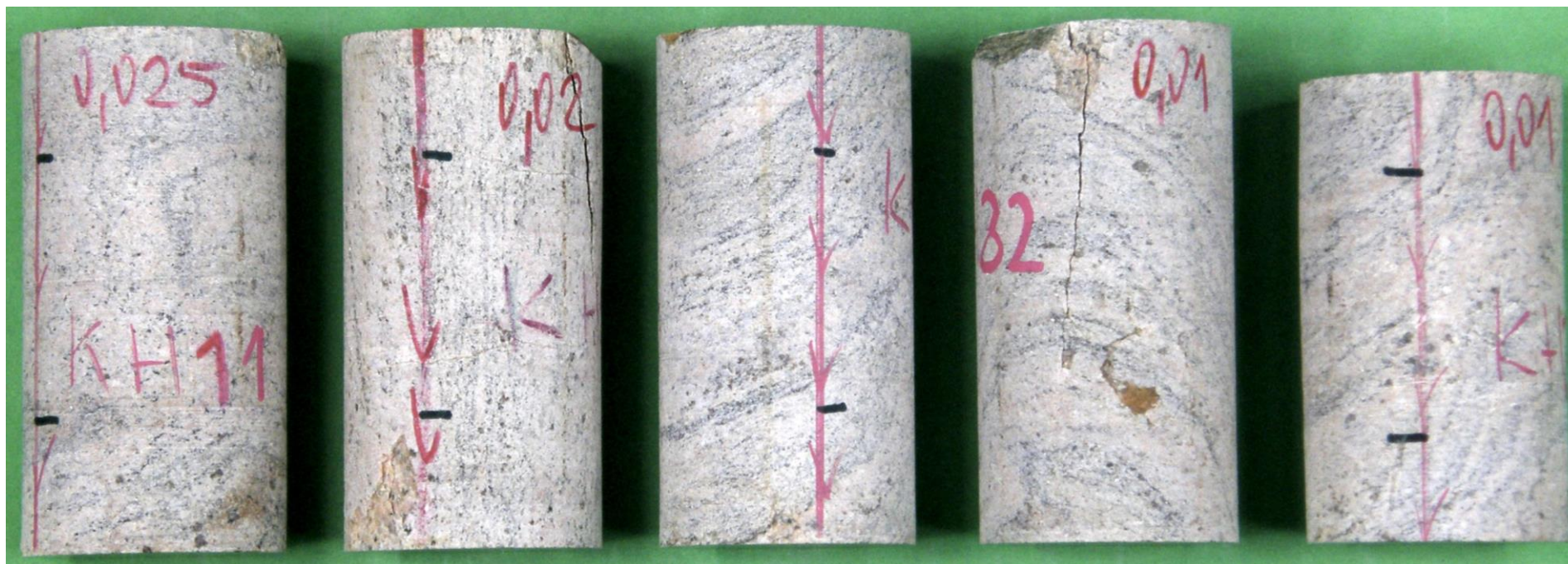


lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Hrádek granit	HR1	1-319/76	-	-	101.12	49.63	47.61	20.01	0.19	25.56	41.8	83.6	209.1
	HR2	1-319/76	-	-	100.58	49.68	48.81	20.64	0.18	25.59	41.0	82.3	205.6
	HR5	2-322/71	-	-	100.65	49.26	27.13	11.39	0.19	14.64	27.6	55.2	138.0
	HR6	2-322/71	-	-	100.79	49.3	34.32	14.33	0.2	18.89	33.1	66.1	165.4
	HR9	3-54/45	-	-	100.99	49.66	33.38	13.73	0.22	19.54	32.0	64.0	159.8
							38.3 ± 8.5	16.0 ± 3.7	0.20 ± 0.01	20.8 ± 4.2			175.6 ± 27.5

Obr. 12 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granitu z lokality Hrádek. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

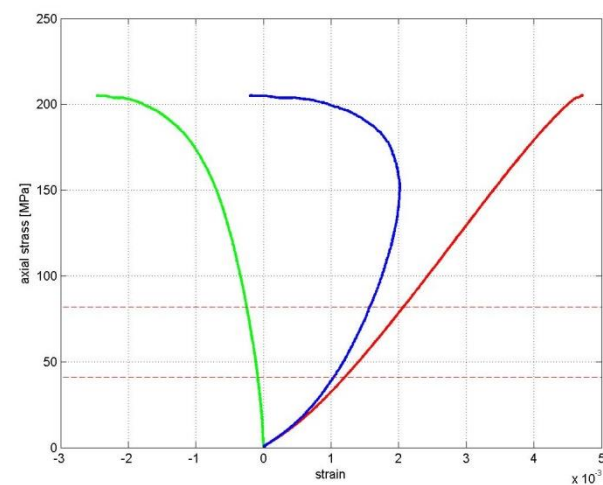
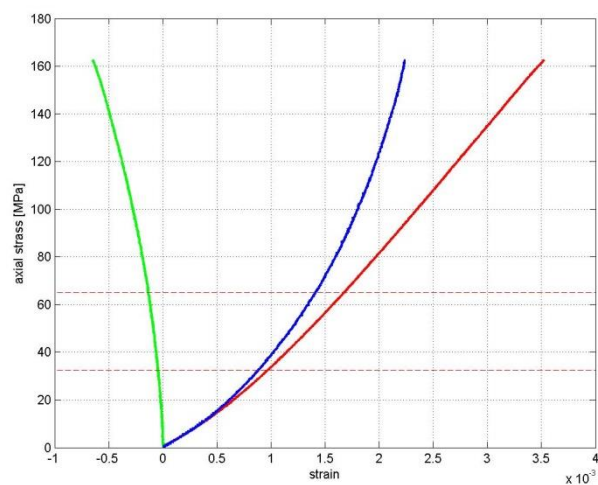
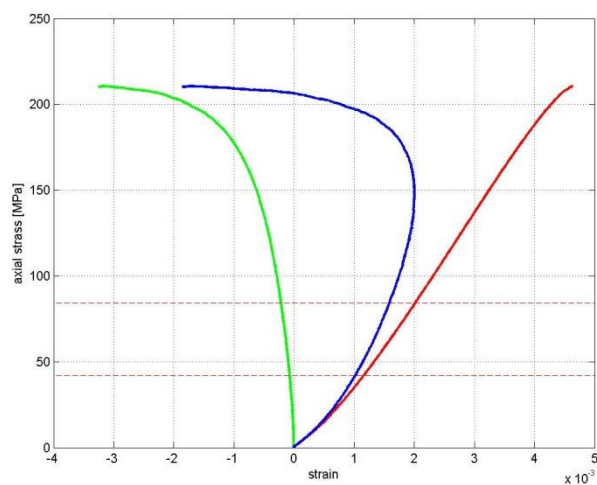
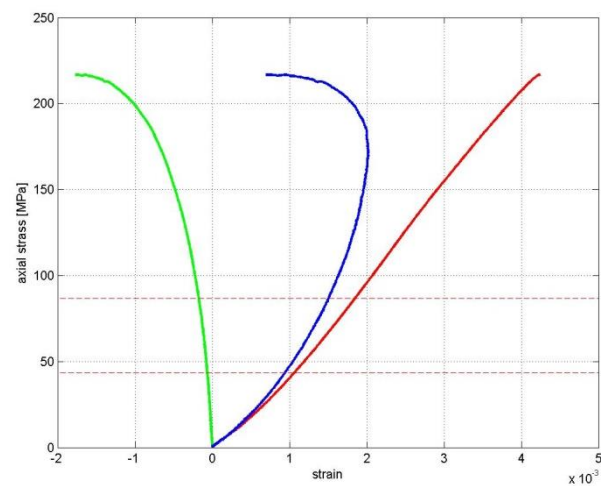
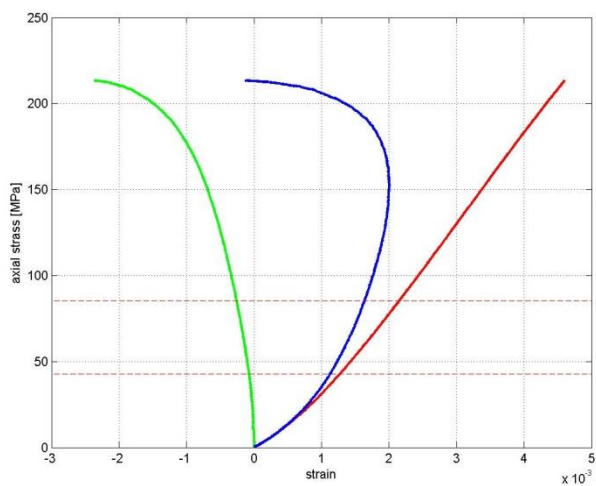


Obr. 13 Pracovní diagramy, prostý tlak, granit, Hrádek. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Kraví hora migmatit	KH11	1-224/87	30	-	101.58	50.48	48.38	20.03	0.21	27.61	42.7	85.3	213.5
	KH22A	2-224/87	90	-	101.15	50.37	55.08	24.18	0.14	25.4	43.4	86.8	216.9
	KH31	3-224/87	30	-	100.94	50.36	49.35	21.12	0.17	24.79	42.1	84.3	210.8
	KH32	3-224/87	30	-	101.29	50.47	46.32	20.58	0.13	20.59	32.5	65.0	162.6
	KH36A	3-224/87	30	-	90.27	50.45	47.22	19.81	0.19	25.52	41.0	82.0	205.2
							49.3 ± 3.1	21.1 ± 1.6	0.17 ± 0.03	24.8 ± 2.3			201.8 ± 20.0

Obr. 14 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na migmatitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

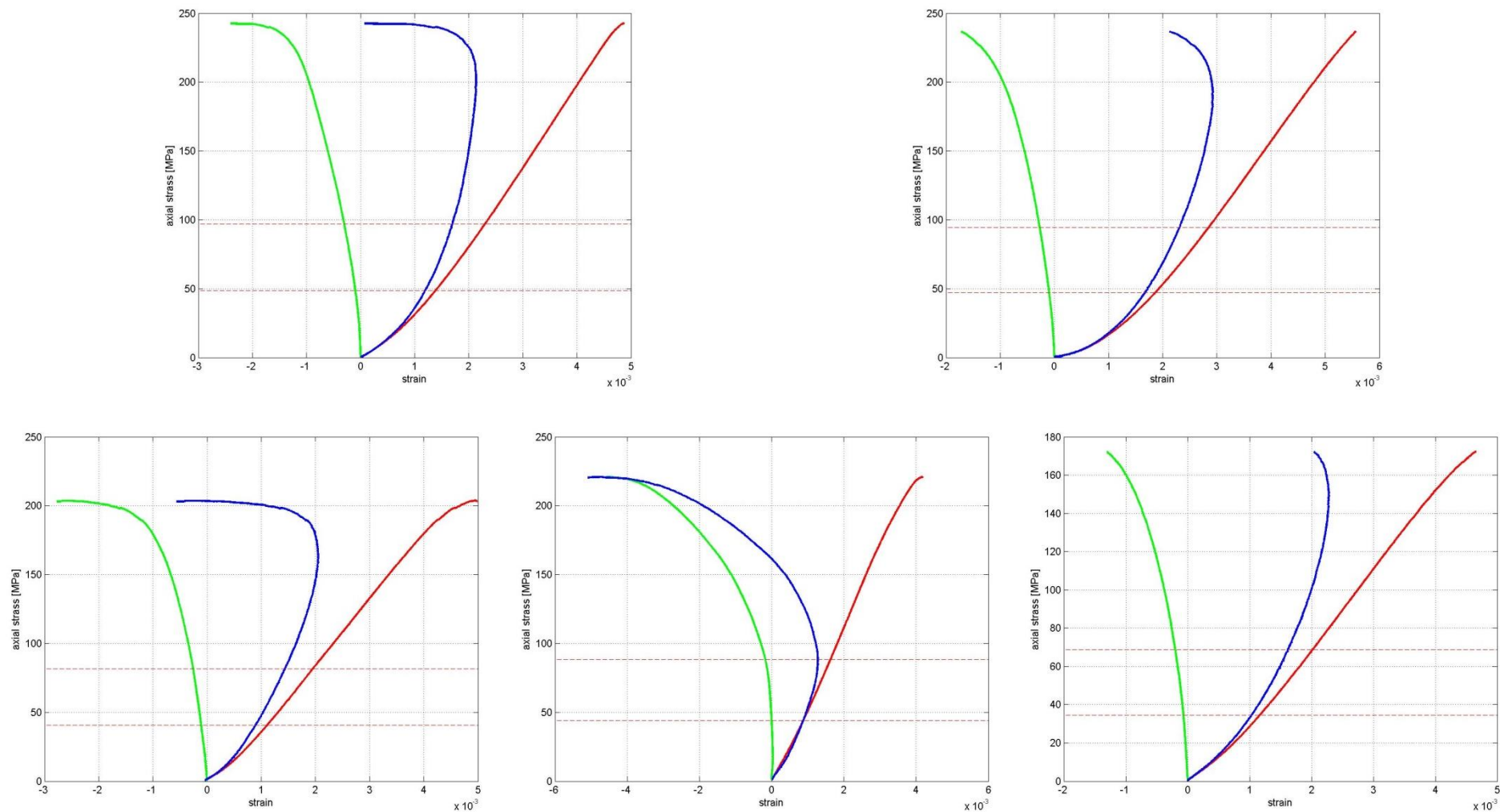


Obr. 15 Pracovní diagramy, prostý tlak, migmatit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



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

Obr. 16 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na granulitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

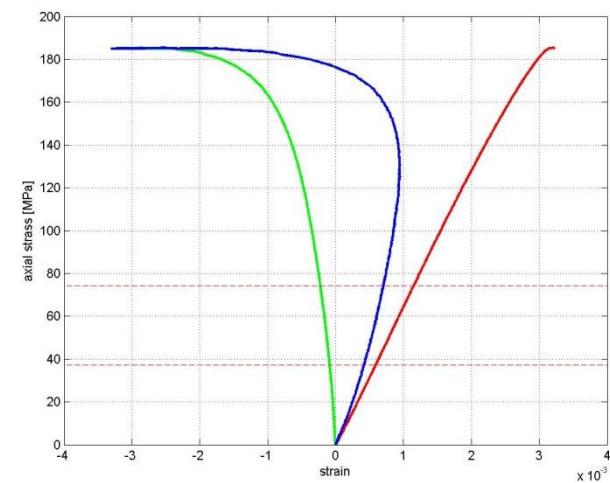
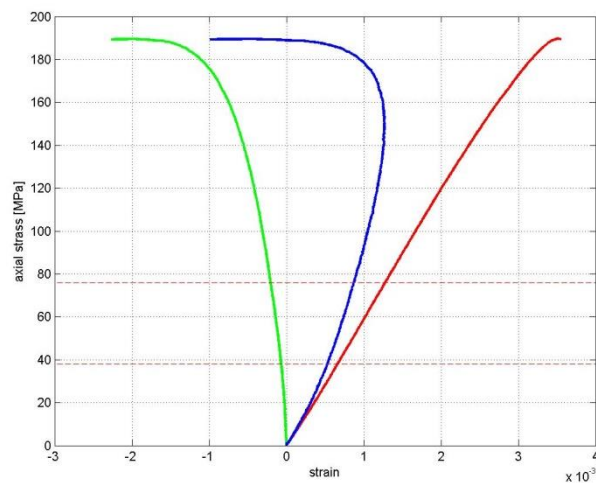
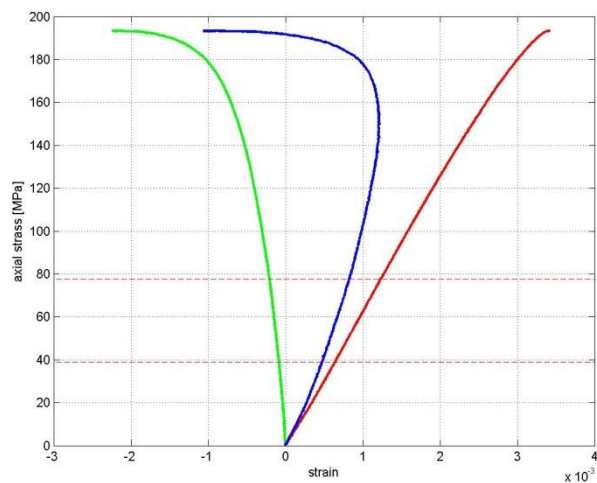
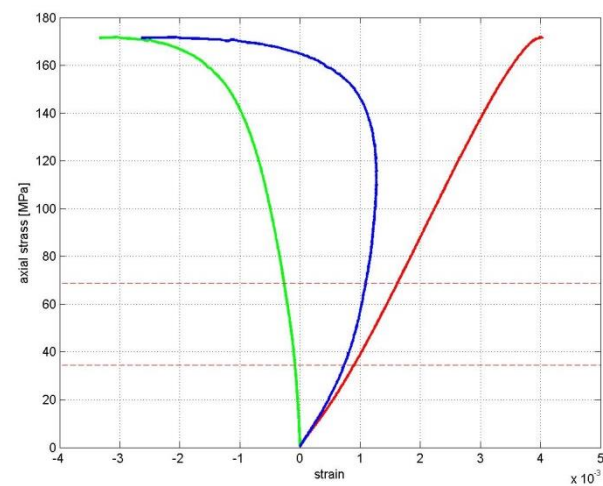
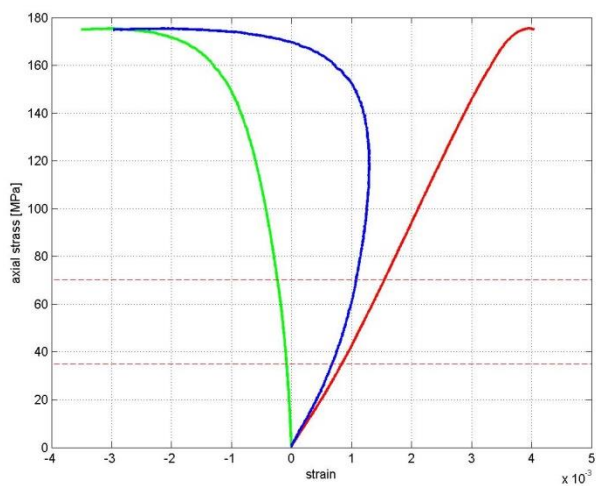


Obr. 17 Pracovní diagramy, prostý tlak, granulit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L	d	E	u	v	K	interval		Pevnost
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Magdaléna melasyenit	MG13	1-bez orientace	-	20, 45, 90	101.65	50.35	49.78	20.54	0.21	28.82	35.0	70.2	175.5
	MG14	1-bez orientace	-	20, 45, 91	100.19	50.3	47.58	18.97	0.25	32.29	34.4	68.8	171.9
	MG32	3-bez orientace	-	20, 45, 92	101.53	50.39	65.14	27.07	0.2	36.57	38.7	77.4	193.5
	MG34	3-bez orientace	-	20, 45, 93	101.57	50.36	61.76	25.27	0.22	37.04	37.9	75.8	189.7
	MG37	3-bez orientace	-	20, 45, 94	90.87	50.48	66.33	26.66	0.24	43.2	37.1	74.2	185.5
							58.1 ± 7.9	23.7 ± 3.3	0.22 ± 0.02	35.6 ± 4.9			183.2 ± 8.3

Obr. 18 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky zkoušek v prostém tlaku měřených na melasyenitu z lokality Magdaléna. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.



Obr. 19 Pracovní diagramy, prostý tlak, melasyenit, Magdaléna. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

5 Triaxiální zkoušky

Válcová zkušební tělíska s výškou 100 mm a průměrem 50 mm byla z dodaných horninových bloků (kapitola 1.1) připravena a orientována tak, jak je popsáno v kapitole 1.3.

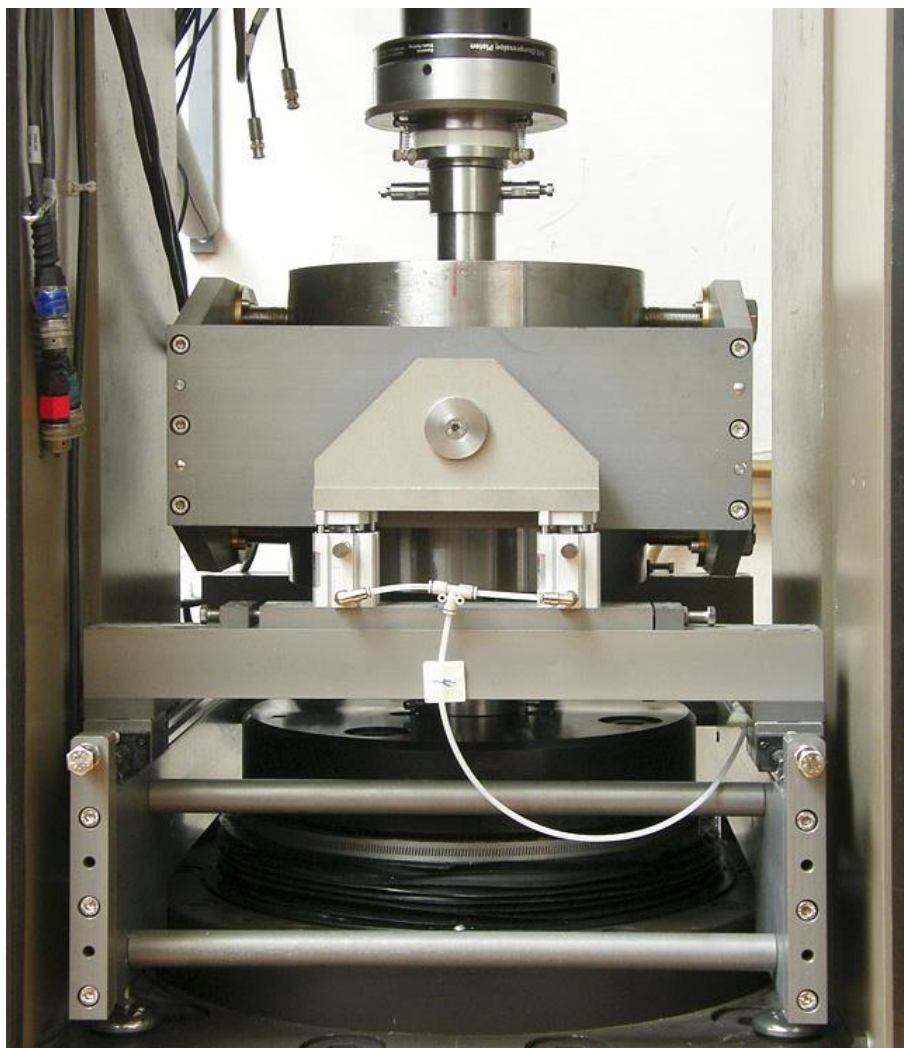
Triaxiální tlakové zkoušky byly provedeny podle norem a pracovních postupů uvedených v tabulce 2. Plášťový tlak byl 13 MPa. Osová deformace byla měřena pomocí dvou LVDT snímačů. Deformace průměru byla měřena cantileverem ve dvou na sebe kolmých směrech. Snímače deformací a osově síly jsou pravidelně kalibrované (Tab. 3).

Pro realizaci triaxiálních zkoušek byl zatěžovací rám MTS 815 doplněn o triaxiální komoru Ergotech (Obr. 20). Triaxiální zkoušky byly prováděny při plášťovém tlaku 13 MPa, který odpovídá litostatickému tlaku v hloubce uložště (cca 500 m). Do 13 MPa byl vzorek zatěžován rovnoměrně plášťovým a osovým napětím. Po dosažení 13 MPa byl plášťový tlak udržován konstantní a osově napětí rostlo až do porušení. Osově zatěžování bylo řízeno pravidelným přírůstkem deformace, který byl navržen tak, aby k porušení vzorku došlo do 15 minut po začátku zatěžování. Tělíska byla zkoušena ve vysušeném stavu (24 hodin, 105 °C). V průběhu zatěžování byly pomocí LVDT a cantileveru měřeny podélná a obvodová deformace, které byly, s ohledem na velikost vzorku, přepočteny na relativní deformace. Naměřené relativní deformace jsou spolu s fotografiemi porušených vzorků na obrázcích 21–36.

Z naměřených relativních deformací byly spočteny statické elastické konstanty obdobně jako při zkouškách v prostém tlaku (vztahy 2 a 3). Moduly byly určeny v oblasti lineární závislosti mezi napětím a relativními deformacemi (20–40 % triaxiální pevnosti). Opět se jedná o elastické konstanty, které popisují chování homogenního izotropního materiálu. Zejména granulit a migmatit z Kraví hory však těmito předpokladům z důvodu anizotropie neodpovídají. Vliv anizotropie horninové struktury na elastické parametry bude obdobný jako u zkoušek v prostém tlaku (viz Obr. 3).

Na horninových vzorcích byly také určeny sklony foliace a primárních trhlin. Sklon je měřený od horizontální roviny. Pokud je za sklonem u trhlin uvedeno písmeno f , jsou diskontinuity paralelní s foliáci.

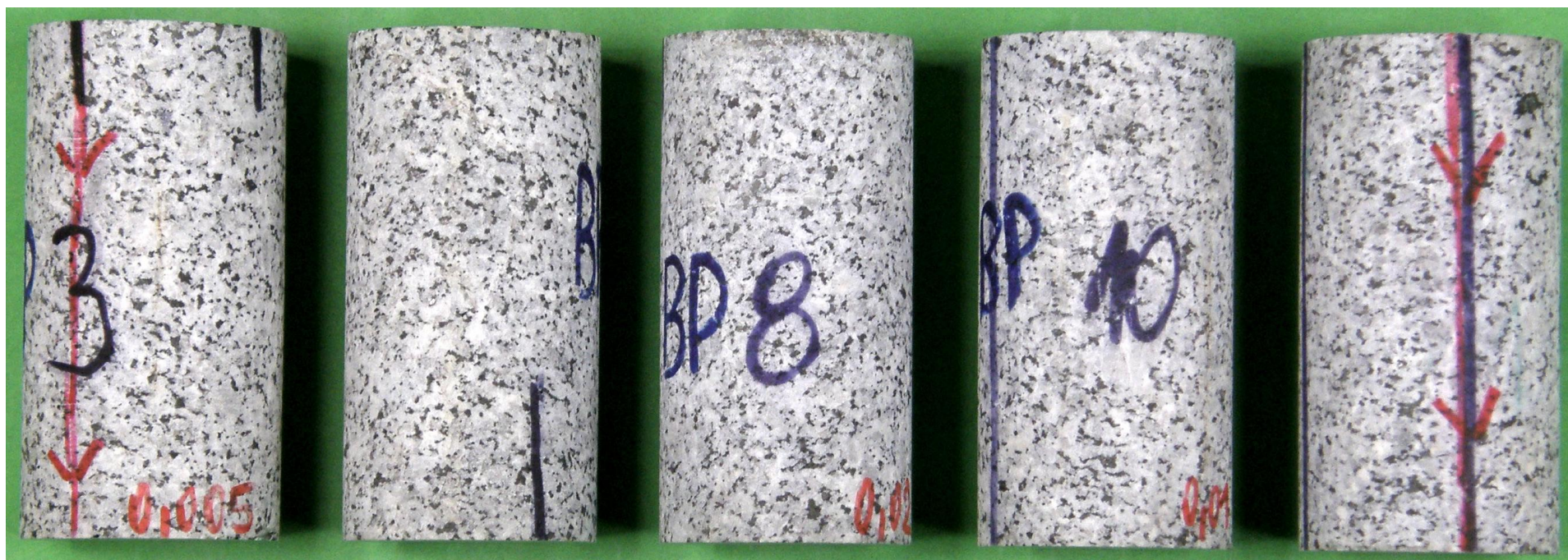
V Tab. 9 jsou shrnuty naměřené pevnosti a stanovené statické moduly. Za znakem \pm je uvedena směrodatná odchylka pro pět vzorků měřených v rámci každého horninového typu. Hodnoty stanovené pro každý měřený vzorek jsou v tabulkách pod fotografiemi porušených vzorků. Fotografie a stanovené parametry jsou doplněné o pracovní diagramy proběhlých triaxiálních zkoušek. V elektronických přílohách jsou měřená napěťo-deformační data i fotografie porušených vzorků. Napěťový interval pro stanovení elastických parametrů (20–40 % z triaxiální pevnosti) je uveden v obrázkových tabulkách a vyznačen červenou čárkovanou čarou v pracovních diagramech.



Obr. 20 Triaxiální komora Ergotech osazená v zatěžovacím rámu MTS 815

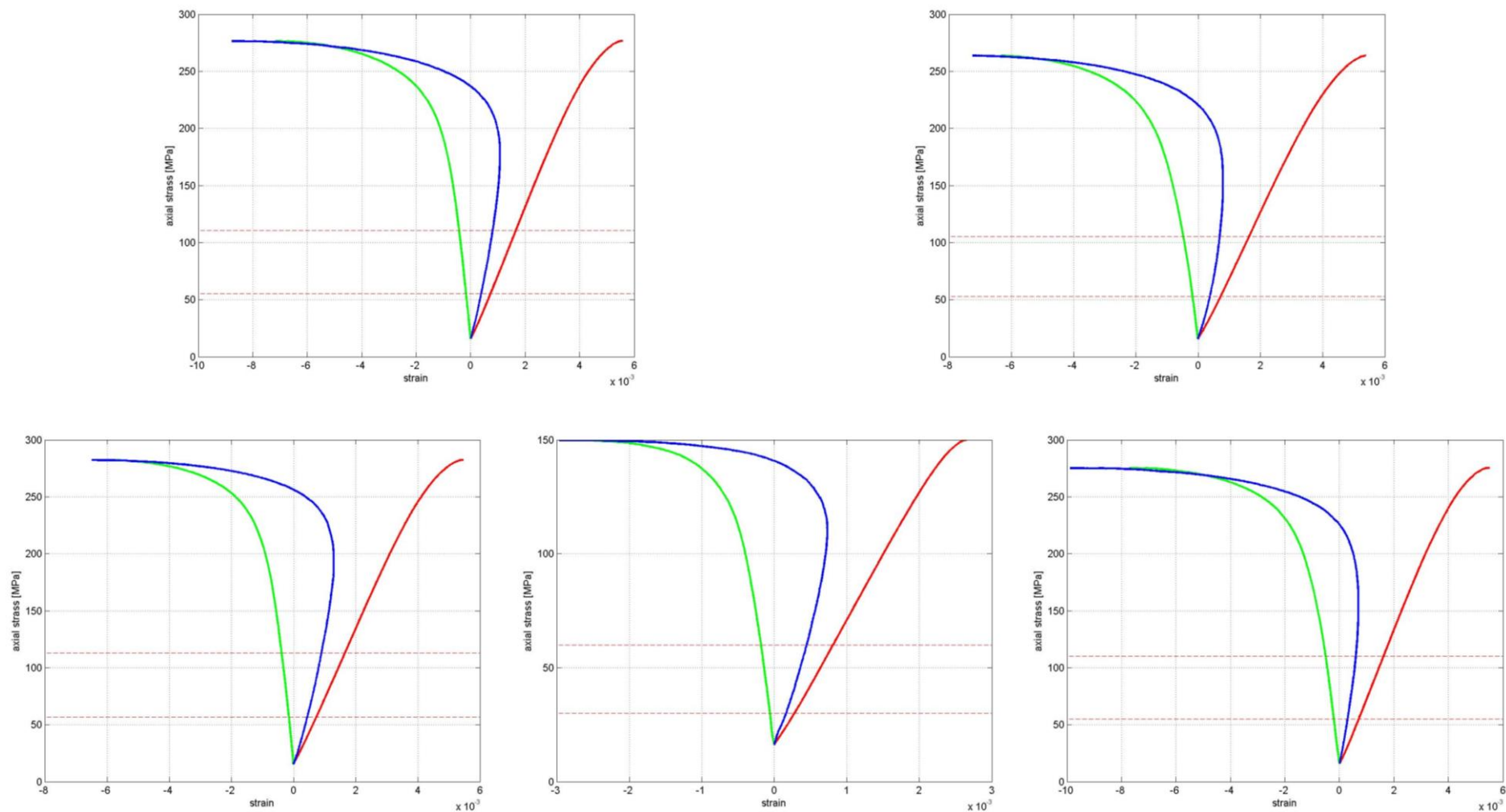
Tab. 9 Průměrné hodnoty a směrodatné odchytky statických modulů a pevností stanovené při triaxiální zkoušce za plášťového tlaku 13 MPa. Hodnoty uvedených vlastností pro každý měřený vzorek jsou na obrázcích 21–36.

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	E	u	v	K	Pevnost
			[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]
Březový potok	granodiorit	5	59.1 ± 1.8	23.1 ± 0.9	0.28 ± 0.04	46.9 ± 8.8	249.7 ± 50.2
Čertovka	granit	5	65.5 ± 1.6	26.5 ± 1.1	0.24 ± 0.03	42.3 ± 3.5	311.0 ± 6.8
Čihadlo	granit	5	64.9 ± 1.3	26.2 ± 1.4	0.24 ± 0.07	45.7 ± 17.4	452.1 ± 7.3
Horka	durbachit	5	34.6 ± 3.8	13.7 ± 1.7	0.26 ± 0.03	24.5 ± 2.9	152.6 ± 10.8
Hrádek	granit	5	50.5 ± 4.1	19.9 ± 1.8	0.27 ± 0.03	37.5 ± 6.1	317.2 ± 18.9
Kraví hora	migmatit	5	57.6 ± 1.6	23.9 ± 0.7	0.20 ± 0.01	32.6 ± 1.2	343.6 ± 15.5
Kraví hora	granulit	5	50.4 ± 7.2	21.1 ± 2.9	0.19 ± 0.01	27.5 ± 4.8	309.8 ± 38.6
Magdaléna	melasyenit	5	56.8 ± 4.8	23.2 ± 2.5	0.22 ± 0.03	34.8 ± 2.6	247.6 ± 33.5



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Březový potok granodiorit	BP3	1-113/72	-	15	100.36	49.71	59.73	23.5	0.27	43.46	55.3	110.6	276.6
	BP4	1-113/72	-	15	100.19	49.71	57.42	21.63	0.33	55.46	52.8	105.4	263.9
	BP8	2-113/72	-	-	100.22	49.68	61.18	24.42	0.25	41.21	56.4	113.0	282.5
	BP10	2-113/72	-	-	100.22	49.65	56.68	22.97	0.23	35.48	30.0	60.0	150.0
	BP11	3-84/79	-	-	99.8	49.65	60.53	22.79	0.33	58.67	55.1	110.3	275.5
							59.1 ± 1.8	23.1 ± 0.9	0.28 ± 0.04	46.9 ± 8.8			249.7 ± 50.2

Obr. 21 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granodioritu z lokality Březový potok. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

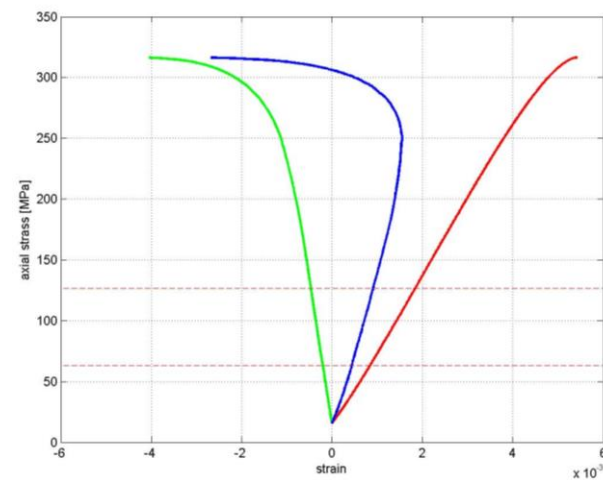
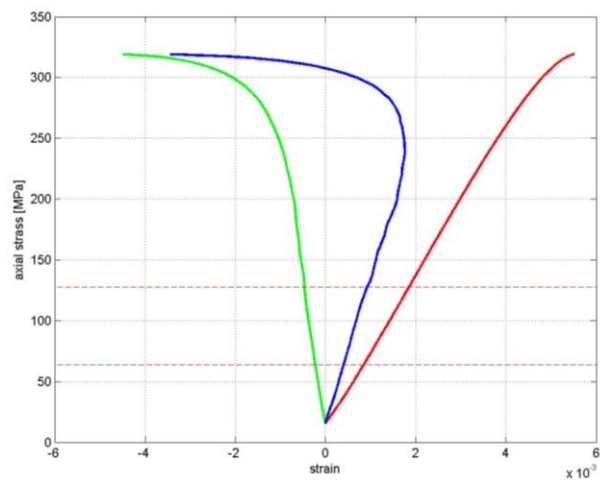
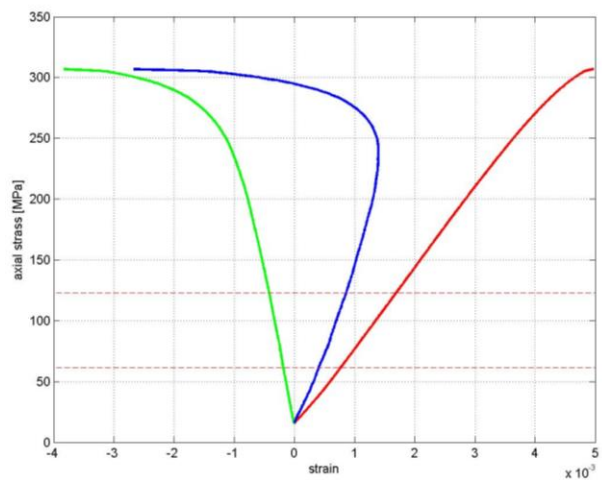
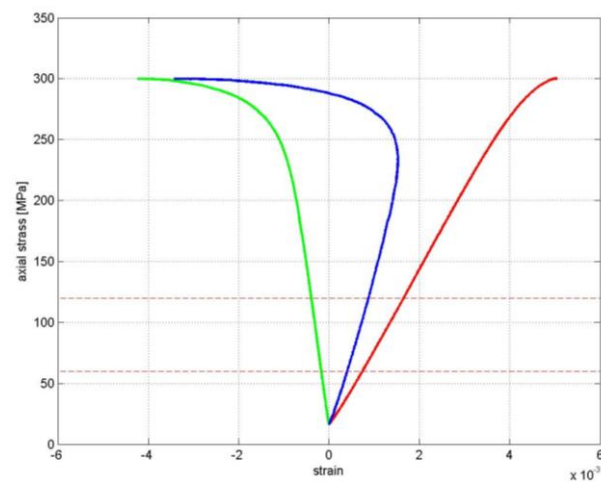
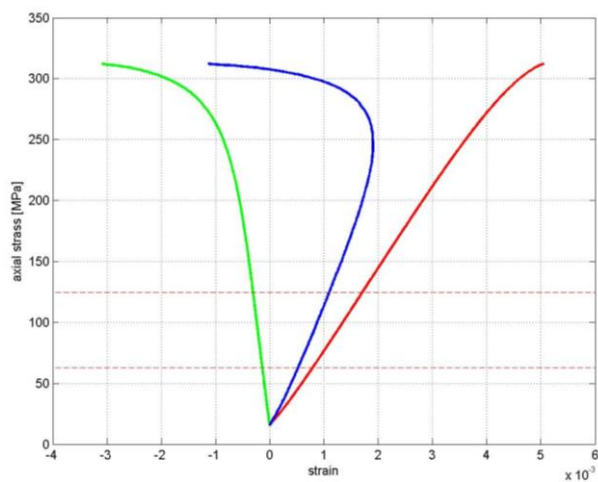


Obr. 22 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granodiorit, Březový potok. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Čertovka granit	CE24	2-295/74	-	-	100.46	49.92	67.57	28.48	0.19	35.89	62.5	124.9	312.3
	CE25	2-295/74	-	-	100.46	49.86	66	26.59	0.24	42.48	59.9	119.9	300.1
	CE26	2-295/74	-	-	101.56	49.9	66.74	26.5	0.26	46.21	61.4	122.8	307.0
	CE32	3-127/80	-	-	100.84	49.79	63.77	25.52	0.25	42.44	63.9	127.8	319.2
	CE33	3-127/80	-	-	101.12	49.85	63.57	25.2	0.26	44.42	63.3	126.6	316.5
							65.5 ± 1.6	26.5 ± 1.1	0.24 ± 0.03	42.3 ± 3.5			311.0 ± 6.8

Obr. 23 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Čertovka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

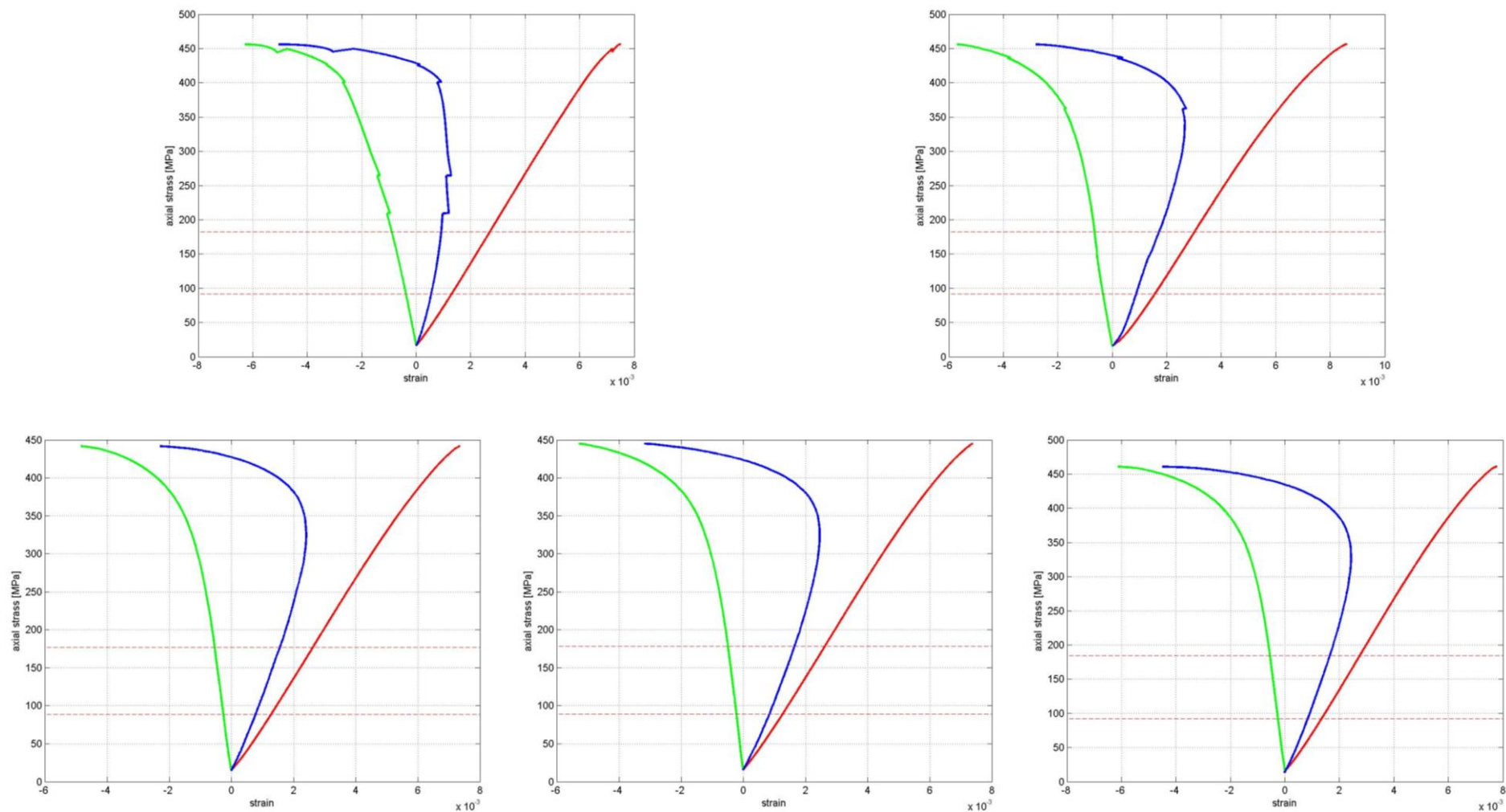


Obr. 24 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Čertovka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

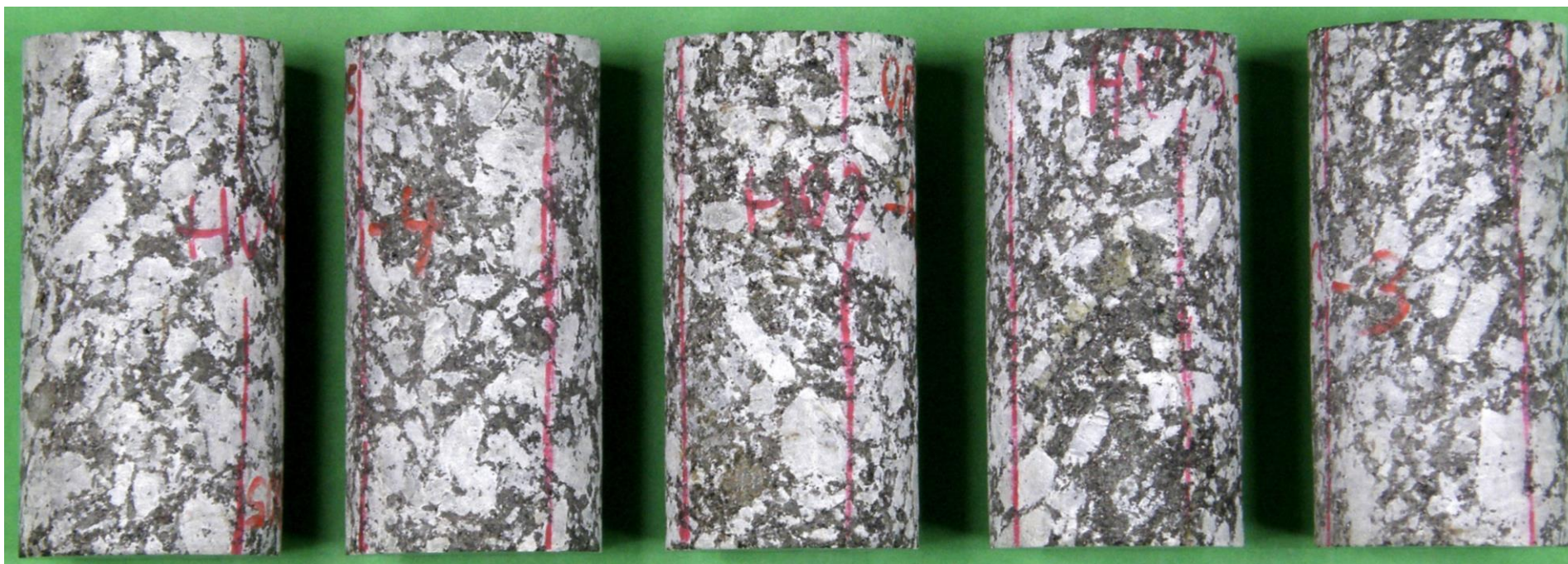


lokalita typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Čihadlo granit	CI13A	1-233/13	-	-	100.86	50.05	64.73	23.69	0.37	80.51	91.4	182.5	456.4
	CI14A	1-233/13	-	-	101.26	50.08	62.33	25.78	0.21	35.67	91.3	182.4	456.3
	CI24	2-233/13	-	-	101.29	50.35	65.69	27.11	0.21	37.98	88.4	176.8	441.8
	CI25	2-233/13	-	-	100.12	50.2	65.68	27.32	0.2	36.77	89.0	178.1	445.3
	CI26	2-233/13	-	-	99.75	50.24	65.86	27.24	0.21	37.73	92.3	184.5	461.0
							64.9 ± 1.3	26.2 ± 1.4	0.24 ± 0.07	45.7 ± 17.4			452.1 ± 7.3

Obr. 25 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Čihadlo. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

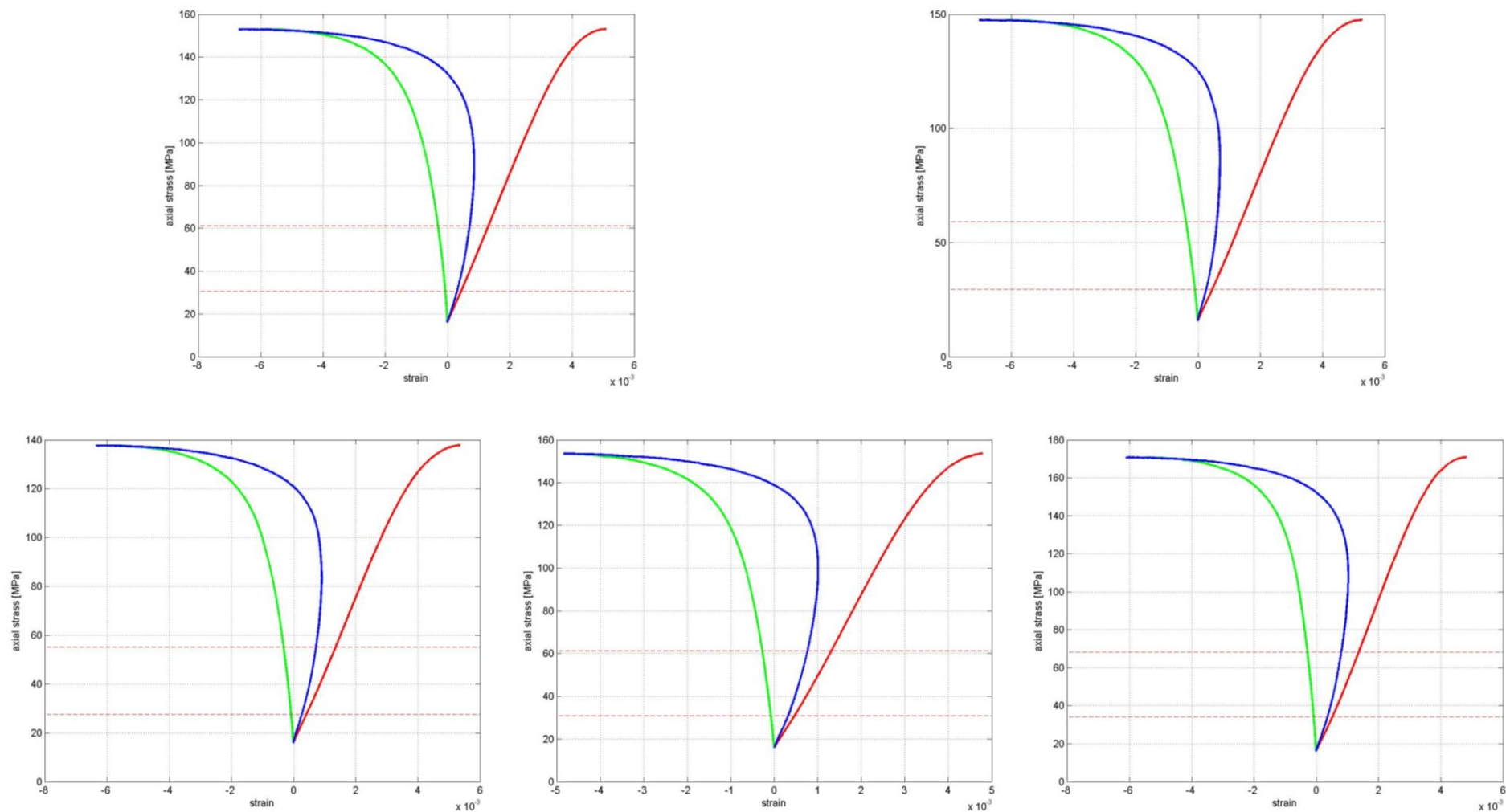


Obr. 26 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Čihadlo. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

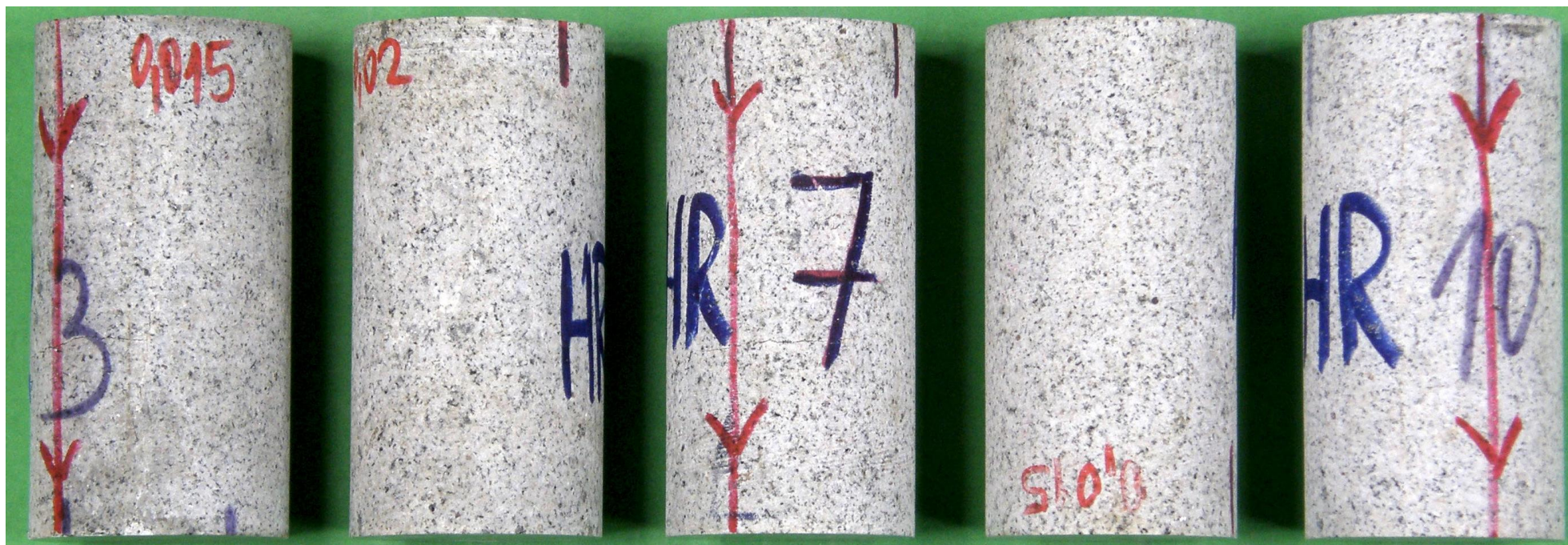


lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L	d	E	u	v	K	interval		Pevnost
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Horka durbachit	HO13	1-184/60	-	-	100.92	49.64	34.88	13.72	0.27	25.41	30.6	61.2	153.1
	HO14	1-184/60	-	-	101.28	49.47	32.17	12.27	0.31	28.31	29.5	59.1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

Obr. 27 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na durbachitu z lokality Horka. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

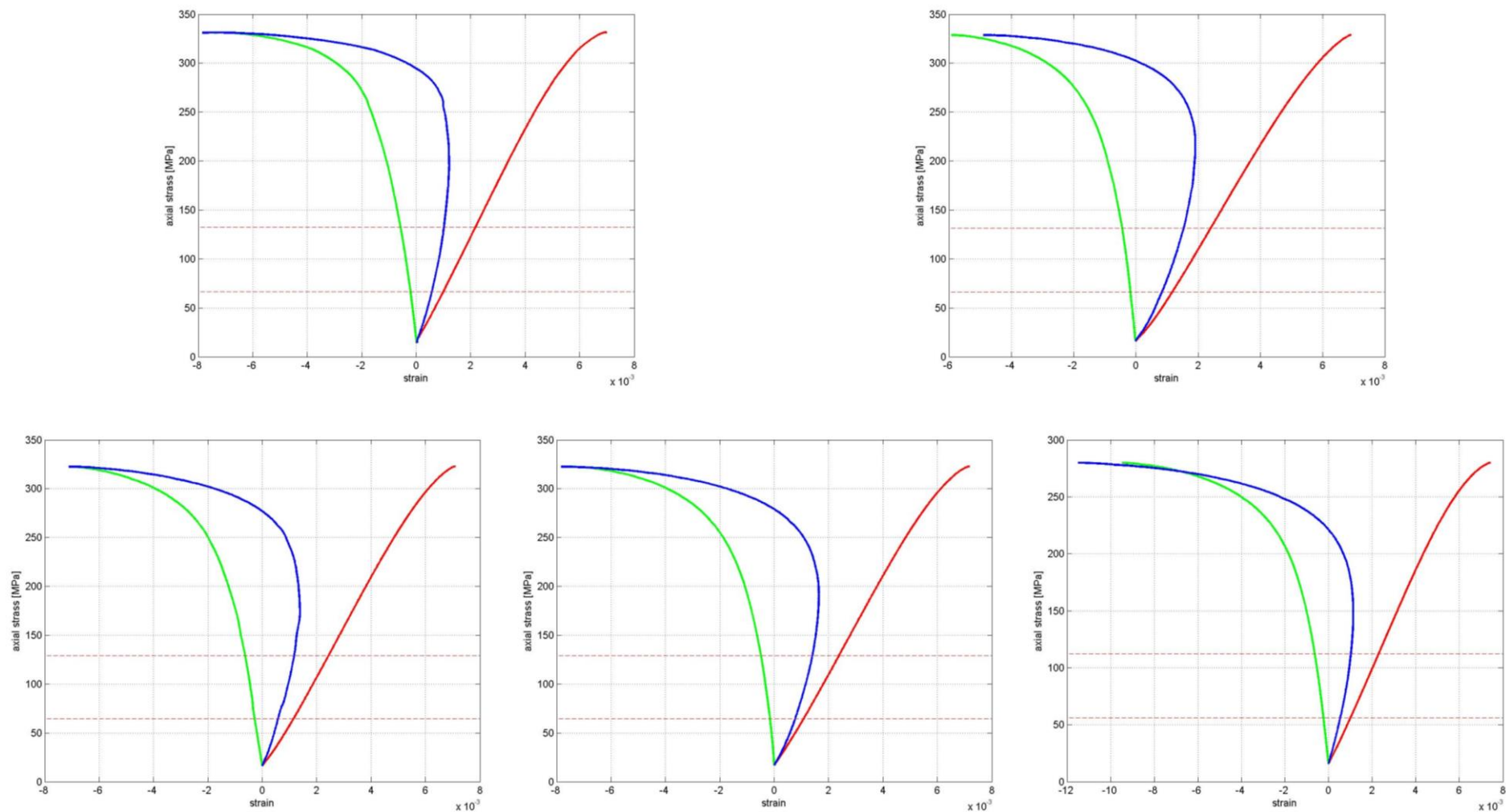


Obr. 28 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, durbachit, Horka. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L	d	E	u	v	K	interval		Pevnost
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Hrádek granit	HR3	1-319/76	-	-	100.45	49.65	55.89	21.35	0.31	48.82	66.3	132.5	331.5
	HR4	1-319/76	-	-	100.66	49.62	53.03	21.8	0.22	31.18	65.8	131.6	328.9
	HR7	2-322/71	-	-	100.66	49.32	50.35	19.88	0.27	35.96	64.5	129.1	322.8
	HR8	2-322/71	-	-	100.65	49.38	49.9	19.9	0.25	33.8	64.5	129.1	322.7
	HR10	3-54/45	-	-	100.82	49.66	43.54	16.63	0.31	37.96	56.0	112.1	280.1
							50.5 ± 4.1	19.9 ± 1.8	0.27 ± 0.03	37.5 ± 6.1			317.2 ± 18.9

Obr. 29 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granitu z lokality Hrádek. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

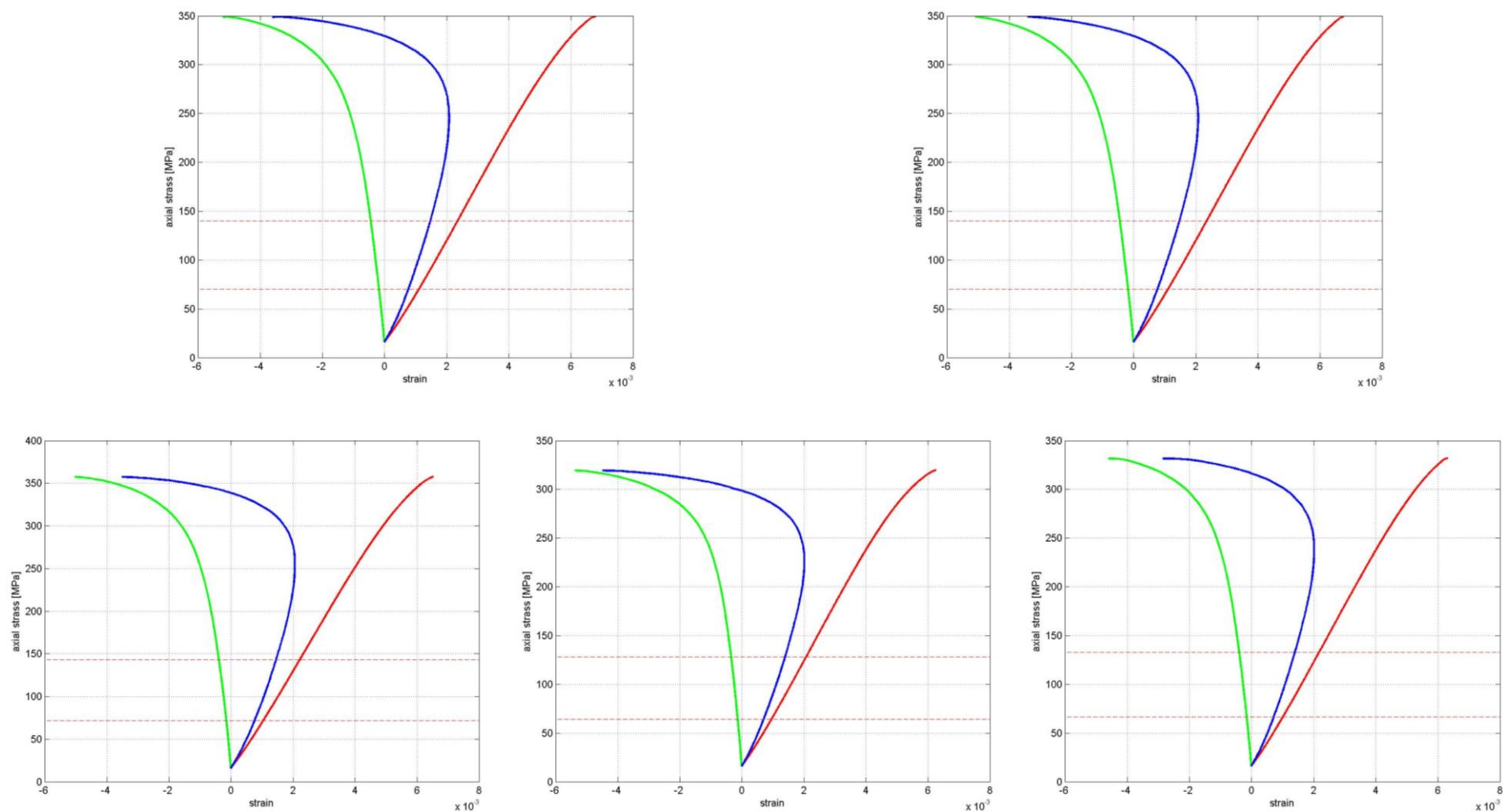


Obr. 30 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granit, Hrádek. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokality typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L	d	E	u	v	K	interval		Pevnost
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[GPa]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Kráví hora migmatit	KH12	1-224/87	30	-	101.48	50.38	56.56	23.34	0.21	32.69	71.9	143.8	359.5
	KH13	2-224/87	30	-	101.12	50.45	56.34	23.21	0.21	32.8	69.9	139.7	349.2
	KH21	2-224/87	90	-	101.64	50.44	60.7	25.19	0.2	34.29	71.5	143.1	357.6
	KH33	3-224/87	30	-	101.32	50.32	57.39	24.16	0.19	30.62	63.9	127.8	319.5
	KH34	3-224/87	30	-	101.27	50.46	57.12	23.67	0.21	32.43	66.3	132.8	331.9
							57.6 ± 1.6	23.9 ± 0.7	0.20 ± 0.01	32.6 ± 1.2			343.6 ± 15.5

Obr. 31 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na migmatitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

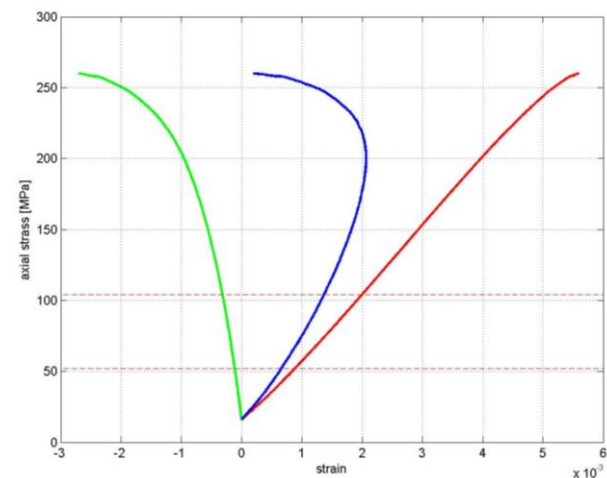
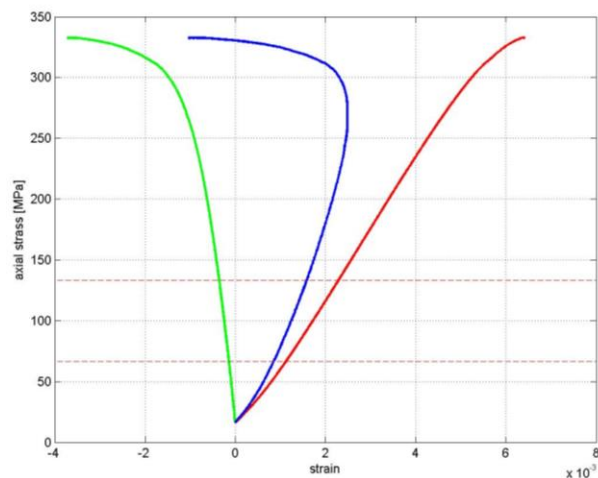
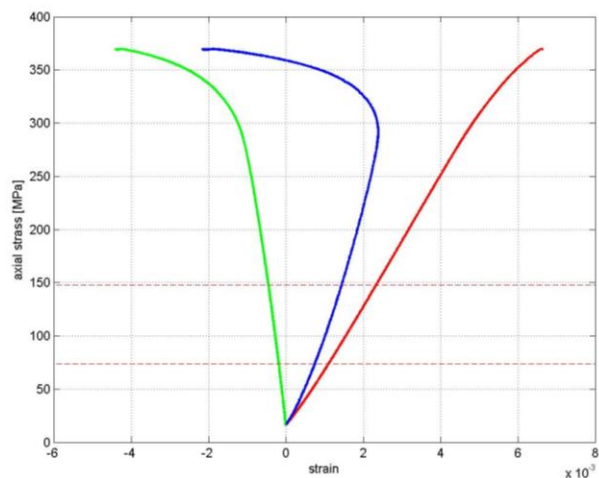
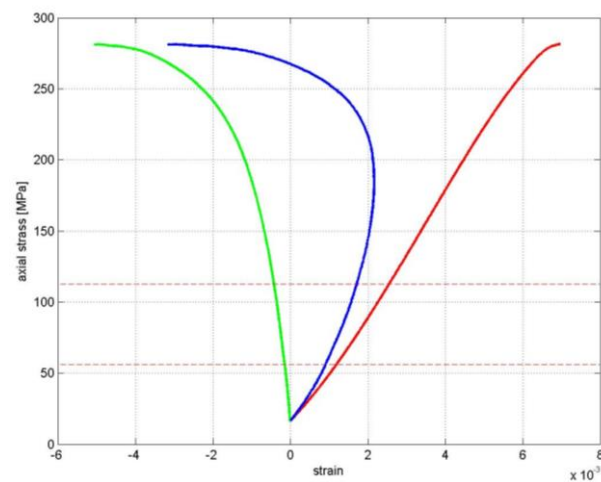
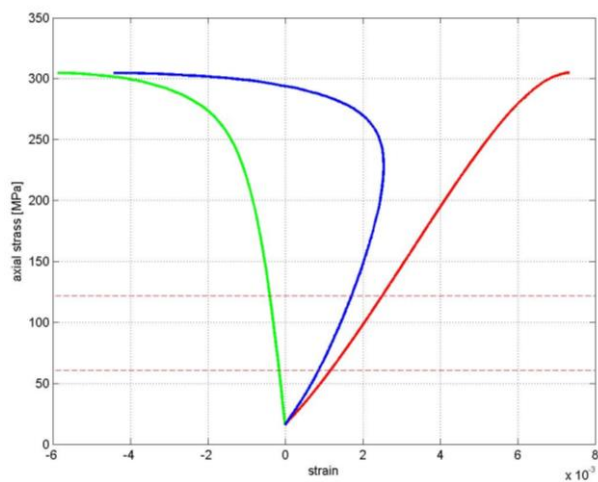


Obr. 32 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, migmatit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



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

Obr. 33 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na granulitu z lokality Kraví hora. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

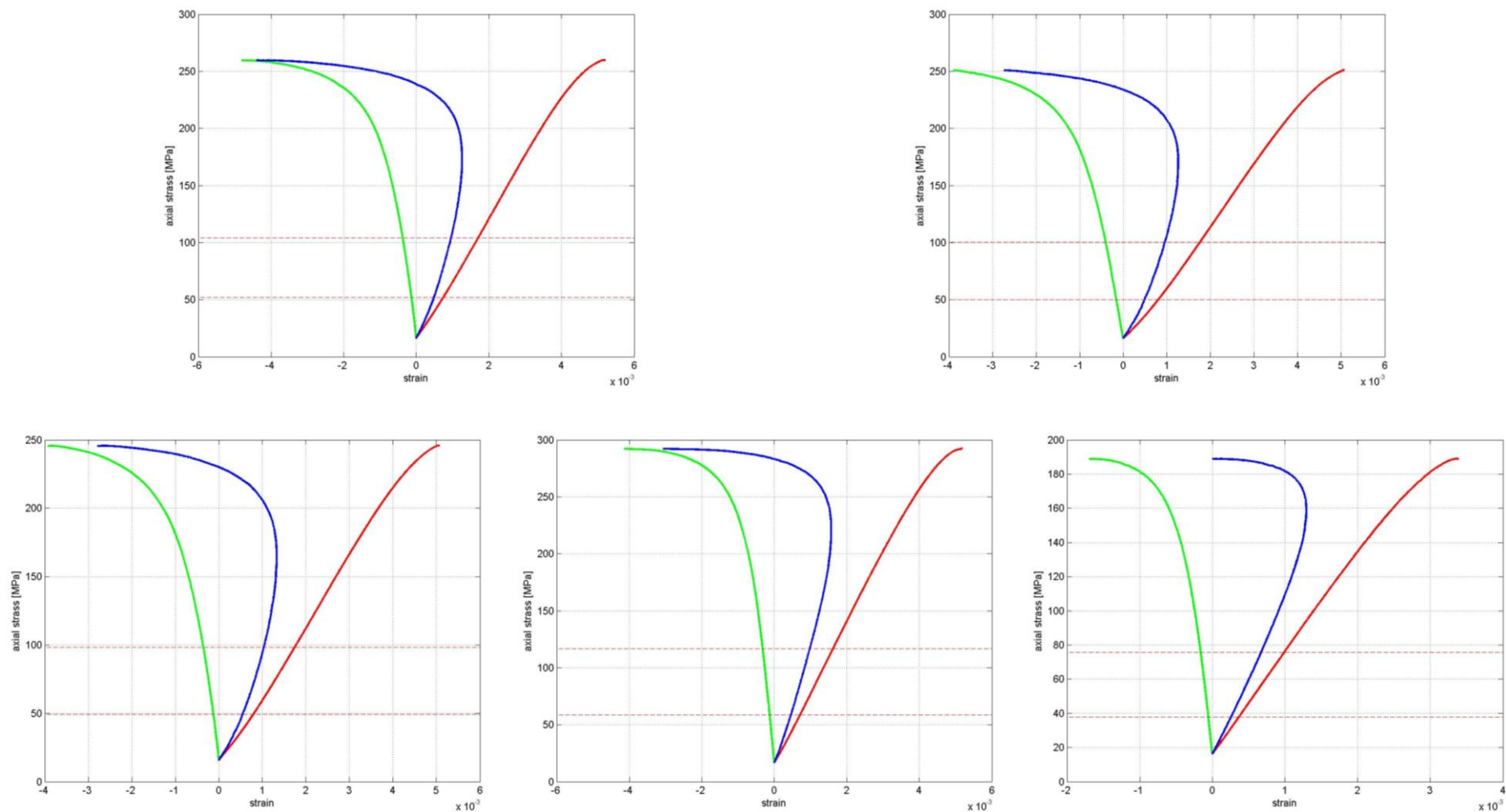


Obr. 34 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, granulit, Kraví hora. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v přiložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.



lokalita typ horniny	Číslo vzorku	blok-plocha	foliace	prim. trh.	L [mm]	d [mm]	E [GPa]	u [GPa]	v	K [GPa]	interval		Pevnost [MPa]
			[°]	[°]							[MPa]	[MPa]	
Magdaléna melasyenit	MG11A	1-bez orientace	-	20, 45, 90	100.49	50.36	54.54	21.75	0.25	36.9	52.0	103.9	259.8
	MG12	1-bez orientace	-	20, 45, 91	101.78	50.34	52.88	21.07	0.25	35.9	50.2	100.4	251.1
	MG15	1-bez orientace	-	20, 45, 92	101.12	50.31	51.67	20.8	0.24	33.36	49.2	98.3	245.8
	MG31	3-bez orientace	-	20, 45, 93	100.4	50.45	64.24	26.47	0.21	37.38	58.6	116.9	292.4
melasyenit*	MG33	3-bez orientace	-	20, 45, 94	100.34	50.36	60.57	25.91	0.17	30.46	37.9	75.6	189.0
							56.8 ± 4.8	23.2 ± 2.5	0.22 ± 0.03	34.8 ± 2.6			247.6 ± 33.5

Obr. 35 Fotografie porušených vzorků spolu s výsledky triaxiálních zkoušek měřených na melasyenitu z lokality Magdaléna. Odpovídající pracovní diagramy jsou na následující stránce.

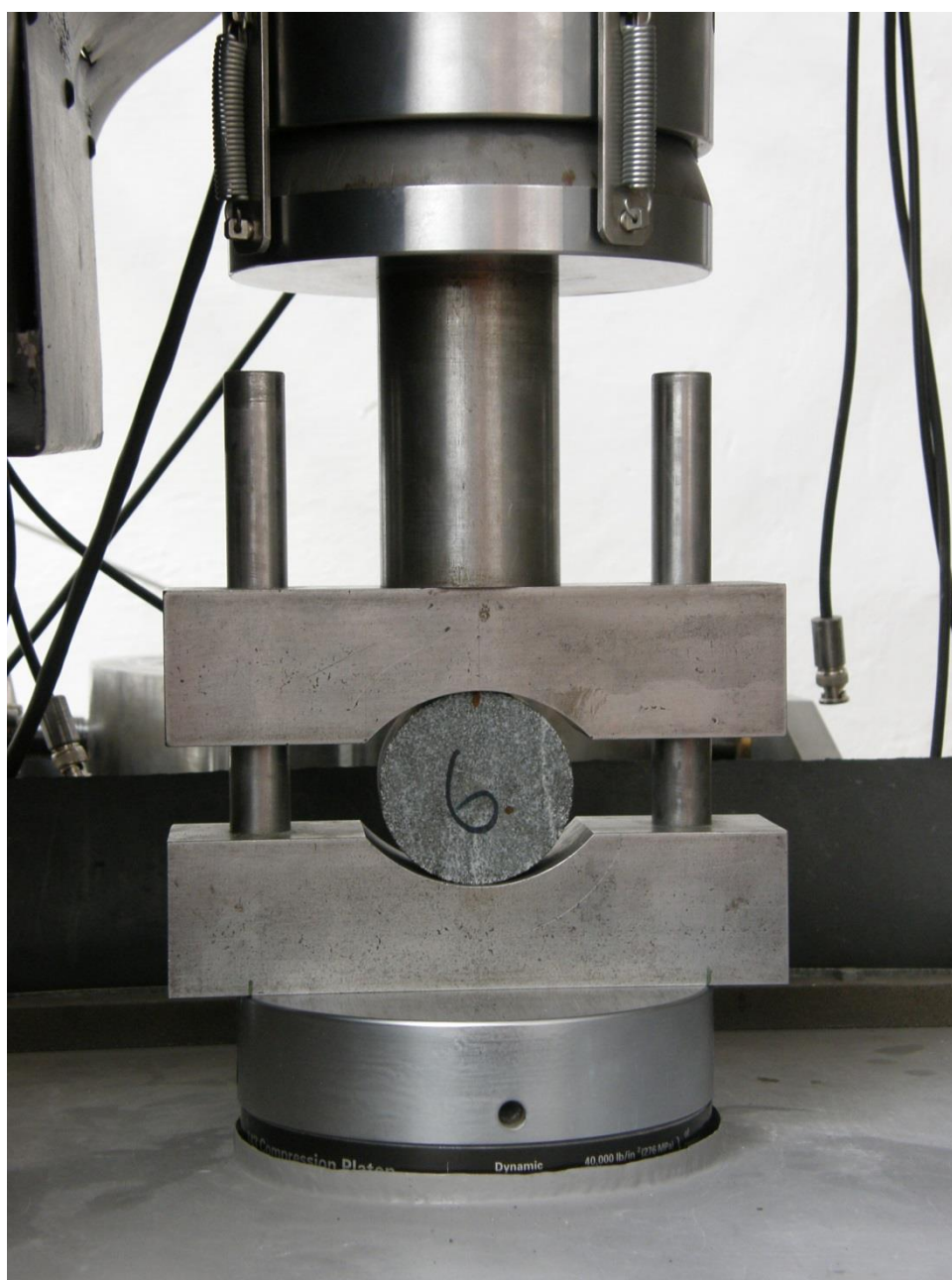


Obr. 36 Pracovní diagramy, triaxiální zkouška, melasyenit, poslední pracovní diagram – melasyenit*, Magdaléna. Obrázky odpovídají pořadím vzorků na fotografiích a v příložené datové tabulce (viz předchozí stránka), jsou řazeny shora a zleva; červená – relativní osová deformace, zelená – relativní příčná deformace, modrá – relativní objemová deformace.

6 Zkoušky v příčném tahu

Válcová zkušební tělíska s výškou 30 mm a průměrem 50 mm byla z dodaných horninových bloků (kapitola 1.1) připravena a orientována tak, jak je popsáno v kapitole 1.3.

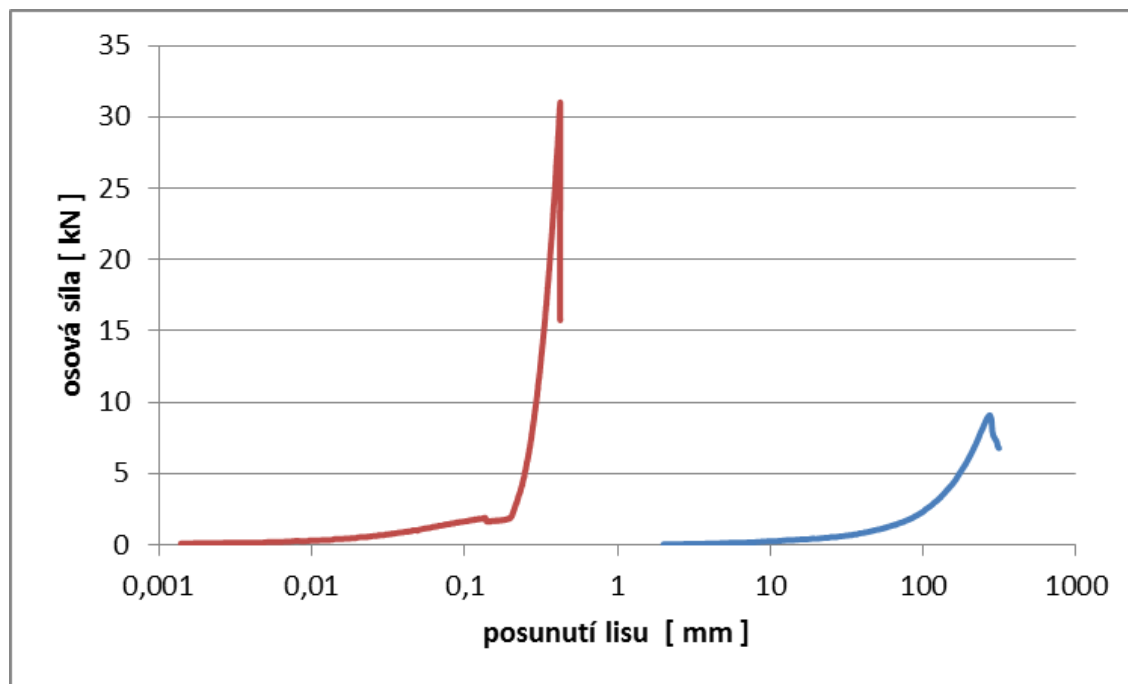
Na takto připravených diskových zkušebních tělískách byly provedeny zkoušky v příčném tahu. Pro každý horninový typ bylo provedeno 5 zkoušek. Zkoušky byly prováděny na vysušených vzorcích, sušení probíhalo 24 hodin při teplotě 105 °C.



Obr. 37 Fotografie zkoušky v příčném tahu.

Pro stanovení pevnosti v příčném tahu není platná norma pro zkoušení hornin. Využíván je postup v platné normě pro zkoušení betonů (Tab. 2). Snímač měřící osovou sílu je pravidelně kalibrován (Tab. 3).

Osové zatěžování bylo prováděno v zatěžovacím rámu MTS (Obr. 37) s konstantním posunutím lisu zvoleným tak, aby zkouška proběhla do 5 minut. V průběhu měření byla registrována osová síla a posunutí lisu, které je úměrné deformaci ve směru zatěžování. Průběh závislosti osově síly a posunutí lisu je znázorněn na Obr. 38 pro vzorek s největší a nejmenší naměřenou BTS. Tato primární data jsou k dispozici v elektronických přílohách spolu s fotografiemi porušených vzorků.



Obr. 38 Brazilská zkouška, graf závislosti osově síly na posunutí lisu, červeně: granit z lokality Čihadlo (vzorek C112, $BTS = 13,9 \text{ MPa}$), modře: durbachit z lokality Horka (vzorek HO11, $BTS = 3,6 \text{ MPa}$).

Z maximální naměřené osově síly F_{max} a průřezové osově plochy testovaného vzorku A se podle vztahu (4) vypočte pevnost v příčném tahu.

$$BTS = 0.637 * \frac{F_{max}}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Podle práce Read & Richards (2015) je možné na základě stanovené BTS odhadnout pevnost v prostém tahu podle vztahu (5):

$$DTS = 0.9 * BTS \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Stanovené hodnoty a jejich směrodatné odchylky jsou uvedené v Tab. 10. Obrázky 39–46 zachycují testované vzorky po porušení. Sklon foliace a primárních trhlin byl měřen od horizontální roviny na tělískách s orientací odpovídající zkoušce. Je-li za sklonem primárních trhlin uvedeno písmeno f , jsou paralelní s foliací.

Tab. 10 Výsledky zkoušek v příčném tahu, průměrné hodnoty a směrodatné odchylky z pěti zkoušek provedených v rámci každého horninového typu. Vzorky byly vysušené (24 hodin při 105 °C), fotografie odpovídajících porušených vzorků na obrázcích 39–46.

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	BTS	DTS
			[%]	[%]
Březový potok	granodiorit	5	8.3 ± 0.8	7.5 ± 0.7
Čertovka	granit	5	12.1 ± 1.1	10.9 ± 1.0
Čihadlo	granit	5	13.3 ± 0.8	12.0 ± 0.7
Horka	durbachit	5	3.4 ± 0.5	3.1 ± 0.4
Hrádek	granit	5	8.9 ± 1.8	8.0 ± 1.6
Kraví hora	migmatit	5	9.6 ± 2.0	8.7 ± 1.8
Kraví hora	granulit	5	10.5 ± 1.0	9.5 ± 0.9
Magdaléna	melasyenit	5	12.3 ± 2.1	11.1 ± 1.9



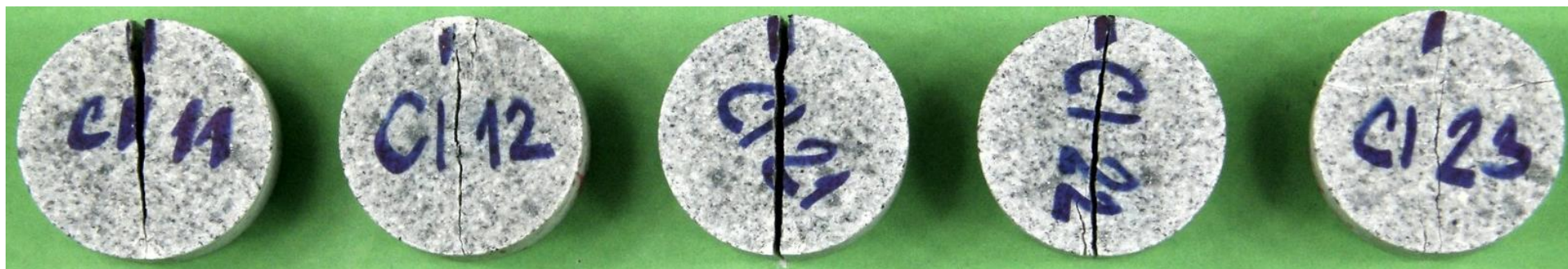
lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Březový potok granodiorit	BP1	1-113/72	-	-	49.62	29.47	17.4	7.6	8.3 ± 0.8	7.5 ± 0.7
	BP2	1-113/72	-	-	49.45	28.65	20.4	9.2		
	BP4	2-113/72	-	-	49.65	26.62	16.5	8.0		
	BP5	2-113/72	-	-	49.63	30.75	18.0	7.5		
	BP6	3-84/79	-	-	49.63	31.02	22.7	9.4		

Obr. 39 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Březový potok, hornina granodiorit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Čertovka granit	CE11	2-295/74	-	-	49.43	28.25	28.7	13.1	12.1 ± 1.1	10.9 ± 1.0
	CE12	2-295/74	-	-	49.44	30.42	30.6	13.0		
	CE21	2-295/74	-	-	49.90	31.65	30.0	12.1		
	CE22	3-127/80	-	-	49.82	31.21	29.9	12.2		
	CE31	3-127/80	-	-	50.03	31.49	24.5	9.9		

Obr. 40 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Čertovka, hornina granit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Čihadlo granit	CI11	1-233/13	-	-	50.06	31.25	31.1	12.7	13.3 ± 0.8	12.0 ± 0.7
	CI12	1-233/13	-	-	49.99	33.09	36.2	13.9		
	CI21	2-233/13	-	-	50.31	32.05	34.2	13.5		
	CI22	2-233/13	-	-	50.23	31.31	35.4	14.3		
	CI23	2-233/13	-	-	50.35	32.31	31.2	12.2		

Obr. 41 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Čihadlo, hornina granit.



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

Obr. 42 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Horka, hornina durbachit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Hrádek granit	HR1	1-319/76	-	-	49.68	31.22	27.3	11.2	8.9 ± 1.8	8.0 ± 1.6
	HR2	1-319/76	-	-	49.58	31.54	26.1	10.6		
	HR3	2-322/71	-	-	49.27	31.09	17.2	7.2		
	HR4	2-322/71	-	-	49.26	32.50	16.6	6.6		
	HR5	3-54/45	-	-	49.74	30.41	21.5	9.1		

Obr. 43 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Hrádek, hornina granit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Kráví hora migmatit	KH11	1-224/87	90	-	50.47	30.70	16.3	6.7	9.6 ± 2.0	8.7 ± 1.8
	KH12	2-224/87	90	-	50.39	30.90	23.2	9.5		
	KH13	2-224/87	0	-	50.35	31.19	28.1	11.4		
	KH31	3-224/87	0	-	50.39	31.48	20.9	8.4		
	KH32	3-224/87	0	-	50.40	31.71	30.4	12.1		

Obr. 44 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Kraví hora, hornina migmatit.



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

Obr. 45 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Kraví hora, hornina granulit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	Fmax	BTS	BTS	DTS
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Magdaléna melasyenit	MG21	1-bez orientace	-	0	50.34	31.23	24.2	9.8	12.3 ± 2.1	11.1 ± 1.9
	MG22	1-bez orientace	-	0	50.37	31.77	26.6	10.6		
	MG31	1-bez orientace	-	0	50.41	32.01	31.3	12.4		
	MG32	3-bez orientace	-	0	50.40	32.37	40.2	15.7		
	MG34	3-bez orientace	-	0	50.37	31.24	32.1	13.0		

Obr. 46 Porušené vzorky po zkoušce v příčném tahu, lokalita Magdaléna, melasyenit.

7 Stanovení koeficientu filtrace

Válcová zkušební tělíska s výškou 50 mm a průměrem 50 mm byla z dodaných horninových bloků (kapitola 1.1) připravena a orientována tak, jak je popsáno v kapitole 1.3.

Před umístěním do permeamtru byla zkušební tělíska nasycena destilovanou vodou za pomoci vakua.

Zkoušky pro stanovení koeficientu hydraulické vodivosti byly provedeny v triaxiální komoře za plášťového i osového tlaku 13 MPa. Tento tlak odpovídá litostatickému tlaku v předpokládané hloubce úložiště 500 m. Měření bylo provedeno s tlakovou diferencí 1 MPa a 2 MPa, což odpovídá hydraulickému gradientu 102 m respektive 204 m. Za předpokladu laminárního proudění by stanovený koeficient filtrace neměl být závislý na hydraulickém gradientu. Blízkost výsledných hodnot dokládá hodnověrnost měření. Koeficient filtrace byl stanoven podle norem a pracovních postupů uvedených v Tab. 2. Pro generování tlaku na dolní a horní drenáži, stejně jako pro měření a registraci tlaků a proteklého objemu byl použit permeameter Quizix 5000 (Obr. 47). Snímače permeamtru jsou pravidelně kalibrované (Tab. 3).

Z parametrů vzorku a hodnot změřených permeamtrům vypočteme podle vztahu (6) koeficient hydraulické vodivosti k :

$$k = V \cdot (L/A) \cdot H \cdot T \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (6)$$

kde T [min] je časový interval měření; V [ml] je objem proteklé vody za časový interval T ; L [mm] je výška zkušební vzorku před zkouškou; A [cm²] je průřezová plocha zkušební vzorku a H [cm] je rozdíl tlakových výšek hladin. Data z permeamtru byla vyhodnocována až po ustálení průtoku na dolní (do vzorku) a horní (ze vzorku) drenáži. V případě dvou vzorků MG21 a MG22 nedošlo k ustálení průtoku ani po více než 10 dnech. Z tohoto důvodu byl koeficient filtrace vypočten pouze z křivky přítoku. Výsledný koeficient filtrace bude menší nebo roven tomu stanovenému pouze z přítoku. Koeficient hydraulické vodivosti stanovený pro lokalitu Magdaléna byl měřený na bazičtějších enklávách obsažených v dodaných melasyenitových blocích (melasyenit*). Koeficient hydraulické vodivosti pro melasyenit by se měl, dle odhadu ze závislosti na celkové pórovitosti (0,93 %), pohybovat v řádu 10⁻¹⁵-10⁻¹⁴.

Stanovený koeficient hydraulické vodivosti, měřený při konstantní teplotě 18 °C, byl podle normy ČSN CEN ISO/ TS 17892 – 11 přepočten na koeficient filtrace při teplotě vody 10 °C.

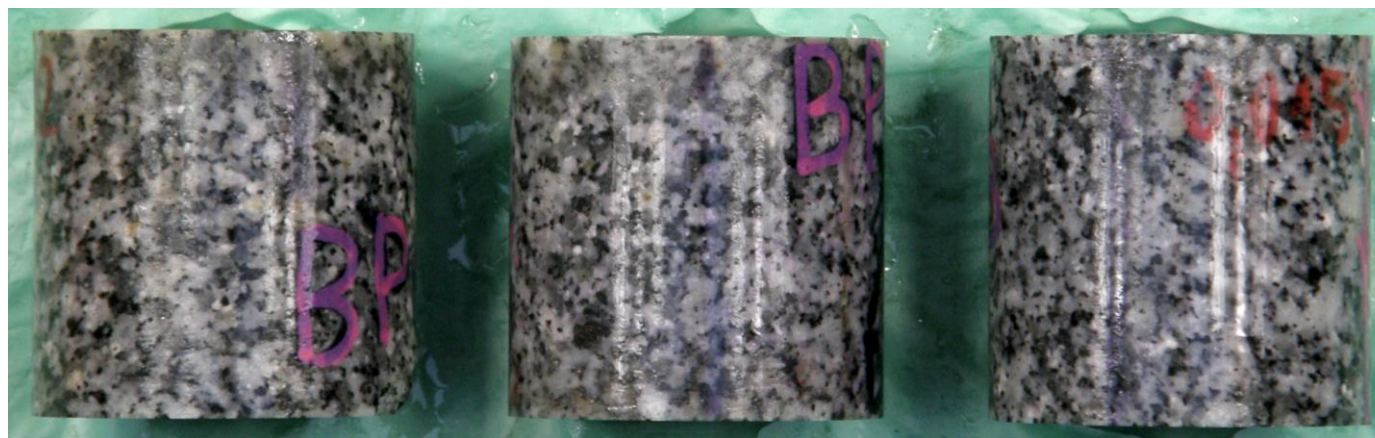
Pro každý horninový typ jsou průměrné hodnoty a směrodatné odchylky koeficientu filtrace uvedeny spolu s celkovou a efektivní pórovitostí v Tab. 11. Každá hodnota je průměrem ze šesti měření (3 testované vzorky X 2 tlakové difference). Hodnoty změřené při obou tlakových diferencích (1 MPa a 2 MPa) jsou pro každý z testovaných vzorků uvedeny pod jejich fotografiemi na obrázcích 48–54. Fotografie testovaných vzorků jsou také v elektronických přílohách.



Obr. 47 Fotografie permeamtru Quizix 5000.

lokalita	typ horniny	počet zkoušek	N_C	N_EF	k	k10
			[%]	[%]	[m/s]	[m/s]
Březový potok	granodiorit	3	1.97	0.27	1.06E-13 ± 2.65E-14	8.61E-14 ± 2.14E-14
Čertovka	granit	3	1.96	0.22	1.25E-12 ± 6.39E-13	1.01E-12 ± 5.18E-13
Čihadlo	granit	3	2.17	0.57	2.46E-13 ± 3.28E-14	1.99E-13 ± 2.67E-14
Horka	durbachit	3	2.77	1.66	4.68E-12 ± 4.67E-12	3.79E-12 ± 3.78E-12
Hrádek	granit	3	3.05	2.15	1.61E-11 ± 2.36E-11	1.31E-11 ± 1.91E-11
Kraví hora	migmatit	3	1.73	0.61	8.46E-12 ± 3.73E-12	6.85E-12 ± 3.02E-12
Kraví hora	granulit	3	1.37	0.75	7.09E-13 ± 3.95E-13	5.75E-13 ± 3.20E-13
Magdaléna	melasyenit*	3	0.23	0.32	1.57E-14 ± 9.33E-15	1.27E-14 ± 7.56E-15

Tab. 11 Koefficient hydraulické vodivosti měřený při 18°C a přepočtený na teplotu vody 10°C. Každá hodnota k a $k10$ je průměrem ze šesti měření (3 testované vzorky \times 2 tlakové difference). Za symbolem \pm je směrodatná odchylka ze šesti měření.



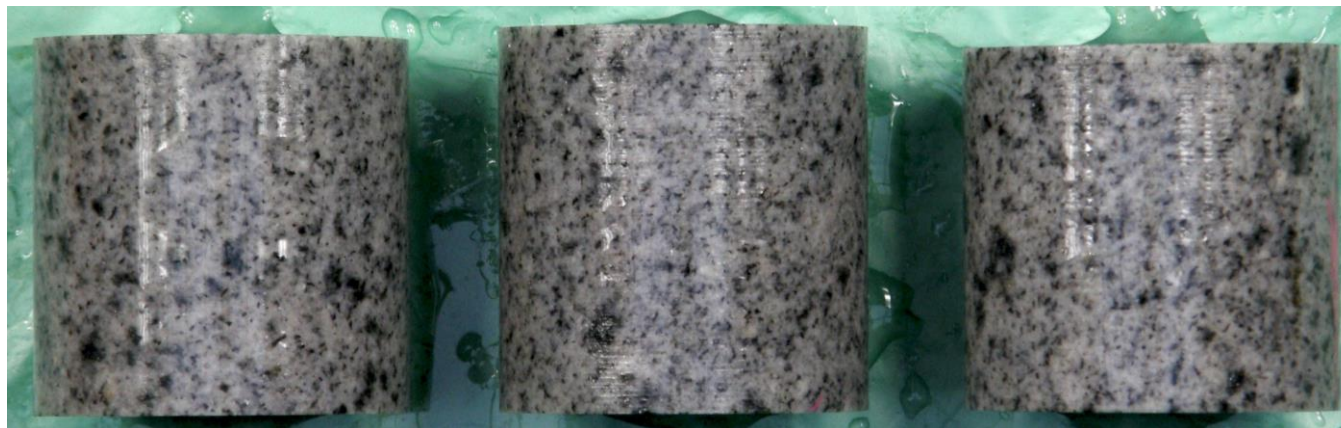
lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer [mm]	Vyska [mm]	mS [g]	ρSAT [g/cm ³]	ρSAT [g/cm ³]	ρDRY [g/cm ³]	ρSPEC [g/cm ³]	N_C [%]	N_EF [%]	k [m/s]		k10 [m/s]	
			[°]	[°]										1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Březový potok granodiorit	BP1	1-113/72	-	-	49.67	50.29	258.85	2.656	2.660	2.658	2.711	1.97	0.27	9.39E-14	8.64E-14	7.61E-14	6.99E-14
	BP2	2-113/72	-	-	49.74	50.16	258.91	2.656						8.89E-14	9.12E-14	7.20E-14	7.38E-14
	BP3	3-84/79	-	-	49.71	50.79	263.05	2.669						1.51E-13	1.27E-13	1.22E-13	1.03E-13
														<u>1.06E-13 ± 2.65E-14</u>	<u>8.61E-14 ± 2.14E-14</u>		

Obr. 48 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Březový potok, granodiorit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	mS	ρSAT	ρSAT	ρDRY	ρSPEC	N_C	N_EF	k [m/s]		k10 [m/s]	
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Čertovka granit	CE11	2-295/74	-	-	49.45	51.58	260.80	2.633	2.630	2.627	2.680	1.96	0.22	2.16E-12	1.83E-12	1.75E-12	1.48E-12
	CE21	2-295/74	-	-	49.46	50.48	255.59	2.635						5.95E-13	5.93E-13	4.82E-13	4.80E-13
	CE31	3-127/80	-	-	50.02	51.92	267.39	2.621						1.20E-12	1.12E-12	9.73E-13	9.08E-13
														<u>1.25E-12 ± 6.39E-13</u>		<u>1.01E-12 ± 5.18E-13</u>	

Obr. 49 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Čertovka, granit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	mS [g]	ρSAT [g/cm ³]	ρSAT [g/cm ³]	ρDRY [g/cm ³]	ρSPEC [g/cm ³]	N_C [%]	N_EF [%]	k [m/s]		k10 [m/s]	
														1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Čihadlo granit	CI11	1-233/13	-	-	50.03	50.61	260.96	2.623	2.623	2.618	2.676	2.17	0.57	2.54E-13	2.06E-13	2.06E-13	1.67E-13
	CI21	2-233/13	-	-	50.16	52.07	270.17	2.626						2.31E-13	2.23E-13	1.87E-13	1.80E-13
	CI22	2-233/13	-	-	50.18	49.08	254.45	2.621						2.97E-13	2.65E-13	2.41E-13	2.14E-13
														<u>2.46E-13 ± 3.28E-14</u>		<u>1.99E-13 ± 2.67E-14</u>	

Obr. 50 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Čihadlo, granit.



lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	mS [g]	ρSAT [g/cm ³]	ρSAT [g/cm ³]	ρDRY [g/cm ³]	ρSPEC [g/cm ³]	N_C [%]	N_EF [%]	k [m/s]		k10 [m/s]	
														1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Horka durbachit	HO12	1-184/60	-	-	49.63	52.03	274.64	2.729	2.728	2.712	2.789	2.77	1.66	3.10E-12	2.46E-12	2.51E-12	1.99E-12
	HO13	2-218/85	-	-	49.60	49.95	263.85	2.734						1.14E-11	9.70E-12	9.22E-12	7.86E-12
	HO31	3-276/86	-	-	49.20	51.45	266.34	2.723						7.20E-13	7.01E-13	5.83E-13	5.68E-13
														4.68E-12 ± 4.67E-12		3.79E-12 ± 3.78E-12	

Obr. 51 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Horka, durbachit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	mS	ρSAT	ρSAT	ρDRY	ρSPEC	N_C	N_EF	k [m/s]		k10 [m/s]	
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Hrádek granit	HR1	1-319/76	-	-	49.61	50.24	253.77	2.613	2.609	2.587	2.669	3.05	2.15	7.53E-13	7.76E-13	6.10E-13	6.29E-13
	HR2	2-322/71	-	-	49.66	51.10	258.82	2.615						1.08E-12	1.04E-12	8.71E-13	8.42E-13
	HR3	3-54/45	-	-	49.25	49.69	245.95	2.598						4.69E-11	4.63E-11	3.80E-11	3.75E-11
														<u>1.61E-11 ± 2.36E-11</u>		<u>1.31E-11 ± 1.91E-11</u>	

Obr. 52 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Hrádek, granit.



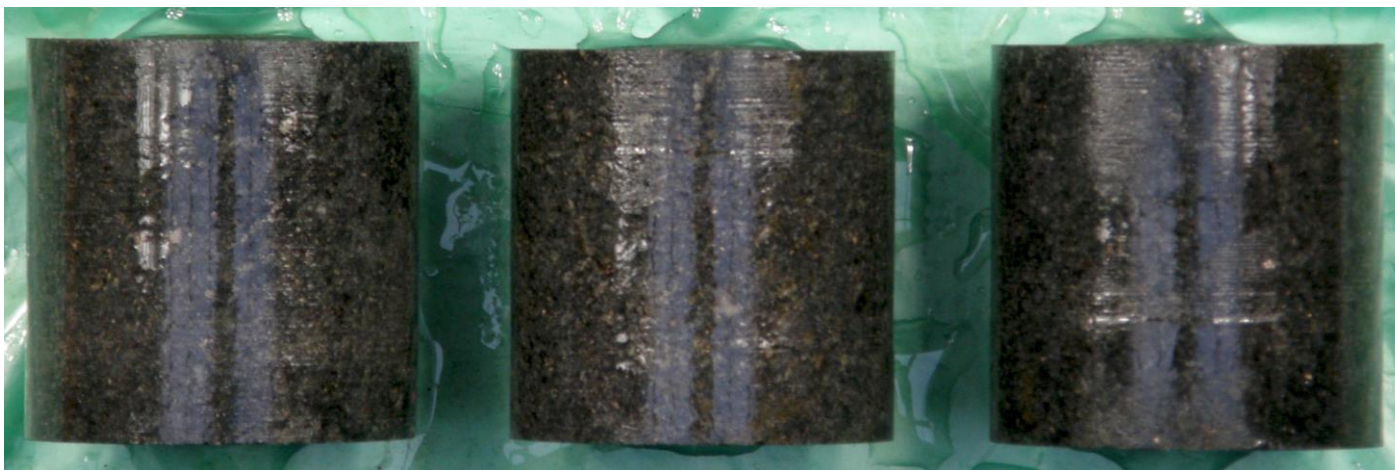
lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	mS [g]	ρSAT [g/cm ³]	ρSAT [g/cm ³]	ρDRY [g/cm ³]	ρSPEC [g/cm ³]	N_C [%]	N_EF [%]	k [m/s]		k10 [m/s]	
														1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Kráví hora migmatit	KH1	1-224/87	90	-	50.43	50.80	265.54	2.617	2.624	2.618	2.664	1.73	0.61	6.50E-12	6.40E-12	5.26E-12	5.18E-12
	KH2	2-224/87	90	-	50.37	50.95	266.10	2.621						1.34E-11	1.31E-11	1.09E-11	1.06E-11
	KH3	3-224/87	0	-	50.42	51.92	273.08	2.634						5.74E-12	5.61E-12	4.65E-12	4.54E-12
														8.46E-12 ± 3.73E-12		6.85E-12 ± 3.02E-12	

Obr. 53 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Kraví hora, migmatit.



lokality typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace	prim. trh.	Prumer	Vyska	mS	ρSAT	ρSAT	ρDRY	ρSPEC	N_C	N_EF	k [m/s]		k10 [m/s]	
			[°]	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Kráví hora granulit	KH4	4-329/56	10	-	50.31	50.92	270.19	2.669	2.662	2.655	2.692	1.37	0.75	1.26E-12	1.18E-12	1.02E-12	9.53E-13
	KH5	5-229/34	0	-	50.42	50.86	269.15	2.650						5.08E-13	4.55E-13	4.12E-13	3.68E-13
	KH6	6-310/50	85	-	50.42	51.17	272.55	2.668						4.29E-13	4.30E-13	3.47E-13	3.48E-13
														<u>7.09E-13 ± 3.95E-13</u>		<u>5.75E-13 ± 3.20E-13</u>	

Obr. 54 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Kraví hora, granulit.



lokalita typ horniny	Vrt	blok-plocha	foliace [°]	prim. trh. [°]	Prumer [mm]	Vyska [mm]	mS [g]	ρSAT [g/cm ³]	ρSAT [g/cm ³]	ρDRY [g/cm ³]	ρSPEC [g/cm ³]	N_C [%]	N_EF [%]	k [m/s]		k10 [m/s]	
														1 MPa	2 MPa	1 MPa	2 MPa
Magdaléna melasyenit*	MG21	2-bez orientace	-	0	50.32	51.61	312.79	3.048	3.047	3.044	3.051	0.23	0.32	8.82E-15	-	7.14E-15	-
	MG22	2-bez orientace	-	0	50.31	50.80	310.62	3.076						3.07E-14	7.13E-15	2.48E-14	5.78E-15
	MG31	3-bez orientace	-	0	50.28	51.74	310.08	3.018						1.45E-14	1.71E-14	1.18E-14	1.39E-14
														1.57E-14 ± 9.33E-15		1.27E-14 ± 7.56E-15	

Obr. 55 Fotografie testovaných vzorků a stanovený koeficient filtrace, Magdaléna, melasyenit*.

8 Citace a seznam literatury

ČSN CEN ISO/ TS 17892 – 11 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu, Praha: Český normalizační institut, 2005. 20 s.

Hakala, M., H. Kuula, and J. A. Hudson. "Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: a case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44.1 (2007): 14-46.

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

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz