



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

KORELACE PARAMETRŮ VYBRANÝCH TYPŮ HORNIN NA ZÁKLADĚ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

CORRELATIONS OF PARAMETERS OF SELECTED ROCK TYPES BASED ON LABORATORY TESTS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS TREATISE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Závacký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV HORÁK, CSc.

BRNO 2021

Klíčová slova

Mechanika hornin, Laboratorní zkoušky, Korelace, Regresní vztahy, Skalní horniny, Pevnost hornin, Indexové parametry, Přetvárné charakteristiky

Keywords

Rock mechanics, Laboratory tests, Correlation relationships, Regression, Hard rocks, Strength of rock, Index tests, Deformation parameters of rock

Místo uložení práce

Ústav geotechniky, Fakulta stavební, VUT v Brně;

Knihovnické informační centrum Fakulty stavební VUT v Brně

© Ing. Martin Závacký, 2020

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Cíle práce.....	1
1.2. Metodika práce.....	2
2. Laboratorní zkoušky.....	3
2.1. Současný stav problematiky laboratorních zkoušek v mechanice hornin.....	3
2.2. Zkoumané vlastnosti hornin.....	5
3. Korelační analýza.....	5
3.1. Metodika zpracování dat.....	6
3.2. Dílčí korelační a regresní vztahy.....	9
4. Příklad.....	9
4.1. Realizované laboratorní zkoušky: Pevnost v jednoosém tlaku.....	9
4.2. Dílčí korelace: Index pevnosti při bodovém zatížení (PLT) – Pevnost v jednoosém tlaku.....	12
5. Diskuse k výsledkům dizertační práce.....	15
5.1. Laboratorní zkoušky.....	15
5.2. Korelační analýza.....	19
6. Závěr.....	22
Použitá literatura.....	23
Curriculum vitae.....	i
Přehled publikovaných prací.....	ii
Abstrakt.....	iv

1. Úvod

Mechanika hornin (MH) se zabývá především charakteristikou horninového masívu a jeho interakcí s různými typy inženýrských děl. Horninový masív je tvořen dvěma základními prvky, které určují jeho chování. Je to zejména samotná hornina a dále diskontinuity, které rozdělují horninu na jednotlivé bloky a svými vlastnostmi významně ovlivňují charakter masívu, jako celku.

Hodnocení horninového masívu a stanovení jeho vlastností pro inženýrské účely je obvykle založeno na inženýrskogeologickém popisu a laboratorních a polních zkouškách. Laboratorními zkouškami se nejčastěji určují fyzikální a mechanické vlastnosti horninového materiálu, ale lze je využít i pro stanovení některých vlastností masívu a diskontinuit (Muralha et al., 2013). Výsledky laboratorních zkoušek se pak používají v hodnocení kvality horninového masívu (např. klasifikace RMR (Bieniawski, 1989)) a ke stanovení hodnot vstupních parametrů materiálových modelů pro geotechnické výpočty (např. Mohr-Coulomb, Hoek-Brown (Hoek a Brown, 1980)).

Laboratorní zkoušky hornin jsou důležité i pro zjištění vlastností týkajících se rozpojitelnosti, mechanické, či chemické odolnosti hornin a dalších parametrů souvisejících s využitím hornin jako stavebního materiálu (drcený štěrk, stavební kámen, ...).

Široké spektrum vlastností vede v praxi k velké početnosti laboratorních metod a postupů. Některé zkoušky stanovují stejný parametr, ale každá jiným způsobem. Tyto rozdíly mohou mít původ i v tradici metody v jisté geografické oblasti, ve snaze zjednodušit testování nebo zkoušku přizpůsobit horninám daného regionu.

Z důvodu technické, časové a finanční náročnosti přímého zjišťování některých parametrů je snaha vyhnout se složitějším zkouškám a hledaný parametr odhadnout. K odhadu se využívají regresní vztahy stanovené na základě korelací mezi parametry hornin. Vhodné jsou k tomu například relativně jednoduše stanovitelné indexové vlastnosti, čímž byl právě podněten vývoj těchto zkoušek (Franklin et al., 1985). U regresních vztahů je nicméně často potřebná jejich kalibrace na určitý petrografický typ, nebo region, aby byla dosažena vyšší přesnost odhadovaného parametru.

1.1. Cíle práce

Jak již bylo zmíněno, mezi jednotlivými parametry hornin existují určité korelace. Právě tyto korelace mají potenciál zefektivnit testování hornin. Pomocí relativně jednoduše stanovitelných parametrů, jako je například objemová hmotnost nebo odrazová tvrdost, lze odhadnout hodnoty pevnostních nebo přetvárných parametrů hornin. Výhodou např. jednodušších indexových zkoušek je možnost jejich poměrně snadného, levného a rychlého provedení i v terénu a na velkém počtu vzorků. Takto lze kontrolovat homogenitu a kvalitu horniny v průběhu výstavby, těžby v kamenolomu, nebo v jiné obdobné situaci. Při identifikaci určité odlišnosti je pak možné efektivněji vybrat vzorky k dalšímu podrobnějšímu testování za účelem přesnější kvantifikace změny vlastností materiálu. Vhodnou optimalizací

testování tak lze zvýšit výpovědnou hodnotu pokročilejších laboratorních testů, které jsou finančně, časově i technicky náročnější.

Cíle této disertační práce jsou formulovány následovně:

- Zhodnocení možností a limitů jednotlivých metod testování hornin, kterými se zjišťují hodnoty parametrů hornin, především těch, které jsou významné z pohledu navrhování a posuzování geotechnických konstrukcí. Tato evaluace zkušebních metod je založená na poznacích z literární rešerše a především praktických zkušenostech. Data získaná z provedených testů mohou posloužit ke korelační analýze.
- Posouzení korelací, zejména mezi indexovými a pevnostními vlastnostmi hornin a zhodnocení jejich využitelnosti při odhadu hodnoty požadovaného parametru. Dále využití těchto poznatků k sestavení regresních vztahů a ověření přesnosti již publikovaných regresí na horninách z České a Slovenské republiky.
- Doplnkovým cílem je také zpracování moderních postupů laboratorních zkoušek mechaniky hornin na Ústavu geotechniky se zřetelem na dostupné vybavení. To zahrnuje implementaci moderního vybavení instalovaného v roce 2016 v nové geotechnické laboratoři ve výzkumném centru AdMaS (*Advanced Materials and Structures*). Rozšiřuje se tak dosavadní oblast laboratorního výzkumu na Ústavu geotechniky FAST VUT v Brně.

1.2. Metodika práce

Pro naplnění definovaných cílů práce byly vytyčeny a následující hlavní body řešení:

- Literární rešerše zaměřená na získání informací o současných trendech v testování hornin a výběr vhodných metodik pro provádění zkoušek s dostupným laboratorním vybavením. Uskutečnění návštěv jiných pracovišť, která disponují zavedenými laboratořemi mechaniky hornin za účelem získání přehledu v dané oblasti.
- Provádění laboratorních zkoušek hornin se zaměřením na získání pevnostních, přetvárných, indexových a základních fyzikálních parametrů hornin. S tím souvisí zavedení nového přístrojového vybavení do provozu a pokrytí celého procesu testování hornin od výroby zkušebních těles, samotného testování až po vyhodnocování výsledků zkoušek.
- Zpracování dat z laboratorních zkoušek a posouzení míry korelace mezi vybranými parametry hornin.
- Návrh regresních vztahů v rámci analyzovaných dat. Vyhledání již zpracovaných a publikovaných regresních vztahů v odborné literatuře týkajících se korelovaných parametrů a ověření jejich platnosti na zkoumaných datech.

2. Laboratorní zkoušky

2.1. Současný stav problematiky laboratorních zkoušek v mechanice hornin

Laboratorní zkoušky mechaniky hornin pokrývají široké spektrum požadavků na stanovení vlastností hornin. Výsledkem je soubor zkušebních metod, které lze rozřadit podle různých kritérií. Například podle způsobu stanovení, resp. dopadu na vzorek:

- destruktivní
- nedestruktivní

Nebo podle typu zkušebních těles:

- neopracovaná
- poloopracovaná
- opracovaná

Zřejmě nejkomplexnějším přístupem je třídění zkoušek podle zjišťované vlastnosti horniny se seskupením podle fyzikální podstaty daného parametru. V Tab. 2-1 je uveden částečný výčet takového třídění, který se soustředí především na oblast vlastností studovaných v této práci.

V praxi je běžný výskyt vícero variant zkoušky pro stanovení jedné vlastnosti – metodiky pro testování hornin se vyvíjely v jednotlivých zemích dosti odděleně. Srovnání, zejména starších, výsledků zkoušek a na mezinárodní úrovni je proto někdy obtížné.

Pro ilustraci uvedeme ve zkratce vývoj předpisů pro testování hornin pro geotechnické účely v ČR. Základem byly již neplatné oborové normy používané v bývalé ČSR. Navazující „*Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice hornin*“ (Zavoral et al., 1987) měly v úmyslu sjednocení zkušebních postupů používaných v rámci Československa. Od roku 2008 platí v ČR pro geotechniku, a tedy i mechaniku hornin, norma *ČSN EN 1997-2 Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*, která se zabývá i laboratorními zkouškami hornin.

Tato norma patří do sady Eurokódů, které nahrazují předešlé národní normy a mají snahu sjednotit postupy navrhování stavebních konstrukcí na mezinárodní úrovni. Současná verze normy se věnuje mechanice hornin relativně málo. Poměrně stručně popisuje pět základních laboratorních zkoušek MH (pevnost v prostém tlaku, index pevnosti v bodovém zatížení, smykovou pevnost na diskontinuitách, brazilskou zkoušku a triaxiální zkoušku) a zmiňuje také bobtnání, které se v tuzemských poměrech týká hornin s obsahem jílových minerálů. V mnohém se tato norma odvolává na metodiky Mezinárodní Společnosti pro Mechaniku Hornin – „*International Society for Rock Mechanics*“ (ISRM) (Ulusay a Hudson, 2007) a americké normy ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Kromě uvedeného Eurokódu *ČSN EN 1997-2* se testování hornin věnuje také soubor norem *ČSN EN Zkušební metody přírodního kamene*, konkrétně například *ČSN EN 1926* pro stanovení pevnosti v jednoosém tlaku. Tyto normy jsou nicméně orientovány na testování hornin jako stavebního materiálu, nikoliv pro návrh geotechnických konstrukcí.

Tab. 2-1: Rozdělení zkoušek podle zjišťované vlastnosti horniny (převzato a upraveno z: Durmeková et al., 2013).

Skupina vlastností	Podskupina	Vlastnost (charakteristika)	Označení [jednotka]
Základní / Fyzikální	Hmotnostní	Hustota	ρ_s [kg/m ³ , g/cm ³]
		Objemová hmotnost / dtto ve vysušeném stavu	ρ/ρ_d [kg/m ³ , g/cm ³]
		Pórovitost	n [%]
		Vlhkost	w [%]
	Vlastnosti ve styku s vodou	Nasákavost (vodou)	N(v) [%]
		Propustnost	k_f [m.s ⁻¹]
Bobtnavost		σ_{sw} [MPa], [%]	
Mechanické	Pevnostní	Pevnost v jednoosém tlaku	σ_c [MPa]
		Pevnost v tahu (jednoosém, příčném)	σ_t [MPa]
		Pevnost při trojosém zatížení	$\sigma_{1,max}$ [MPa]
		Pevnost v tahu za ohybu	σ_{to} [MPa]
	* indexové	Index pevnosti v bodovém zatížení	$I_{s(50)}$ [MPa]
		Odrážová tvrdost (Schmidtova, Shoreho)	R [-]
	Přetvárné	Modul pružnosti statický	E [GPa]
		Modul pružnosti dynamický	E_{dyn} [GPa]
Modul deformační		E_{def} [GPa]	
Poissonovo číslo		ν [-]	
Technické / Technologické	Vlastnosti požadované při využití skalních hornin jako stavebního materiálu	Mrazuvzdornost	F' [%]
		Odolnost proti rozpadu (Slake Durability Test)	I_d [%]
		Odolnost proti drcení (Los Angeles)	LA [-]
	Vlastnosti uplatňující se stavebních technologických procesech	Rozpojitelnost	
		Vrtatelnost	
		Abrazivnost a Abrazivita	

Lze tak konstatovat, že platné normy v ČR nyní neřeší oblast laboratorních zkoušek v MH jednoznačně, zejména v souvislosti s navrhováním geotechnických konstrukcí. Než bude tato disproporce v rámci ČSN vyřešena, nabízí se možnost postupovat podle metodik ISRM,

případně norem ASTM, které jsou nejpodrobnějšími a průběžně aktualizovanými podklady v mechanice hornin a navíc jsou akceptovány i v globálním měřítku.

Odhlédneme-li od normativních úskalí testování hornin, mohou se objevit také technické komplikace v podobě relativně zdlouhavé přípravy zkoušky, výrazné citlivosti výsledků na odchylky od standardně definovaného a korektně provedeného postupu testování nebo například nedostatku materiálu pro testování v adekvátní kvalitě. K tomu je zapotřebí přihlížet i na ekonomickou stránku, protože složitější zkoušky jsou zpravidla i dražší a může být náročnější je prosadit v rámci geotechnického průzkumu.

2.2. Zkoumané vlastnosti hornin

Z důvodů přehlednosti se disertační práce soustředí na několik vybraných parametrů hornin a jejich stanovení laboratorními metodami. Kritériem pro tento výběr bylo především získání hodnot vlastností hornin významných z pohledu navrhování geotechnických konstrukcí. Nezanedbatelným hlediskem byla současně dostupnost vybavení potřebného k příslušným laboratorním zkouškám. Souhrn takto vybraných vlastností hornin obsahuje následující položky:

- Objemová hmotnost,
- Pevnost v jednoosém tlaku,
- Přetvárné charakteristiky v tlaku,
- Pevnost v trojosém tlaku a podmínky porušení,
- Pevnost v tahu,
- Pevnost při bodovém zatížení,
- Odrazová tvrdost – Schmidtova a Shoreho.

3. Korelační analýza

Přímé měření některých vlastností hornin vyžaduje komplikovanou přípravu, nebo komplikované provedení laboratorních zkoušek. Někdy také vybavení, kterým laboratoře MH běžně nedisponují. Jako příklad můžeme uvést měření pevnosti v tahu. Z těchto důvodů se věnuje úsilí také hledání korelačních vztahů mezi jednotlivými vlastnostmi hornin a objasňování jejich podstaty a fyzikálních souvislostí. Existuje-li významná korelace mezi určitými parametry hornin, lze odvodit také relativně spolehlivý regresní vztah pro odhad velikosti hledané vlastnosti. Často jde o využití jednoduchých indexových a nedestruktivních zkoušek, které lze uplatnit při prvotní klasifikaci hornin v poli. Na základě takovýchto odhadů pak lze upřesnit a zefektivnit plán náročnějších laboratorních zkoušek.

Jedním z cílů této disertační práce je prozkoumat možnost odvození složitěji měřitelných parametrů hornin na základě těch jednodušeji měřitelných. Pro korelační analýzu byly vybrány tyto čtyři vlastnosti, které lze z pohledu praxe jednoduše měřit:

- Objemová hmotnost,
- Index pevnosti při bodovém zatížení,
- Schmidtova odrazová tvrdost,
- Shoreho odrazová tvrdost.

Uvedené vlastnosti jsou v této práci korelovány s pevností v jednoosém tlaku a pevností v příčném tahu, které jsou považovány za základní pevnostní charakteristiky hornin a jsou využívány i jako klasifikační vlastnosti (Durmeková et al., 2013).

Jednoduchými, rychlými zkouškou s minimálními náklady, z nichž některé jsou proveditelné i v terénu, tak dokážeme snížit potřebu provádění testu, pro který je nutno dovézt vzorky do laboratoře, připravit zkušební tělesa a za pomoci relativně drahých přístrojů přímo stanovit pevnost.

3.1. Metodika zpracování dat

V kapitole 2 byly jmenovány jednotlivé laboratorní zkoušky sloužící ke zjištění hodnot hledaných parametrů pevnosti, či přetvárných charakteristik. Byla také popsána variabilita zkušebních postupů a sledován vliv provedení zkoušky na výsledky. Vzhledem k citlivosti výsledků na detaily provedení zkoušky nejsou výsledky získané autorem zcela vhodné k rozsáhlejší korelační analýze. V čase určeném pro řešení dizertace se rovněž ukázalo jako velmi náročné nasbírat vlastní, dostatečně velký soubor dat k analýze a proto byly využity zejména externí zdroje.

Tab. 3-1: Přehled dat převzatých z IG atlasu hornin Slovenska ke korelační analýze (Holzer et al., 2009).

Skupina hornin	ID lokalit	Statistický popis	ρ_d [kg/m ³]	σ_c [MPa]	$\sigma_{t, \text{stt}}$ [MPa]	$I_{s(50)}$ [MPa]	R_{sch} [-]
Všechny lokality spolu		N	127				
		min	1291	12	1,0	0,65	12
		max	2937	364	21,7	13,12	61
		medián	2668	122	8,7	3,73	46
Granitoidy	301÷314	N	14				
		min	2613	77	4,5	1,81	31
		max	2798	207	15,0	6,18	61
		medián	2679	158	10,7	4,68	43
Vulkanity (ryolity, andezity, bazalty, tufy)	401÷404, 801÷836	N	40				
		min	1291	12	1,0	0,65	12
		max	2937	364	20,1	13,12	59
		medián	2581	131	11,3	6,40	49
Klastické sedimenty (pískovce, slepence, křemence)	405÷406, 605, 611, 615, 701÷714	N	19				
		min	2473	83	4,6	0,85	39
		max	2736	237	15,5	10,66	60
		medián	2636	115	7,9	3,65	45
Karbonátové sedimenty (vápence, dolomity)	501÷542, 601÷604, 606÷610, 612÷614	N	54				
		min	2313	41	2,9	0,97	24
		max	2850	227	21,7	6,94	60
		medián	2703	112	7,1	3,47	46

Pozn.: ρ_d – objemová hmotnost suché horniny; σ_c – pevnost v jednoosém tlaku; $\sigma_{t, \text{stt}}$ – pevnost v příčném tahu; $I_{s(50)}$ – index pevnosti při bodovém zatížení; R_{sch} – Schmidtova odrazová tvrdost (měřeno kladivem typu L); N – počet lokalit.

Při výběru dat vhodných ke korelační analýze byla zvažována následující kritéria: jednotnost v metodice testování (ideálně to, aby data pocházela z jedné laboratoře), pestrost druhového složení testovaných hornin, množství dostupných dat. Těmto požadavkům dobře odpovídá publikace „Inžinierskogeologický atlas hornin Slovenska“ (Holzer et al., 2009 – dál uváděno: „IG atlas“). Její rozsáhlá databáze je navíc dostupná v digitální podobě, čím ulehčuje další práci s daty. Atlas obsahuje řadu pevnostních a indexově-pevnostních zkoušek, na jejichž srovnání se právě tato dizertační práce zaměřuje. Výhodou v tomto případě je i značná podobnost používaných metodik testování hornin v České a Slovenské republice, daná společnou historií.

Z „IG atlasu“ byly vybrány pro další analýzu dvě skupiny vyvřelých hornin (granitoidy a vulkanity) a dvě skupiny usazených hornin (klastické a karbonátové sedimenty) uvedené v Tab. 3-1. Přeměněné horniny jsou v této databázi zastoupeny výrazně méně a jednotlivé litologické typy obsahují často pouze jednu lokalitu. Přeměněné horniny také často vykazují specifické neizotropní chování zapříčiněné foliací (Brosch et al., 2000), tudíž se složitěji popisují jejich mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů nebyly přeměněné horniny zařazeny do zde provedené korelační analýzy.

Pro analýzu Shoreho odrazové tvrdosti byly použity hodnoty naměřené autorem práce. Tato zkouška je v rámci České a Slovenské republiky momentálně málo frekventovaná, z čeho vyplývá špatná dostupnost již naměřených dat, které odpovídají výše zmíněným požadavkům.

Dvojice korelovaných vlastností uvedeny v kap. 3.2 byly analyzovány pro soubor všech lokalit a pro jednotlivé skupiny hornin (viz Tab. 3-1). Jedna z dvojice zkoumaných vlastností, je považována za nezávislou proměnnou x a druhá vlastnost je pak považována za závislou proměnnou y . Míra korelace byla zjištěna Pearsonovým testem, kde výsledkem je korelační koeficient r_{xy} (Wikipedia, 2020):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

kde x_i, y_i jsou jednotlivá měření korelovaných veličin a \bar{x}, \bar{y} jsou střední hodnoty korelovaných veličin. Míra korelace byla posouzena podle rozdělení uvedeného v Tab. 3-2.

Tab. 3-2: Míra korelace podle hodnoty korelačního koeficientu r_{xy} (Evans, 1995 in: Meghanathan, 2016).

Interval r_{xy}	Míra korelace	Interval r_{xy}	Míra korelace
0,80 až 1,00	Velmi silná pozitivní	-1,00 až -0,80	Velmi silná negativní
0,60 až 0,79	Silná pozitivní	-0,79 až -0,60	Silná negativní
0,40 až 0,59	Střední pozitivní	-0,59 až -0,40	Střední negativní
0,20 až 0,39	Slabá pozitivní	-0,39 až -0,20	Slabá negativní
0,00 až 0,19	Velmi slabá pozitivní	-0,19 až -0,01	Velmi slabá negativní

Soubor všech lokalit a dále skupiny hornin se střední a vyšší mírou korelace ($r_{xy} > 0,4$) analyzovaných veličin byly dále podrobeny regresní analýze. Nezávislá proměnná x vysvětluje závislou proměnnou $y \Rightarrow x$ je vysvětlující a y je vysvětlovaná veličina. Pomocí

metody nejmenších čtverců (vztah (3.2)) byly daty prokládány čtyři typy křivek (viz Tab. 3-3), kterými lze vystihnout různé trendy závislosti veličin. Z těchto křivek byl vybrán nejpřesnější regresní vztah, se kterým se dál pracovalo.

Tab. 3-3: Použité typy regresních funkcí, kde a , b jsou parametry regresní funkce.

Typ regresní funkce	Rovnice	Transformace pro lineární regresi
Lineární (Lin)	$y = a \cdot x + b$	-
Logaritmická (Log)	$y = a \cdot \ln x + b$	-
Exponenciální (Exp)	$y = a \cdot e^{bx}$	$\ln y = \ln a + b \cdot x$
Mocninová (Moc)	$y = a \cdot x^b$	$\log y = \log a + b \cdot \log x$

$$S_{rez} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \text{podmínka } S_{rez} = \min \quad (3.2)$$

kde S_{rez} je reziduální součet čtverců, y_i jsou jednotlivá měření vysvětlované veličiny a \hat{y}_i je odhad vysvětlované veličiny pomocí regresní funkce (převzato a upraveno z: (Novovičová, 2006)). Minimální hodnota S_{rez} byla nalezena pomocí modulu „solver“ v programu MS Excel, kde byly optimalizovány parametry regresních funkcí a , b uvedených v Tab. 3-3. Pro exponenciální a mocninovou funkci byla nutná transformace, aby bylo možné provést lineární regresi. V této transformaci byly hledány hodnoty koeficientů a , b a určena velikost koeficientu determinace R^2 . Pro další práci byly vztahy převedeny zpět do základního tvaru.

Pomocí koeficientu determinace R^2 byla pak vybrána nejpřesnější regresní funkce.

$$R^2 = 1 - \frac{S_{rez}}{S_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.3)$$

kde S_{rez} je reziduální součet čtverců, S_{tot} je celkový součet čtverců, y_i jsou jednotlivá měření vysvětlované veličiny a \hat{y}_i je odhad vysvětlované veličiny pomocí regresní funkce a \bar{y} je střední hodnota vysvětlované veličiny. Hodnota $R^2 \in \langle 0; 1 \rangle$. Hodnoty R^2 blízké 0 naznačují, že regresní rovnice není příliš užitečná pro predikování. Naproti tomu, hodnoty R^2 blízké 1 naznačují, že regresní rovnice je velice užitečná pro predikování (Novovičová, 2006).

Dále byla na zkoumaných datech ověřena spolehlivost vybraných regresních vztahů vyskytujících se v literatuře, které se týkají korelované dvojice vlastností hornin. Pro jednotlivé pozorované body byl vypočten odhad podle testované regresní funkce. Následně byla stanovena chyba jednotlivých odhadů:

$$\varepsilon_i = \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \cdot 100 \% \quad (3.4)$$

kde ε_i je chyba odhadu jednotlivého bodu vyjádřena v procentech, \hat{y}_i je odhad vysvětlované veličiny pomocí regresní funkce a y_i jsou jednotlivá měření vysvětlované veličiny. Ze všech ε_i

pro jednotlivé regresní funkce byly stanoveny základní statistické charakteristiky – minimum a maximum, střední hodnota, směrodatná odchylka a medián.

3.2. Dílčí korelační a regresní vztahy

Přehled konkrétních dvojic korelovaných vlastností zkoumaných v dizertační práci:

- Objemová hmotnost – Pevnost v jednoosém tlaku
- Pevnost v jednoosém tlaku – Pevnost v příčném tahu
- Index pevnosti při bodovém zatížení (PLT) – Pevnost v jednoosém tlaku
- Index pevnosti při bodovém zatížení (PLT) – Pevnost v příčném tahu
- Schmidtova odrazová tvrdost – Pevnost v jednoosém tlaku
- Shoreho odrazová tvrdost – Pevnost v jednoosém tlaku

4. Příklad

Kapitola 4.1 obsahuje prezentaci vlastních měření autora, kde je jako příklad uvedena pevnost v jednoosém tlaku. Práce v rámci korelační a regresní analýzy je ilustrována studií závislosti pevnosti v jednoosém tlaku na indexu pevnosti při bodovém zatížení (PLT) – viz kap. 4.2. Ve stejném stylu jsou v dizertaci zpracovány všechny zkoumané vlastnosti hornin a jejich korelace.

4.1. Realizované laboratorní zkoušky: Pevnost v jednoosém tlaku

V průběhu doktorského studia autor práce provedl poměrně rozsáhlý soubor zkoušek pevnosti v jednoosém tlaku na různých typech hornin. Naměřená data jsou sumarizována v Tab. 4-1. Kromě průměrných pevností jednotlivých hornin jsou uvedeny i základní statistické údaje jednotlivých sad měření (směrodatná odchylka, variační součinitel, počet měření). Horniny pocházejí z území České republiky a jsou rozříděny podle tří základních genetických typů: vyvřelé, usazené a přeměněné.

Vzorky pro laboratorní zkoušky byly získány z průzkumných vrtů, nebo z neporušených bloků horniny, ze kterých byla následně vrtáním a řezáním v laboratoři připravena zkušební tělesa. Testy uvedené v Tab. 4-1 (kromě granulitu) byly realizovány ve zkušebních lisech se servo-hydraulickou ovládací jednotkou Advatest 9 od výrobce CONTROLS. Záznam osově deformace probíhal pomocí axiálních LVDT snímačů umístěných mezi čelisti lisu.

Zkoušky byly vesměs řízeny konstantním přírůstkem napětí (0,3 až 1,0 MPa/s), kromě několika výjimek vyznačených v Tab. 4-1, kde byla použita kontrola deformace. Důvodem pro tuto změnu byl především zájem podrobněji zkoumat deformační odezvu těchto hornin.

Pro zkušební tělesa vyrobená z jader průzkumných vrtů byl typický častý výskyt poruch horninového materiálu, proto v mnoha uváděných případech vykazují značnou variabilitu výsledků (např. granodiorit 57 %, břidlice 40 %, ortorula 37 % – viz Tab. 4-1). Problémem bylo někdy i získání dostatečného množství materiálu vhodného ke zkoušení. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k redukci štíhlosti zkušebních těles ze základní hodnoty 2,0. V nezbytných případech byl snížen počet zkušebních těles (oproti základnímu souboru 5 ks).

Tab. 4-1: Souhrn testů pevnosti hornin v jednoosém tlaku σ_c .

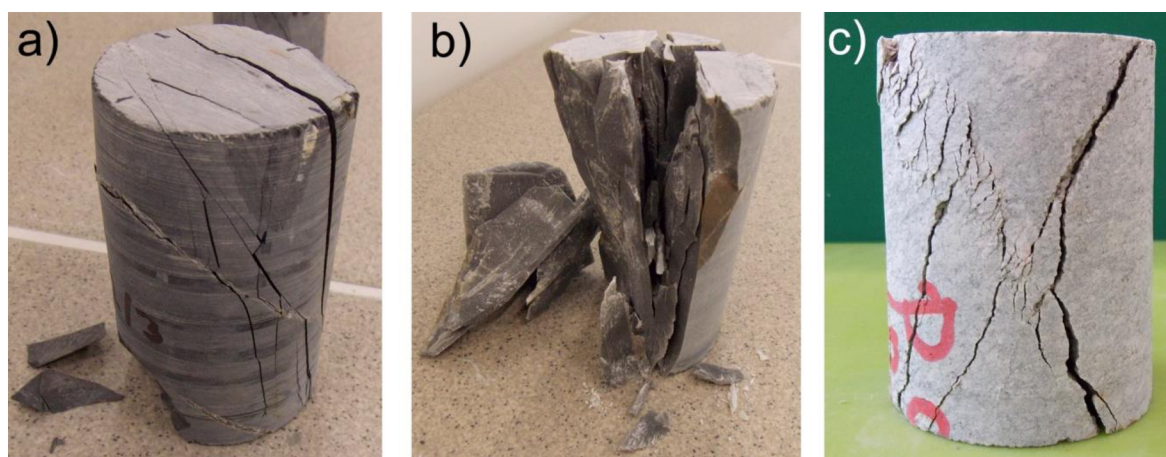
Hornina a lokalita	Geneze horniny	Odběr vzorků	L/D	Pevnost v tlaku σ_c [MPa]	Std [MPa]	Var [%]	N
Granodiorit – Dolní Kounice	vyvřelá	V	1,7	74	± 42	57	5
Trachyt – Ústí nad Labem	vyvřelá	V	1,7	65	± 19	29	5
Syenit – Kamenná *	vyvřelá	B	2,0	110	± 6	5	5
Syenit – Královec	vyvřelá	B	2,0	99	-	-	2
Enklávy v syenitu – Královec	vyvřelá	B	2,0	126	-	-	1
Slínovec písčité – V. Opatovice	usazená	V	1,7	55	± 8	15	5
Vápenec mikritický – Čs. kras	usazená	V	1,7	51	± 10	20	5
Pískovec křemenný – Děčínsko	usazená	V	1,7	31	± 4	12	5
Tufit – Vrané nad Vltavou	usazená	V	1,7	86	± 25	29	5
Břidlice – Štěchovice	usazená	V	1,7	29	± 11	40	5
Opuka 1 – Česká Skalice	usazená	V	1,4	100	± 15	15	6
Opuka 2 – Česká Skalice	usazená	V	1,4	78	± 18	23	6
Brekcie – Moravská Třebová *	usazená	V	1,9	66	± 15	23	7
Droba 1 dry – Koberžice *	usazená	B	2,0	206	± 17	8	13
Droba 1 wet – Koberžice	usazená	B	2,0	150	± 8	5	5
Droba 2 T – Koberžice	usazená	B	2,0	191	± 9	5	3
Droba 2 II – Koberžice	usazená	B	2,0	167	± 17	10	3
Pískovec – Žlutava *	usazená	B	2,0	27	± 5	19	10
Fylit – Železný Brod	přeměněná	V	1,7	6,1	-	-	1
Fylit až kvarcit – Vilémov	přeměněná	V	1,7	50	± 12	25	5
Pararula 1 – Hrob	přeměněná	V	1,7	29	-	-	2
Pararula 2 – Pec pod Sněžkou	přeměněná	V	1,4	72	± 11	15	6
Ortorula – Vlastějovice	přeměněná	V	1,7	66	± 24	37	4
Amfibolit – Hanušovice	přeměněná	V	1,7	62	± 20	33	5
Granulit T – Horní Bory *	přeměněná	B	2,0	240	-	-	1
Granulit II – Horní Bory *	přeměněná	B	2,0	225	-	-	1

Pozn.: V – vrtný průzkum, B – bloky horniny; L/D – štíhlostní poměr tělesa; T – zatížení kolmo k plochám vrstevnatosti/foliace; II – zatížení rovnoběžně s vrstevnatostí/foliací; * – test s řízenou deformací.

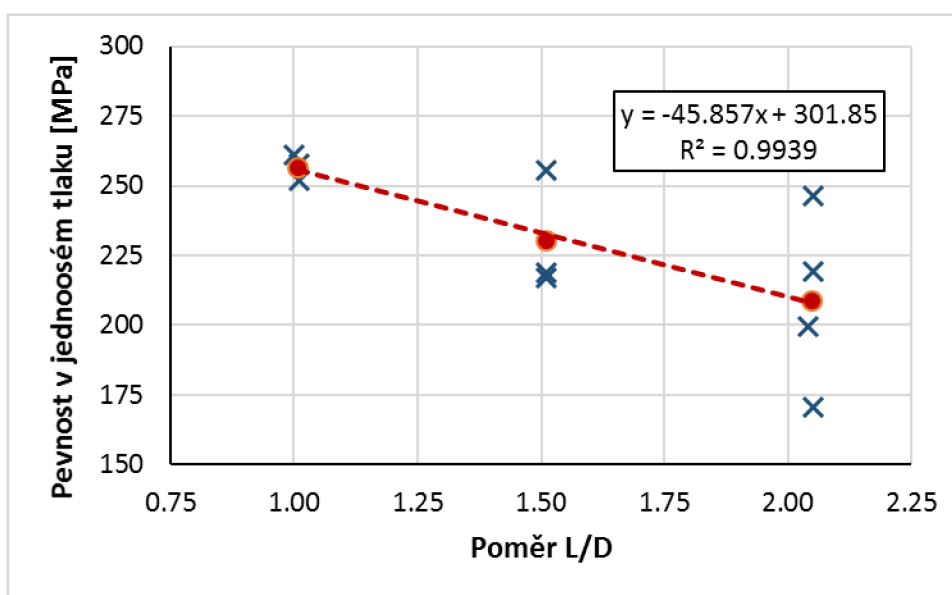
Bylo zajímavé pozorovat způsob porušení horninových těles, který se odlišoval v závislosti na struktuře horniny (Obr. 4-1). U břidlice se objevoval zřetelný rozvoj trhlin po plochách vrstevnatosti. Dále například křehký jemnozrnný tufit se vyznačoval vznikem svislých paralelních trhlin a sloupcovitým rozpadem. U méně křehkých hornin, jako například pararula, došlo ke kombinaci tlakového a smykového porušení a vzniku trhlin ve tvaru tzv. přesýpacích hodin.

Anizotropie pevnosti zapříčiněná strukturou horniny byla studována u droby 2 z Koberžic (hruboznejší typ) jako sedimentární horniny s rozpoznatelnou vrstevnatostí a granulitu z Horních Borů jako přeměněné horniny s evidentní foliací. Byly studovány základní případy s orientací vrstevnatosti, resp. foliace kolmo k nanášenému zatížení a rovnoběžně s ním (viz Tab. 4-1). Pokles pevnosti u drob byl 13 % a u granulitu 6 %, v obou případech při působení

zatížení rovnoběžně s plochami vrstevnatosti, resp. foliace. Nejvýznamnější pokles pevnosti by měl nastat při orientaci zatížení přibližně 30° vůči plochám oslabení (Goodman, 1989).



Obr. 4-1: Příklady různého typu porušení po zkoušce v jednoosém tlaku charakteristické pro různé typy hornin: a) břidlice (Štěchovice) se zřetelným rozvojem trhlin po plochách vrstevnatosti; b) křehký jemnozrný tufit (Vrané nad Vltavou) se sloupcovitým porušením; c) pararula (Pec pod Sněžkou) se vznikem trhlin do tvaru tzv. „přesýpacích hodin“.



Obr. 4-2: Ovlivnění pevnosti horniny v jednoosém tlaku štíhlostním poměrem zkušebního tělesa L/D . Kroužkem vyznačena průměrná hodnota pro jednotlivé sady vzorků, kterými byla proložena regresní přímka.

Přítomnost vody v pórech může ovlivnit pevnost horniny. U různých typů hornin se liší rozsah ovlivnění jejich pevnosti v důsledku přítomnosti vody a dosavadní poznatky v této oblasti komplexně shrnuje Wong et al. (2016). Na ověření jevu redukce pevnosti horniny po nasáknutí vodou byla provedena sada testů droby 1 z Koberic (jemnozrnější typ). Testovány byly vzorky ve vysušeném stavu (soubor 5 těles zařazených do studie $\sigma_{c,dry} = 201$ MPa) a po nasáknutí vodou (soubor 5 těles $\sigma_{c,wet} = 150$ MPa). Všechny vzorky byly připraveny z jednoho bloku horniny, aby byl snížen vliv variability struktury horniny. Úbytek pevnosti způsobený vodou byl v tomto případě 25 %. Studie s podrobnějším popisem dosažených výsledků již byla samostatně publikována (Šujanská a Závacký, 2018).

Pro zjištění vlivu štiřlostního poměru zkušebního tělesa L/D na pevnost v jednoosém tlaku byla provedena ověřovací studie (Závacký, 2020). K testování byla vybrána droba z Koberic (jemnozrnný typ) pro svou homogenitu. Celkem 10 válcových zkušebních těles ($D = 38$ mm) bylo připraveno z jednoho bloku horniny při stejné orientaci podélné osy. Poměry L/D byly: 1,0 (3x); 1,5 (3x) a 2,05 (4x) (Obr. 4-2). Průměrné hodnoty dosažených pevností pro jednotlivé skupiny byly: 257 ± 5 MPa, 230 ± 22 MPa a 209 ± 32 MPa (tyto hodnoty nejsou zahrnuty v Tab. 4-1). Ovlivnění pevnosti štiřlostním poměrem L/D vykazuje negativní lineární trend a zvyšující se variabilitu výsledků s rostoucí hodnotou L/D (viz Obr. 4-2).

4.2. Dílčí korelace: Index pevnosti při bodovém zatížení (PLT) – Pevnost v jednoosém tlaku

Zkouška indexu pevnosti při bodovém zatížení je primárně určena ke zjišťování indexového parametru $I_{s(50)}$ jako klasifikační vlastnosti hornin. Je ovšem rovněž použitelná k odhadu jiných pevnostních charakteristik hornin (Franklin et al., 1985). Posouzení korelace mezi indexem pevnosti při bodovém zatížení $I_{s(50)}$ a pevností v jednoosém tlaku je uvedeno v Tab. 4-2. Všechny skupiny hornin projevily pozitivní korelaci, kromě granitoidů s velmi slabou negativní korelací. Nejsilnější korelace je u vulkanitů a nejnižší je u klastických sedimentů.

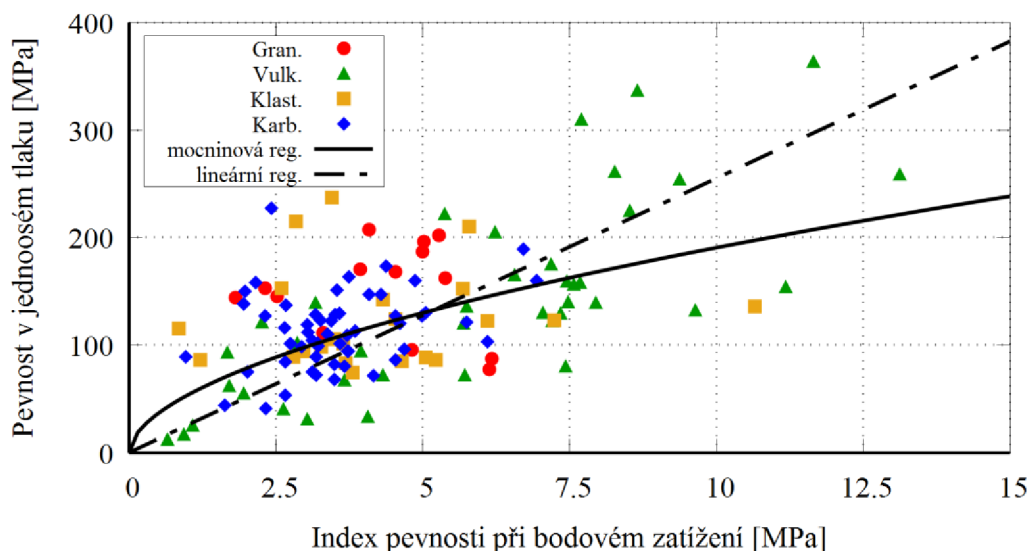
Regresní analýzou popsanou v kap. 3.1 byly nalezeny nejvhodnější typy regresních funkcí, které jsou uvedeny v Tab. 4-3 pro soubor všech lokalit a vulkanity. Pro obě sady dat je nejvhodnější mocninová funkce. Pro odhad pevnosti hornin v tlaku z indexu pevnosti v bodovém zatížení se často využívá jednoduchá lineární regrese ve tvaru $K \cdot x$, (viz vztah 4.5). Z tohoto důvodu byly doplněny také regresní vztahy (4.3) a (4.4).

Tab. 4-2: Míra korelace indexu pevnosti při bodovém zatížení $I_{s(50)}$ a pevnosti v jednoosém tlaku podle studovaných skupin hornin a jejich další zařazení k regresní analýze.

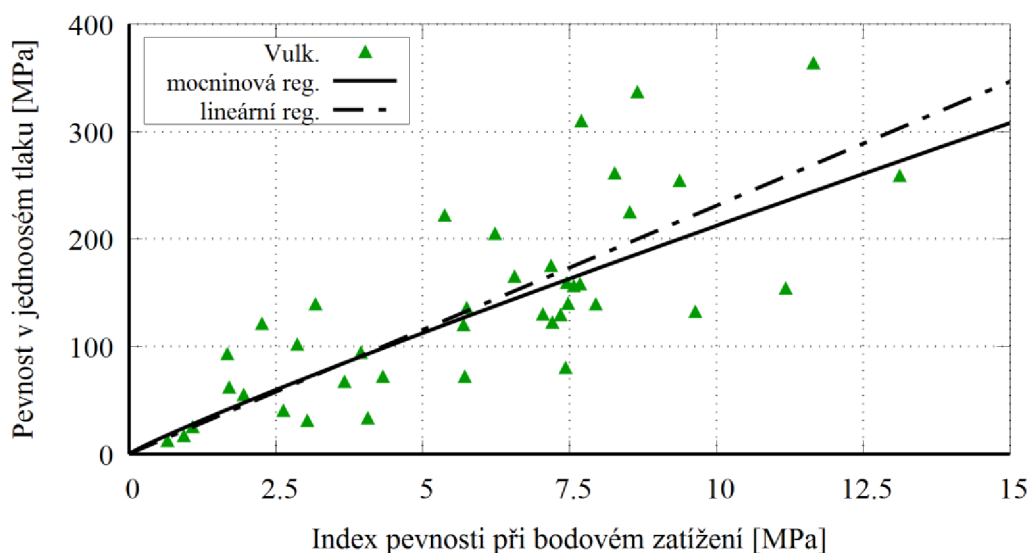
Skupina hornin	Korelační koeficient r_{xy}	Míra korelace	Regresní analýza
Všechny lokality	0,570	Střední pozitivní	$r_{xy} > 0,4 \Rightarrow$ ANO
Granitoidy	-0,150	Velmi slabá negativní	$r_{xy} > -0,4 \Rightarrow$ NE
Vulkanity	0,757	Silná pozitivní	$r_{xy} > 0,4 \Rightarrow$ ANO
Klastické sedimenty	0,124	Velmi slabá pozitivní	$r_{xy} < 0,4 \Rightarrow$ NE
Karbonátové sedimenty	0,305	Slabá pozitivní	$r_{xy} < 0,4 \Rightarrow$ NE

Tab. 4-3: Nejvhodnější regresní funkce s nejvyšší hodnotou koeficientu determinace R^2 a zjednodušené lineární regresní vztahy.

Skupina hornin	Typ funkce	R^2	Regresní funkce	Vztah č.
Všechny lokality	Mocninová	0,34	$y = 53,5 \cdot x^{0,556}$	(4.1)
Vulkanity	Mocninová	0,69	$y = 25,7 \cdot x^{0,917}$	(4.2)
Všechny lokality	Lineární ($K \cdot x$)	0,08	$y = 25,6 \cdot x$	(4.3)
Vulkanity	Lineární ($K \cdot x$)	0,57	$y = 23,1 \cdot x$	(4.4)



Obr. 4-3: Závislost indexu pevnosti při bodovém zatížení $I_{s(50)}$ a pevnosti v jednoosém tlaku pro všechny lokality s mocninovou regresní křivkou (4.1) a lineární regresí (4.3).



Obr. 4-4: Závislost indexu pevnosti při bodovém zatížení $I_{s(50)}$ a pevnosti v jednoosém tlaku pro vulkanity s mocninovou regresní křivkou (4.2) a lineární regresí (4.4).

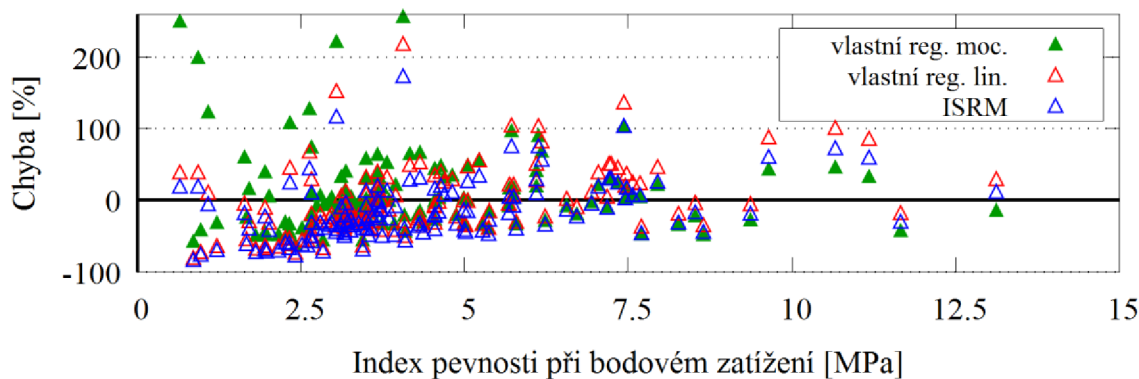
Na Obr. 4-3 je patrné rozložení naměřených bodů závislosti pevnost při bodovém zatížení – pevnost v jednoosém tlaku. Granitoidy a sedimenty, jak klastické, tak karbonátové, nevykazují téměř žádnou tendenci, což také odpovídá míře korelace vyhodnocené v Tab. 4-2. Jedinou skupinou hornin s poměrně výraznou korelací jsou vulkanity. Z grafu na Obr. 4-4 lze zobecnit, že pevnost v tlaku roste s pevností v bodovém zatížení. Při srovnání mocninového (4.2) a lineárního regresního vztahu (4.4) si lze povšimnout velmi podobného průběhu těchto křivek.

V praxi je zaužíván jednoduchý přístup přepočtu na pevnost v jednoosém tlaku pomocí korekčního součinitele:

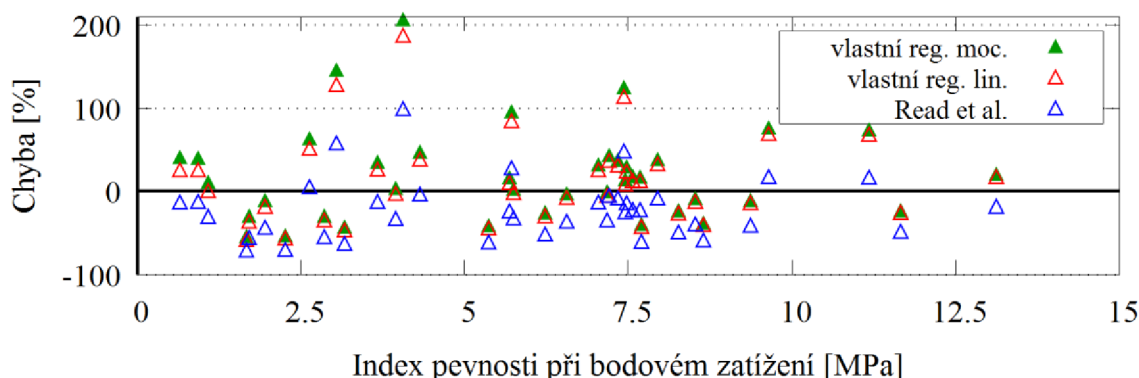
$$\sigma_{c,PLT} = K * I_{s(50)} \quad (4.5)$$

kde $\sigma_{c,PLT}$ je odhad pevnosti v jednoosém tlaku stanovený z indexu pevnosti v bodovém zatížení, K je korekční součinitel a $I_{s(50)}$ je index pevnosti v bodovém zatížení.

Existuje značné množství publikací s různými hodnotami součinitele K stanoveného například podle typu horniny, geografické oblasti, nebo představuje obecnou hodnotu univerzálně použitelnou pro všechny typy hornin. Například metodika ISRM uvádí hodnotu $K = 22$ pro všechny typy hornin (Franklin et al., 1985). Pro bazalty se uvádí $K = 16$ (Read et al., 1980 in: Durmeková et al., 2013), přičemž tato hodnota součinitele zde byla testována pro odhad pevnosti vulkanitů bez podrobnějšího rozlišení.



Obr. 4-5: Chyba odhadů pevnosti v tlaku pro všechny lokality podle mocninového vztahu (4.1), lineárního vztahu (4.3) a (4.5 – ISRM).



Obr. 4-6: Chyba odhadů pevnosti v tlaku pro vulkanity podle mocninového vztahu (4.2), lineárního vztahu (4.4) a (4.5 – Read et al.).

Z grafu na Obr. 4-5 je patrné, že mocninový regresní vztah (4.1) má tendenci výrazně nadhodnocovat pevnost v některých případech pro nižší hodnoty indexu pevnosti. Vztah (4.5) podle ISRM produkuje obecně nižší hodnoty pevnosti a má také relativně konzistentnější odhad (nižší hodnota Std – viz Tab. 4-4). V grafu na Obr. 4-6 si lze povšimnout tendence podhodnocovat pevnost vulkanitů v případě vztahu (4.5) podle Reada et al. Rovněž zde ale platí relativní vyváženost chyby právě tohoto vztahu oproti vlastním regresím v podobě nižší Std (viz Tab. 4-4). Podle zhodnocení v Tab. 4-4 lze konstatovat, že mocninové regresní vztahy (4.1) a (4.2) produkují větší extrémní nadhodnocení pevnosti, než lineární vztahy. S použitím vztahu (4.5) podle ISRM a Reada et al. lze obecně dosáhnout vyrovnanější, i když konzervativnější odhad pevnosti v tlaku, než s použitím regresních vztahů (4.1) až (4.4).

Tab. 4-4: Statistické údaje o velikosti chyb při odhadu pevnosti v tlaku pomocí testovaných regresních vztahů.

-	Všechny horniny, mocninový vztah (4.1)	Všechny horniny, lineární vztah (4.3)	Všechny horniny, lineární vztah (4.5) ISRM	Vulkanity, mocninový vztah (4.2)	Vulkanity, lineární vztah (4.4)	Vulkanity, vztah (4.5) Read et al.
min	-61%	-81%	-84%	-55%	-59%	-71%
max	257%	219%	174%	207%	188%	99%
mean	11%	-1%	-15%	20%	13%	-22%
std	0,56	0,48	0,42	0,55	0,52	0,36
median	1%	-10%	-22%	15%	9%	-24%

Pozn.: mean – střední hodnota vypočtená jako aritmetický průměr; Std – směrodatná odchylka.

5. Diskuse k výsledkům dizertační práce

5.1. Laboratorní zkoušky

Při praktickém provádění laboratorních zkoušek se autor potýkal s různými činiteli, které mohou mít dopad na výsledky testů. V této kapitole je na základě praktických zkušeností a poznatků z literatury diskutováno, jak zvýšit výpovědnou hodnotu testů.

- Stanovení **objemové hmotnosti** je nenáročná a nedestruktivní zkouška. Pokud máme k dispozici opracované vzorky přesného geometrického tvaru, například pro testy pevnosti, pak je zkouška poměrně rychlá. Je vhodné mít k dispozici váhy s podvěsným vážením v případě potřeby hydrostatického vážení. Varianta hydrostatického vážení je zdouhavější, ale dokáže využít i relativně malá a nepravidelná tělesa, která nejsou vhodná k mechanickým zkouškám. K výsledku je důležité doplnit, k jakému stavu vlhkosti se objemová hmotnost vztahuje (přirozená vlhkost, vysušená, nebo plně nasycená hornina).

Objemové hmotnosti změřené v rámci dizertační práce vykazují nejnižší variabilitu ze zde studovaných vlastností hornin. Z 23 lokalit se součinitel variability Var v 18 případech pohybuje pod 1 %. Maximální variabilita dosahuje 3,5 %. Lze tedy konstatovat, že objemovou hmotnost horniny je možné stanovit s relativně vysokou přesností.

- **Pevnost v jednoosém tlaku** je považována za základní charakteristiku horniny v MH. Jejím stanovení se věnuje značné množství metodik, které mají různé požadavky na provedení zkoušky. Hodnotu pevnosti v jednoosém tlaku ovšem ovlivňuje mnoho faktorů. Je to velikost a tvar zkušební tělesa, štíhlostní poměr, kvalita výroby zkušebních těles (rovinnost zatěžovaných podstav), rychlost zatěžování, vlhkost vzorku či orientace ploch oslabení (vrstevnatost, foliace) (Hawkes a Mellor, 1970).

Problémem při srovnávání hodnot dosažené pevnosti mezi různými studii může být rozdílná velikost a štíhlostní poměr zkušebních těles (tzv. „scale-effect“). Vlivem geometrie se zabývali např. Goodman (1989) a Du et al. (2019), kteří konstatují pokles pevnosti se zvětšující se velikostí zkušební tělesa. K podobným závěrům došli i Yoshinaka et al. (2008), kteří doplňují, že velikost „scale-effect-u“ může záviset na typu, struktuře a pevnosti horniny. Durmeková a Ondrášek (2012) popisují pískovec, který se vymyká zmíněnému zaužívanému předpokladu. Hornina s rostoucí velikostí vzorku i štíhlostním poměrem L/D tělesa dosáhla vyšších pevností. Proto není vhodné

používat obecné vzorce pro přepočítání pevnosti na jinou velikost zkušební tělesa, ale experimentálně stanovit tento vztah pro každý petrografický typ horniny samostatně (Durmeková a Ondrášek, 2012). Existenci „scale-effect“-u potvrzuje také autor dizertace svou studií na drobkách (Závacký, 2020). S rostoucí štíhlostí válcových vzorků klesala pevnost a rostl rozptyl dosažených hodnot pevnosti. Vhodnou volbou tvaru zkušebních těles jsou válce se štíhlostním poměrem 2,0, které odpovídají požadavkům mezinárodně uznávaných metod testování hornin (ISRM, ASTM) a splňují také nároky pro určení přetvárných charakteristik, které jsou diskutovány níže. Válcové vzorky jsou podle praktických zkušeností autora vhodné i z pohledu výroby a opracování zkušebních těles.

Dalším problémem při zjišťování pevnosti horniny v jednoosém tlaku je vlhkost vzorku. Hawkes a Mellor (1970) a Wong et al. (2016) upozorňují, že kromě rozdílu v pevnosti vysušené a plně nasycené horniny může mít značný vliv již částečné nasáknutí adsorpční vzdušné vlhkosti. Pokud tedy testujeme horninu ve „vysušeném stavu“ a důsledně nekontrolujeme změny vlhkosti mezi ukončením sušení a testováním, nejedná se o úplně exaktní přístup, neboť i kontakt vzorku se vzdušnou vlhkostí může ovlivnit výslednou pevnost. Autor dizertace také potvrzuje významný pokles pevnosti (25 %) u droby nasáklé vodou ve srovnání s vysušenými vzorky v kontaktu se vzdušnou vlhkostí (Šujanská a Závacký, 2018).

Z uvedené polemiky můžeme konstatovat, tak jako Tang a Hudson (2010), že pevnost v jednoosém tlaku je více experimentální vlastnost, než materiálová charakteristika. Východiskem z této situace může být celkové sjednocení metodik pro zkoušky pevnosti hornin v tlaku a zavedení jednoznačných prováděcích podmínek bez ohledu na jaký účel se pevnost zjišťuje, jak navrhuje Durmeková et al. (2013). Dokud nedojde k oficiálnímu sjednocení, je velmi vhodné alespoň podrobně zaznamenat, za jakých podmínek byly zkoušky realizovány, aby mohly být objektivně srovnávány s jinými výsledky pevnosti v jednoosém tlaku.

Podle Tab. 4-1 se v souboru testovaných hornin pohybuje jejich pevnost v širokém intervalu od 6,1 MPa (fylit) do 240 MPa (granulit). Variabilita výsledků pro jednotlivé lokality kolísá od 5 do 57 %. Pro některé lokality je tedy postačující menší počet zkušebních těles, jiné si zas vyžadují provedení většího počtu zkoušek, aby byla dostatečně výstižně zachycena proměnlivost horniny. Není tedy zcela správné obecně stanovit pevný počet zkoušek pro jednu lokalitu.

- **Přetvárné charakteristiky hornin** (statický modul pružnosti E , modul deformace E_{def} , Poissonovo číslo ν) jsou obvykle určovány při zkoušce v jednoosém tlaku. V této souvislosti je nutno mít na zřeteli, že u předmětné zkoušky se jedná o namáhání vzorku jednoosým tlakem pouze ve smyslu zatěžovací soustavy, ale ne z pohledu napjatosti ve vzorku Durmeková et al. (2013). Důvodem je tření na kontaktu podstav vzorku s čelistmi zatěžovacího lisu, které vytváří ve vzorku oblasti koncentrovaného napětí a vysokého přetvoření (Thuro et al., 2001). Pro relevantní stanovení přetvárných charakteristik je proto nutné používat tělesa s dostatečnou štíhlostí a měřit deformace vzorku ve střední části s pružnou deformací. Vhodná a zaužívaná štíhlost tělesa je 2,0 (případně vyšší) a odpovídá požadavkům např. ČSN EN 14580, nebo metodikám ISRM (Bieniawski et al., 1979).

K měření lokálních deformací přímo na vzorku je možné využít odporových tenzometrů, LVDT, nebo optoelektronických snímačů. Autor práce má zkušenosti s prvními dvěma typy snímačů, kterých srovnání provedl ve studii (Závacký a Štefaňák, 2019). Odporové tenzometry jsou jednorázové snímače, které se musí pevně nalepit na vzorek, čímž je jejich instalace pracnější oproti lehce upínatelným LVDT. U odporových tenzometrů je

také značné riziko jejich poškození trhlinami tvořícími se ve vzorku. Ohrožen je zejména snímač příčné deformace. Tato technologie tedy neumožňuje spolehlivé ovládní zkoušky s kontrolou příčné deformace v blízkosti maximálního zatížení a po jeho překročení. Značnou výhodou odporových tenzometrů oproti LVDT je jejich řádově nižší cena.

Existuje více způsobů, jak z pracovního diagramu určit hodnotu konkrétního modulu. Pracujeme-li pouze s pružnou deformací (zjistíme ji pomocí odlehčovacího cyklu v průběhu zkoušky – popisuje ČSN EN 14580), hovoříme o modulu pružnosti E . Zahrneme-li do vyhodnocení i nevratnou deformaci, hovoříme o deformačním modulu E_{def} , který lze stanovit jako tečnový, průměrný, nebo sečnový. Tyto různé metodiky srovnávaly ve studii např. Małkowski a Ostrowski (2017) a také autor dizertace (Závacký a Horák, 2019) se závěrem, že hodnota modulu je závislá na oboru napětí, ze kterého se stanovuje a je tedy velmi důležité k výsledku zkoušky uvést také podrobnosti použité metodiky. Z pohledu praxe je žádoucí, aby zadavatel zkoušky definoval požadavky na test přetvárných charakteristik s ohledem na jejich další využití. Každá geotechnická úloha je totiž specifická a je tedy důležité, aby projektant pracoval s relevantními hodnotami přetvárných charakteristik.

Pro výpočet deformací v geotechnické úloze je důležitým parametrem také Poissonovo číslo ν . Je důležité určovat jeho hodnotu při nižším namáhání vzorku, kdy ještě nedochází k porušování vnitřní struktury horniny. Vhodným způsobem stanovení ν je využití odlehčovacího cyklu.

Podrobná analýza jednotlivých složek přetvoření (osové, příčné, objemové) umožňuje identifikovat postupně probíhající fáze porušování hornin, které nemusí být makroskopicky rozeznatelné (Martin a Chandler, 1994), (Zhao a Cai, 2010). Na základě těchto měření lze detailně popsat chování horniny (Cieslik, 2013), či srovnat účinek změn metodiky testování (Du et al., 2019). Autor práce také provedl několik analýz složek přetvoření, které rozšiřují poznání získané z obvyklého pracovního diagramu a ukazují významné rozdíly v průběhu porušování různých hornin, které se odehrává nejenom v hodnotě dosažené pevnosti. Tímto podrobným přístupem k vyhodnocování zkoušek je možné lépe pochopit a vysvětlit makroskopické odlišnosti v chování hornin a také například určit obor napětí vhodný ke stanovení Poissonova čísla.

- Určení **pevnosti horniny v trojosém tlaku** je pro geotechnickou praxi významné. Právě triaxiální zkoušky simulují víceosové tlakové namáhání hornin, které je typické pro horninový masív. V důsledku tohoto namáhání dochází ke smykovému porušení hornin.

Samotné triaxiální testy jsou ovšem pouze podkladem k určení podmínky porušení, kterou je charakterizována pevnost horniny za různých stavů napjatosti. Právě formulace podmínky porušení je významná pro řešení geotechnických úloh. V praxi jsou v mechanice hornin zaužívány Mohr-Coulomb (M-C) a Hoek-Brown (H-B) podmínky. M-C podmínka byla převzata z mechaniky zemin, ovšem chování hornin značně zjednodušuje. Pro horniny typický nelineární průběh čáry pevnosti lépe vystihuje H-B podmínka vytvořená právě pro tuto problematiku (Hoek a Brown, 1980).

Ani tato teorie ovšem není dokonalá a jsou proto navrhovány částečná zlepšení, například zpřesnění aproximace pevnosti horniny v tahové oblasti (Cai, 2010). Nové poznatky z teoretické a praktické mechaniky hornin jsou do H-B podmínky postupně zapracovávány (Hoek a Brown, 2019), čím se zvyšuje její výstižnost. Velmi užitečnou pro praxi je možnost upravit parametry této podmínky pomocí stupnice GSI tak, aby charakterizovala celý skalní masív včetně diskontinuit. Toto rozšíření ovšem značně

přesahuje problematiku laboratorního testování hornin, proto se jím autor dizertace podrobněji nezabýval.

- **Přímé zjištění tahové pevnosti hornin** si vyžaduje speciální vybavení, kterým standardně laboratoř MH nedisponuje, vyhotovení štíhlých zkušebních těles s vysokou geometrickou přesností a vyřešení uchycení tělesa při zkoušce (Nagaraj, 1993). Pro uvedené komplikace byla proto pozornost věnována jednodušší proveditelné zkoušce v příčném tahu, označované též jako Brazílská zkouška, která určuje tahovou pevnost sice nepřímo, ale obecně je uznávaná jako plnohodnotná náhrada přímé zkoušky (Erarslan, 2012).

Snahy o zjednodušení zkoušky v přímém tahu ovšem neustaly. Luong (1986) publikoval ve Francii studii o modifikované tahové zkoušce – MTT. Tuto metodu používají v některých laboratořích MH v Rakousku (Blümel, 2000) a Německu (Plinninger et al., 2004). Autor dizertace také provedl pilotní studii v rámci ČR (Závacký, 2019). Molenda et al., (2013) vyjádřili pochybnosti o rozložení napětí v tělese při MTT a proto je nutné tuto metodu podrobněji prostudovat i z hlediska mechaniky.

- **Pevnost při bodovém zatížení** je již po dlouhou dobu etablovanou indexovou zkouškou, která se uplatňuje při geologickém průzkumu. Podrobně ji popisuje metodika ISRM (Franklin et al., 1985). V této metodice je popsán také způsob stanovení indexu pevnosti při bodovém zatížení $I_{s(50)}$, který se využívá jako klasifikační parametr a často se pomocí něho odhaduje pevnost horniny v jednosém tlaku. K výpočtu $I_{s(50)}$ se zavádí tzv. ekvivalentní průměr D_e a dále se pracuje se čtvercem této vzdálenosti (D_e^2). Thuro (2010) modifikoval postup vyhodnocení, kde využívá přímo průmět plochy vzniklé porušením vzorku.

Thurova metodika je podle názoru autora jednodušší uchopitelná, ovšem při přepočtu maximální síly dosažené při testu na indexovou hodnotu $I_{s(50)}$ produkuje systematicky nižší hodnoty, než postup podle ISRM. Rozdíl vzniká nadhodnocením skutečné plochy porušení metodikou ISRM o 27 % v důsledku použití D_e^2 . V praxi je pro vyhodnocování častěji používán postup podle ISRM. Proto je při použití jiného postupu, např. (Thuro, 2010), nutné dostatečně zdůraznit tento fakt a dále ho uvádět s hodnotou $I_{s(50)}$, aby nedošlo k dezinterpretaci výsledku.

Výsledek zkoušky může být ovlivněn nejenom anizotropií pevnosti testované horniny, či její vlhkostí, ale například i zkušeností a drobnými odlišnostmi v technice provádění testu operátorem (Durmeková et al., 2013). Proto je důležité zaznamenávat všechny okolnosti provádění zkoušky.

- **Schmidtova odrazová tvrdost** je často využívaná indexová zkouška k popisu hornin. Je považována za nedestruktivní metodu, která podle zkušeností autora může způsobit poškození v případě malých vzorků, například vrtných jader. Tato odrazová zkouška podléhá celé řadě detailů provedení zkoušky, které autor při testování pozoroval.

Je důležité pevné uložení testovaného vzorku tak, aby nedocházelo k disipaci nárazové energie a tím ke zkreslení měření. Zejména vrtná jádra by měla být uchycena vždy stejným způsobem, ideálně v souladu s ISRM metodikou (Aydin, 2009), protože při

změně uchycení dochází k odlišnému útlumu nárazové energie a tím k ovlivnění výsledku.

Zkouška je také citlivá na objem zkušebního tělesa. Autor tento jev zaznamenal při testování bloků hornin a vrtných jader ze stejného materiálu. Demirdag et al. (2009) identifikovali kritickou velikost vzorku $1,33 \text{ dm}^3$, nad kterou již nedochází k ovlivnění měření. Katz et al. (2000) popisují citlivost zkoušky na členitost povrchu testované horniny. Autor práce studoval tento jev na pískovci, kde při větší členitosti rostl rozptyl naměřených hodnot. To ale není důvodem k zamítnutí takových testů, ale jako opatření lze zvýšit počet měření, aby se zachovala výpovědná hodnota souboru naměřených hodnot. Rozdíly byly pozorovány i podle původu povrchu – přírodní diskontinuita, uměle rozpojená hornina (Závacký a Závacký, 2019). Autor v dizertaci dokumentuje rozdíl v hodnotách odrazové tvrdosti také podle struktury horniny, kde jemnozrnější pískovec a droba dosáhly vyšší odrazovou tvrdost, než stejná, ale hrubozrnější hornina. Výše popsané jevy byly v průběhu práce podrobněji studovány pouze u dvou typů hornin a nelze tak zatím pozorované trendy zobecňovat.

Schmidtova odrazová zkouška je tedy do značné míry citlivá na okolnosti testování. V případě, že bychom trvali na dodržení všech podmínek eliminujících vnější vlivy, zkouška by přišla o svou jednoduchost a rychlost provedení. Je tedy na místě akceptovat jisté nedokonalosti v zájmu zachování robustné použitelnosti zkušební metody, které ovšem zohledníme při vyhodnocování výsledků. Právě k vyhodnocování poznamenává metodika ISRM, že by se neměly vyřazovat krajní hodnoty z naměřeného intervalu, protože i ty charakterizují heterogenitu horniny. Jako výsledek by se měly uvádět nejenom průměrné hodnoty, ale také medián, modus a rozsah naměřených hodnot (Aydin, 2009).

- Měření **Shoreho odrazové tvrdosti** je v rámci ČR v současnosti ojedinělá zkouška. Má ovšem své přednosti, jako využitelnost i relativně malých vzorků, díky nízké nárazové energii nedochází k poškození vzorku, nebo jen ve velmi malé míře bezprostředně v místě dopadu testovacího hrotu a má potenciál v možnosti odhadu dalších vlastností hornin na základě takto zjištěné odrazové tvrdosti. Nevýhodou této zkoušky je nutnost testování těles s opracovaným hladkým povrchem, což ale na druhou stranu zlepšuje homogenitu měření.

Rozšířenější typ Shoreho přístroje C je citlivý na zkreslení měření na tělesech menšího objemu, než 80 cm^3 (Altindag, 2002). Z tohoto pohledu je výhodnější použití přístroje typu D, který tuto citlivost nevykazuje a získané hodnoty odrazové tvrdosti projevují jen malé rozdíly oproti hodnotám z přístroje C (Hólmgeirsdóttir a Thomas, 1998).

5.2. Korelační analýza

Korelační analýza byla provedena na údajích ze 127 lokalit uvedených v databázi v „IG atlasu“ (Holzer et al., 2009) a v případě Shoreho odrazové tvrdosti na 16 lokalitách z dat autora. Studováno bylo celkem 6 dvojic vlastností (viz kap. 3.2). Kromě souboru všech lokalit, byly studovány i korelace v dílčích souborech rozříděných podle typů hornin.

Hodnoty korelačních koeficientů r_{xy} jsou uvedeny sumárně v Tab. 5-1 a pro Shoreho odrazovou tvrdost v Tab. 5-2.

Pro všechny lokality se hodnota r_{xy} pohybuje v intervalu od 0,476 ($R_{sch} - \sigma_c$) do 0,692 ($R_{sh} - \sigma_c$). V případě rozdělení podle typů hornin, došlo v 11 z 22 případů ke zvýšení míry korelace. Očekávaný byl vyšší podíl kladných výsledků, takže se nepotvrdil předpoklad, že toto rozčlenění přinese významné zvýšení míry korelace. Celkově se míry korelace (pouze v rámci Tab. 5-1) pohybují v nízkých hodnotách a jenom 7 z 25 případů dosahuje silnou korelaci (nad 0,6). Jako nejvýznamnější se ukázaly vztahy $\sigma_c - \sigma_{t,stit}$ a $I_{s(50)} - \sigma_{t,stit}$ (o $R_{sh} - \sigma_c$ bude pojednáno níže). Kromě dvou výjimek u granitoidů jsou všechny závislosti v Tab. 5-1 a Tab. 5-2 kladné.

Skupina granitoidů vykazuje celkově nejnižší míru korelace. Pouze v případě $R_{sch} - \sigma_c$ dosahuje středně silnou korelaci, ovšem zápornou (viz Tab. 5-1), co je v rozporu s ostatními skupinami hornin a všeobecným předpokladem. Zřejmě jde o falešnou korelaci, která by při početnějších zkouškách mohla vykazat jiný trend. Protože se jedná o méně početný soubor dat, který v jiných případech nevykazuje významnou korelaci, nelze hodnotě r_{xy} v tomto případě přikládat zásadní význam.

Tab. 5-1: Míra korelace studovaných dvojic vlastností hornin vyjádřená hodnotou korelačního koeficientu r_{xy} .

Skupina hornin	$\rho_d - \sigma_c$	$\sigma_c - \sigma_{t,stit}$	$I_{s(50)} - \sigma_c$	$I_{s(50)} - \sigma_{t,stit}$	$R_{sch} - \sigma_c$
Všechny lokality (127)	0,480	0,644	0,570	0,637	0,476
Granitoidy (14)	0,365	0,004	-0,150	0,157	-0,518
Vulkanity (40)	0,708	0,823	0,757	0,819	0,644
Klastické sedimenty (19)	0,501	0,609	0,124	0,412	0,301
Karbonátové sedimenty (54)	0,595	0,303	0,305	0,323	0,594

Pozn.: ρ_d – objemová hmotnost suché horniny; σ_c – pevnost v jednoosém tlaku; $\sigma_{t,stit}$ – pevnost v příčném tahu; $I_{s(50)}$ – index pevnosti při bodovém zatížení; R_{sch} – Schmidtova odrazová tvrdost; v závorce uveden počet lokalit daného souboru.

Tab. 5-2: Míra korelace Shoreho odrazové tvrdosti R_{sh} a pevnosti v jednoosém tlaku σ_c vyjádřená hodnotou korelačního koeficientu r_{xy} .

Skupina hornin	Všechny lokality (16)	Vyvřelé + přeměněné (8)	Usazené (8)
$R_{sh} - \sigma_c$	0,692	0,926	0,827

Pozn.: v závorce uveden počet lokalit daného souboru.

Skupina vulkanitů jako jediná skupina hornin ve všech korelacích dosáhla silnou, nebo velmi silnou míru korelace (viz Tab. 5-1). Má tedy nejvýznamnější podíl na míře korelace pro souhrn všech lokalit. Může to být způsobeno zastoupením poměrně širokého intervalu vlastností hornin. Uvážíme-li, že v souboru jsou začleněny horniny od málo pevných pórovitých tufů až po velmi pevné a kompaktní bazalty, je zde dobrý předpoklad na výraznější projevení se určitého trendu chování hornin. Naproti tomu granitoidy, nebo karbonátové sedimenty jsou v rámci své skupiny podobnými horninami z pohledu složení

a struktury, tudíž trend korelovaných vlastností nemusí být tak výrazný a spíše se v naměřených hodnotách projevuje jistá náhodnost.

Podle hodnot r_{xy} se zdá jako nejlepší korelace $R_{sh} - \sigma_c$, obzvlášť v případě rozčlenění podle typů hornin. Jedná se ovšem o vyhodnocení odlišného souboru dat, než v ostatních případech a jde o značně menší množinu údajů. Při rozšíření této analýzy lze také předpokládat pokles hodnot r_{xy} v důsledku velké variability chování hornin, které se projevilo v ostatních korelovaných vlastnostech. Nicméně je zapotřebí ověřit tento předpoklad dalším testováním a zatím jsou výsledky korelace $R_{sh} - \sigma_c$ nejslibnější ze všech studovaných případů.

Regresní analýza byla provedena pouze v případech, kdy $|r_{xy}| > 0,4$. V Tab. 5-3 a 5-4 jsou sumarizovány typy regresních vztahů, které nejpřesněji popisují daný soubor hodnot. Mocinná funkce je nejpočetněji zastoupena, a to ve 12 z 19 případů. Pouze u vztahu $\rho_d - \sigma_c$ je dominantní exponenciální funkce. Jak bylo zmíněno výše, skupina vulkanitů se významně podílí na míře korelace souhrnu všech lokalit. Odráží se to na typech regresních funkcí, které jsou pro samostatně hodnocené vulkanity a všechny lokality hodnocené společně totožné ve všech případech (viz Tab. 5-3).

V analýze chyby odhadu hledaného parametru horniny pomocí regresních vztahů se ukázalo, že některé dříve publikované regrese systematicky nadhodnocovaly, nebo podhodnocovaly pevnost analyzovaných hornin. V některých případech docházelo k produkci nesmyslných odhadů, kdy pevnost nabývala záporných hodnot. Není tedy vhodné nekriticky přebrat určitý regresní vztah bez jeho verifikace.

Tab. 5-3: *Shrnutí nejvýstižnějších typů regresních funkcí pro danou skupinu hornin a dvojici vlastností. V závorce uvedena hodnota koeficientu determinace R^2 .*

Skupina hornin	$\rho_d - \sigma_c$	$\sigma_c - \sigma_{t,stt}$	$I_{s(50)} - \sigma_c$	$I_{s(50)} - \sigma_{t,stt}$	$R_{sch} - \sigma_c$
Všechny lokality	Exp (0,45)	Moc (0,49)	Moc (0,34)	Moc (0,41)	Moc (0,46)
Granitoidy	-	-	-	-	Exp (0,30) *
Vulkanity	Exp (0,69)	Moc (0,79)	Moc (0,69)	Moc (0,75)	Moc (0,69)
Klastické sedimenty	Exp (0,27)	Log (0,41)	-	Moc (0,27)	-
Karbonátové sedimenty	Exp (0,36)	-	-	-	Moc (0,41)

Pozn.: Exp – exponenciální; Moc – mocinná; Log – logaritmická; * - nerelevantní – viz diskuse k Tab. 5-1.

Tab. 5-4: *Shrnutí nejvýstižnějších typů regresních funkcí $R_{sh} - \sigma_c$ pro danou skupinu hornin. V závorce uvedena hodnota koeficientu determinace R^2 .*

Skupina hornin	Všechny lokality	Vyvěřelé + přeměněné	Usazené
$R_{sh} - \sigma_c$	Moc (0,58)	Log (0,88)	Moc (0,77)

Dále je nutno upozornit, že regresní vztah s relativně vysokým koeficientem determinace R^2 , který je považován za dobře vystihující popisovaná data, produkuje relativně rovnoměrně nadhodnocení i podhodnocení skutečné pevnosti. Z toho vyplývá, že i relativně spolehlivé regrese třeba používat obezřetně, protože pravděpodobnost nadhodnocení i podhodnocení pevnosti je relativně vyrovnaná. Z inženýrského pohledu je ovšem nutno přihlížet na určitou míru bezpečnosti. Pak se zdá, že za jistých okolností může být bezpečnější používat vztahy, které pevnost podhodnocují. To ale není exaktní přístup. Zlepšením v této oblasti by mohlo být zpracování pravděpodobnosti výskytu odhadnuté hodnoty pevnosti.

Jak se ukázalo z korelační a regresní analýzy, odhad hledaného parametru horniny regresními funkcemi není podle studovaných dat vhodné aplikovat obecně na větší množství lokalit. Příčinou může být citlivost výsledků zkoušek na detaily provádění testů diskutované v kap. 5.1, které se běžně nesledují, a proto je nedokážeme v další analýze zohlednit. Může se jednat například o aktuální míru vlhkosti vzorku a citlivost horniny na obsah vody, nebo vliv struktury horniny na odrazovou tvrdost a tak dále. Uplatnění regresních vztahů lze dále hledat v lokálnějším měřítku, kde se můžeme lépe soustředit na specifika studované horniny a nalézt korelace s vyšší mírou významnosti. Zde je prostor pro využití indexových zkoušek k identifikaci změny vlastností hornin, které jsou dále kvantifikovány podrobnějším laboratorním testováním.

6. Závěr

Dizertační práce sestává ze dvou stěžejních částí: laboratorní zkoušky a korelační analýza. První část se věnuje měření vlastností hornin významných z pohledu geotechniky. Druhá část se pak zabývá prací s výsledky laboratorních zkoušek, a to posouzením vzájemných korelací mezi vybranými vlastnostmi hornin a jejich regresní analýzou.

V souvislosti s dovybavením Ústavu geotechniky FAST VUT v letech 2014 až 2016 bylo rozšířeno i zařízení pro testování hornin. Právě zkoušky hornin totiž nebyly v předešlých letech na ústavu příliš frekventovány. Jedním z cílů dizertace proto bylo osvojení si postupů laboratorního testování v mechanice hornin. Jednalo se o poměrně náročný a rozsáhlý úkol, neboť s testováním souvisela i příprava horninových vzorků (vyžadující speciální techniky pro jádrové vrtání, řezání a broušení), která se předtím na Ústavu geotechniky nerealizovala a autor práce ji musel zavést a prakticky zvládnout. Dále bylo nutno naučit se ovládat nové laboratorní zařízení a fyzicky provést testy. V neposlední řadě šlo o zpracování naměřených dat a vyhodnocování zkoušek. Pro zvládnutí zmíněných úkolů autor provedl literární rešerši a navštívil několik zavedených laboratoří mechaniky hornin, a to i v zahraničí.

První část práce, která se soustředila na zprovoznění laboratorních zkoušek hornin a získání přehledu o teoretických a praktických souvislostech provádění testů, byla časově náročnější oproti původnímu předpokladu. Autor tak nezískal vhodný a dostatečně rozsáhlý soubor vlastních dat pro druhou část práce. Pro korelační a regresní analýzu proto byla převážně využita externí databáze.

Korelační a regresní analýza měla za cíl posoudit možnost využití jednoduchých, především indexových zkoušek, k odhadu pevnostních parametrů hornin. V rámci geotechnického průzkumu by tak bylo možné efektivněji plánovat náročnější a dražší zkoušky hornin. Výsledky zde provedené analýzy ovšem nepotvrdily tento předpoklad v obecné rovině. Dosažená míra korelace není dostatečná pro zevšeobecnění testovaných regresí. Není to ale důvod k úplnému zavržení indexových zkoušek. Naopak, jejich potenciál lze dále hledat v kalibraci vztahů na místní poměry určité menší oblasti, resp. v rámci zkoumaného staveniště.

Dizertační práce v průběhu svého řešení poskytla komplexní základ pro další testování hornin na Ústavu geotechniky FAST VUT a rozvoj mechaniky hornin v rámci ústavu. Vytváří se tak potenciál pro další růst pracoviště. Přínosem je zavedení postupů pro stanovení přetvárných charakteristik hornin, které se na ústavu geotechniky doposud neprováděly. Dále jde

o zavedení triaxiálních zkoušek hornin (realizovaných také na stříkaném betonu z tunelových ostění), které předtím v rámci VUT neprobíhaly. Provedena byla také pilotní studie přímého stanovení tahové pevnosti pomocí MTT. Tato zkouška byla podle autorovi dostupných informací provedena poprvé v rámci celé ČR.

Použitá literatura

- Altindag, R., 2002. Effects of Specimen Volume and Temperature on Measurements of Shore Hardness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 35(2), pp.109-113. DOI:10.1007/s006030200014
- Altindag, R. & Güney, A., 2006. ISRM Suggested Method for determining the Shore Hardness value for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(1), pp.19-22. DOI:10.1016/j.ijrmms.2005.04.004
- Altindag, R. & Güney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*, 5(16), pp.2107-2118.
- Aydin, A., 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), pp.627-634. DOI:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020
- Barton, N., et al., 1978. ISRM Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), pp.319-368.
- Bieniawski, Z.T. & Hawkes, I., 1978. ISRM Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(3), pp.99-103.
- Bieniawski, Z.T. et al., 1979. ISRM Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), pp.135-140.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley. 272 p. ISBN: 978-0-471-60172-2
- Blümel, M., 2000. Improved Procedures for Laboratory Rock Testing. In: *Proceedings ISRM Symposium EUROCK 2000 - Aachen*; pp.573-578. ISBN: 3-7739-1246-3.
- Briševac, Z. et al., 2017. Estimate of Uniaxial Compressive Strength and Young's Modulus of the Elasticity of Natural Stone Giallo d'Istria. *Procedia Engineering*, 191, pp.434-44. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.201
- Broch, E. & Franklin, J.A., 1972. The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(6), pp.669-676.
- Brosch, F.J. et al., 2000. Preliminary investigation results on fabrics and related physical properties of an anisotropic gneiss. *Journal of Structural Geology*, 22(11-12), pp.1773-1787. DOI:10.1016/S0191-8141(00)00106-1
- Cai, M., 2010. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter m_i of Brittle Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(2), pp.167-184. DOI:10.1007/s00603-009-0053-1

- Cieslik J., 2013. Plasticity and damage of selected rocks in uniaxial and triaxial compression tests. Krakow: Wydawnictwa AGH. 149 p. ISBN: 978-83-7464-619-2
- Costin, L.S., 1987. Time-dependent deformation and failure. In: Atkinson, B.K. ed. *Fracture Mechanics of Rock*. London: Academic press, pp.167-215. ISBN 0-12-066265-5
- CONTROLS, 2018. Hoek cell for triaxial test. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <http://www.controls-group.com/eng/rock-mechanics-testing-equipment/hoek-cells-and-sample-extruder.php>
- Deere, D.U. & Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Urbana: University of Illinois. 324 p. AFWL-TR-65-116
- Demirdag, S. et al., 2009. The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), pp.725-730. DOI:10.1016/j.ijrmms.2008.09.004
- Du, K. et al., 2019. Specimen shape and cross-section effects on the mechanical properties of rocks under uniaxial compressive stress. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), pp.6061-6074. DOI:10.1007/s10064-019-01518-x
- Durmeková, T. & Ondrášik, R., 2012. Nerovnorodosť a rozmerový efekt pri stanovovaní pevnostno-deformačných vlastností hornín. *Mineralia Slovaca*, 42(2), pp.149-156.
- Durmeková, T. et al., 2013. Vlastnosti hornín a ich stanovenie v laboratóriu - I. Skalné horniny. Bratislava: Univerzita Komenského. 173 p. ISBN: 978-80-223-3330-6
- Eberhardt, E. et al., 1998. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), pp.222-233. DOI:10.1139/t97-091
- Erarslan, N. et al., 2012. Experimental and Numerical Studies on Determination of Indirect Tensile Strength of Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), pp.739-751. DOI:10.1007/s00603-011-0205-y
- Fairhurst, C.E. & Hudson, J.A., 1999. Discussion: Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), pp.279-289. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00006-6
- Franklin, J.A. et al., 1985. ISRM Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(2), pp.51-60.
- Goodman, R. E., 1989. Introduction to Rock Mechanics, 2nd Edition. New York: Wiley. 576 p. ISBN 978-0-471-81200-5.
- Havlíčková, D. et al., 2019. Mechanical properties of granulite from Horní Bory in Bohemian Massif. *Geoscience Engineering*, 65(4), pp.38-53. DOI: 10.35180/gse-2019-0022
- Hawkes, I. & Mellor, M., 1970. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. *Engineering Geology*, 4(3), pp.179-285. DOI:10.1016/0013-7952(70)90034-7
- Hoek, E. & Franklin, J.A. 1968. A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock. *Trans. Instn Min. Metall.*, 77, A22- 26.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106(GT9), pp.1013-1035.
- Hoek, E. et al., 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. In: *NARMS-TAC Conference*. Toronto, pp.267-273.

- Hoek, E. & Brown, E.T., 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), pp.445-463. DOI:10.1016/j.jrmge.2018.08.001
- Hólmgeirsdóttir, T. & Thomas, P.R., 1998. Use of the D-762 shore hardness scleroscope for testing small rock volumes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(1), pp.85-92. DOI:10.1016/S0148-9062(97)00317-3
- Holzer, R. et al., 2009. Inžinierskogeologický atlas hornín Slovenska. Bratislava: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra. 532 p. ISBN: 978-80-89343-29-4
- Horák, V., 1992. Prognóza mechanického chování hornin a její využití v geomechanice - Kandidátská disertační práce. Brno: Fakulta stavební – Vysoké učení technické v Brně.
- Horák, V., 2006. Mechanika hornin: Modul BF05-M01 Laboratoř mechaniky hornin. Brno: Fakulta stavební – Vysoké učení technické v Brně. 46 p.
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), pp.981-994. DOI:10.1016/S1365-1609(01)00039-9
- Katz, O. et al., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), pp.723-728. DOI:10.1016/S1365-1609(00)00004-6
- Kim, M.K. & Lade, P.V., 1984. Modelling rock strength in three dimensions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 21(1), pp.21-33. DOI:10.1016/0148-9062(84)90006-8
- Kovári, K. et al., 1983. ISRM Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6), pp.285-290.
- Kwasniewski, M., 2007. Mechanical behaviour of rocks under true triaxial compression conditions – volumetric strain and dilatancy. *Archives of Mining Sciences*, 52(3), pp. 409–435.
- Li, D. & Wong, L.N.Y., 2013. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(2), pp.269-287. DOI:10.1007/s00603-012-0257-7
- Li, M. et al., 2016. A Novel True Triaxial Apparatus to Study the Geomechanical and Fluid Flow Aspects of Energy Exploitations in Geological Formations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(12), pp.4647-4659. DOI:10.1007/s00603-016-1060-7
- Luong, M.P., 1986. A new test for tensile strength measurements. *Revue Francaise de Géotechnique*, 34(1), pp.69–74.
- Małkowski, P. & Ostrowski, Ł., 2017. The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value. *Procedia Engineering*, 191, pp.134-141. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.164
- Martin, C.D. & Chandler, N.A., 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31(6), pp.643-659. DOI:10.1016/0148-9062(94)90005-1

- Meghanathan, N., 2016. Assortativity Analysis of Real-World Network Graphs based on Centrality Metrics. *Computer and Information Science*, 9(3), pp.7-25.
DOI:10.5539/cis.v9n3p7
- Molenda, M. et al., 2013. Comparison of Hydraulic and Conventional Tensile Strength Tests. In: Jeffrey, R., ed. *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. Brisbane: InTech. ISBN: 978-953-51-6341-1. DOI:10.5772/56300
- MTS System Corporation, 2015. Triaxial Accessories for Rock Mechanics Testing. [cit. 27.8.2019]. Dostupné z:
https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2013188.pdf
- Muralha, J. et al., 2013. ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. In: Ulusay, R., ed. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Cham: Springer, pp.131-142. ISBN 978-3-319-07713-0. DOI:10.1007/978-3-319-07713-0_10
- Nagaraj, T.S., 1993. Principles of Testing Soils, Rocks and Concrete. Amsterdam: Elsevier. 708 p. ISBN: 0444889116
- Novovičová, J., 2006. Pravděpodobnost a matematická statistika. Praha: Vydavatelství ČVUT. 154 p.
- Plinninger, R.J. et al., 2004. The Modified Tension Test (MTT) – Evaluation and Testing Experiences with a New and Simple Direct Tension Test. In: *Proceedings EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium*. Salzburg, pp.545-548.
- Sari, M., 2018. Investigating Relationships between Engineering Properties of Various Rock Types. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 5(1), pp.1-25.
DOI:10.15377/2409-5710.2018.05.1
- Smith, H.J., 1997. The point load test for weak rock in dredging applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), pp.295.e1-295.e13.
DOI:10.1016/S1365-1609(97)00063-4
- Šujanská, D. & Závacký, M., 2018. Vliv vody na pevnost skalních hornin. In: *Sborník příspěvků 46. konference Zakládání staveb*. Brno: Česká geotechnická společnost ČSSI, pp.7-12. ISBN: 978-80-87920-06-0
- Tang, Ch. & Hudson, J.A., 2010. Rock Failure Mechanisms: Explained and Illustrated. Leiden: CRC Press. 364 p. ISBN: 978-0415498517
- Thuro, K. et al., 2001. Scale effects in rock strength properties - Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. In: *Rock Mechanics – a Challenge for Society EUROCK 2001*. Espoo, pp.169-174.
- Thuro, K., 2010. Empfehlung Nr. 5 “Punktlastversuche an Gesteinsproben“ des Arbeitskreises 3.3 “Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. *Bautechnik*, 87(6), pp.322-330. DOI:10.1002/bate.201010025
- Tumac, D. et al., 2007. Estimation of Rock Cuttability from Shore Hardness and Compressive Strength Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(5), pp.477-490.
DOI:10.1007/s00603-006-0108-5
- Tuncay, E. et al., 2019. An approach to predict the length-to-diameter ratio of a rock core specimen for uniaxial compression tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(7), pp.5467-5482. DOI:10.1007/s10064-019-01482-6

- Ulusay, R. & Hudson, J.A., 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Ankara: ISRM Turkish National Group. 628 p. ISBN: 978-975-93675-4-1
- Yagiz, S., 2009. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(1), pp.55-63. DOI:10.1007/s10064-008-0172-z
- Yaşar, E. & Erdoğan, Y., 2004. Estimation of rock physicommechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71(3-4), pp.281-288. DOI:10.1016/S0013-7952(03)00141-8
- Yoshinaka, R. et al., 2008. Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect. *Engineering Geology*, 96(3-4), pp.173-186. DOI:10.1016/j.enggeo.2007.10.008
- Wang, H. et al., 2017. Correlation of UCS Rating with Schmidt Hammer Surface Hardness for Rock Mass Classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1), pp.195-203. DOI:10.1007/s00603-016-1044-7
- Wawersik, W.R. & Fairhurst, C., 1970. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 7(5), pp.561-575. DOI:10.1016/0148-9062(70)90007-0
- Wikipedia, 2019. Linear variable differential transformer. [cit. 27.8.2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer
- Wikipedia, 2020. Pearson correlation coefficient. [cit. 9.5.2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient
- Wong, L.N.Y. et al., 2016. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*, 11(4), pp.713-737. DOI:10.1007/s11440-015-0407-7
- Závacký, M., 2019. A comparison of testing methods for determination of sprayed concrete tensile strength. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 23, pp.54-57. DOI:10.14311/APP.2019.23.0054
- Závacký, M. & Horák, V., 2019. Srovnání metodik pro stanovení přetvárnosti skalních hornin. In: *Sborník příspěvků 47. konference Zakládání staveb*. Brno: Česká geotechnická společnost ČSSI, pp.7-12. ISBN: 978-80-87920-07-7
- Závacký, M. & Štefaňák, J., 2019. Strains of rock during uniaxial compression test. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 28(3), pp.398-403. DOI:10.14311/CEJ.2019.03.0032
- Závacký, M. & Závacký, J., 2019. Aspekty vyhodnotenia merania tvrdosti hornín Schmidtovým kladivom. In: *Zakladanie stavieb 2019 – Zborník príspevkov z 21. konferencie*. Stará Lesná: Spolok Statikov Slovenska, pp.118-125. ISBN: 978-80-89842-04-9
- Závacký, M., 2020. Vplyv štihlости horninových skúšobných telies na pevnosť v jednoosom tlaku. In: *Sborník příspěvků 22. odborné konference doktorského studia JUNIORSTAV 2020*. Brno: Fakulta stavební – Vysoké učení technické v Brně, pp.371-375. ISBN: 978-80-86433-73-8
- Zavoral, J. et al., 1987. Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin: III - Mechanika hornin. Praha: Český geologický úřad. 91 p.

Zhao, X.G. & Cai, M., 2010. A mobilized dilation angle model for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), pp.368-384.
DOI:10.1016/j.ijrmms.2009.12.007

Normy:

ASTM D3967-95a: *Standard Test Methods for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. West Conshohocken: ASTM International, 1996.

ASTM D7012-13: *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

ČSN EN 14580: *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení statického modulu pružnosti*. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2005.

ČSN EN 1926: *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku*. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2007.

ČSN EN 1997-2 „Eurokód 7“: *Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut ČNI, 2008.

Curriculum vitae

Ing. Martin Závacký (narozen 1990, Slovenské národnosti)

Vzdělání

- od 2016 Doktorský studijní program v oboru Konstrukce a dopravní stavby, Ústav geotechniky Fakulty stavební VUT v Brně
- 2013–2016 Magisterský studijní program v oboru Konstrukce a dopravní stavby se zaměřením Geotechnika; diplomová práce: „*Tunel na trase rychlé železnice*“
- 2014 Magisterský studijní program v oboru Geotechnical Engineering; NTNU Trondheim, Norsko (Erasmus exchange)
- 2009–2013 Bakalářský studijní program v oboru Konstrukce a dopravní stavby se zaměřením Geotechnika; bakalářská práce: „*Trvalé zabezpečenie zárezu svahu*“
- 2005–2009 Stredná priemyselná škola stavebná E. Belluša v Trenčíne

Pedagogická činnost

Vedení a asistence při výuce cvičení předmětů BF002 – Mechanika zemin a BF004 – Zakládání staveb. Zpracovávání oponentních posudků bakalářských prací.

Účast ve výzkumných projektech

- 2019 Lomově-mechanické vlastnosti droby v kontextu dalších vlastností horniny - FAST-S-19-6031
- 2018 Stanovení vstupních parametrů materiálových modelů pro potřeby podzemního stavitelství s možností využití optimalizačních metod - FAST-S-18-5356
- 2017-2018 Vytvoření partnerské kooperace mezi firmou GEOtest a regionálním výzkumným centrem AdMaS - CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_013/0004874
- 2017 Chování vícesložkových geomateriálů při testech trojosé tlakové pevnosti: pilotní experimentální studie v mechanice hornin - FAST-S-17-4624

Ocenění

- 2020 Ocenění za příspěvek na konferenci Juniorstav 2020 v sekci Geotechnika
- 2019 Ocenění za příspěvek na konferenci Juniorstav 2019 v sekci Geotechnika

Kurzy

- 06/2019 Členění nejistotám při přípravě a realizaci tunelových staveb (CzTA ITA-AITES)
- 02/2019 Kurz základů vědecké práce (AV ČR)

Zahraniční pobyty

- 1.7. – 31.12. 2018 Graz, Rakousko. Realizace pokročilých laboratorních zkoušek v mechanice hornin a vyhodnocování výsledků zkoušek. Rešerše informací pro triaxiální testování poloskalních hornin. Garant: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Blümel;
- 24.-29. 7. 2017 Krakow, Polsko. Návštěva Katedry Geomechaniky, Stavitelství a Geotechniky, AGH Kraków - seznámení s pracovištěm a provádění laboratorních zkoušek a geomonitoringu. Garant: Dr hab. inż. Piotr Małkowski, prof. AGH;
- 20.-22. 6. 2016 Graz, Rakousko. Návštěva Ústavu mechaniky hornin a podzemních staveb a Ústavu mechaniky zemin a zakládání staveb; TU Graz. Garant: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Blümel.

Přehled publikovaných prací

- [1] ZÁVACKÝ, M., 2020. Vplyv štíhlosti horninových skúšobných telies na pevnosť v jednoosom tlaku. In: *Juniorstav 2020 – sborník příspěvků* [CD]. Brno: Fakulta stavební – Vysoké učení technické v Brně, s. 370-374. ISBN: 978-80-86433-73-8.
- [2] HAVLÍČKOVÁ, D., ZÁVACKÝ, M., KRMÍČEK, L., BLÜMEL, M., ROZSYPALOVÁ, I., 2019. Mechanical properties of granulite from horní bory in bohemian massif. *Geoscience Engineering*, 65(4), s. 38-53. ISSN: 1802-5420. DOI: 10.35180/gse-2019-0022
- [3] ZÁVACKÝ, M., MAJDA, T., ROZSYPALOVÁ, I., ŠTEFAŇÁK, J., 2019. Moravian greywacke – evaluation of fracture, strength and deformability properties. *E3S Web Conferences: AG 2019 – 5th International Conference on Applied Geophysics*, 133(2019), 02003. ISSN: 2267-1242. DOI: 10.1051/e3sconf/201913302003
- [4] ZÁVACKÝ, M., HORÁK, V., 2019. Srovnání metodik pro stanovení přetvárnosti skalních hornin. In: *Sborník příspěvků 47. konference Zakládání staveb*. Brno: Česká geotechnická společnost ČSSI, s. 7-12. ISBN: 978-80-87920-07-7.
- [5] ZÁVACKÝ, M., ZÁVACKÝ, J., 2019. Aspekty vyhodnotenia merania tvrdosti hornín Schmidovým kladivom. In: *Zakladanie stavieb 2019 – Zbornik príspevkov z 21. konferencie*. Stará Lesná: Spolok Statikov Slovenska, s.118-125. ISBN: 978-80-89842-04-9.
- [6] ZÁVACKÝ, M., ŠTEFAŇÁK, J., 2019. Strains of rock during uniaxial compression test. *Civil Engineering Journal*, 2019(3), s. 398-403. ISSN: 1805-2576. DOI: 10.14311/CEJ.2019.03.0032
- [7] ZÁVACKÝ, M., 2019. A comparison of testing methods for determination of sprayed concrete tensile strength. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 23(2019), s. 54-57. ISSN: 2336-5382. DOI: 10.14311/APP.2019.23.0054
- [8] ZÁVACKÝ, M., BLÜMEL, M., HORÁK, V., 2019. Laboratory determination of shear strength of rock. In: *Sborník příspěvků 14. mezinárodní konference Podzemní stavby Praha 2019* [CD]. Praha: Česká tunelářská asociace ITA-AITES, s. 1-5. ISBN: 978-80-906452-3-3.
- [9] HAVLÍČKOVÁ, D., ZÁVACKÝ, M., KRMÍČEK, L., 2019. Anisotropy of mechanical properties of greywacke. *Geoscience Engineering*, 65(1), s. 46-52. ISSN: 1802-5420. DOI: 10.35180/gse-2019-0005
- [10] ZÁVACKÝ, M., ŠTEFAŇÁK, J., 2018. Geotechnická laboratoř ve výzkumném centru AdMaS. *TUNEL*, 27(4), s. 23-29. ISSN: 1211-0728.
- [11] ŠUJANSKÁ, D., ZÁVACKÝ, M., 2018. Vliv vody na pevnost skalních hornin. In: *Sborník příspěvků 46. konference Zakládání staveb*. Brno: Česká geotechnická společnost ČSSI, s. 7-12. ISBN: 978-80-87920-06-0.
- [12] ZÁVACKÝ, M., CHALMOVSKÝ, J., MIČA, L., BÍLEK, P., 2018. Calibration of input parameter values for an advanced material model of sprayed concrete. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 16(2018), s. 40-45. ISSN: 2336-5382. DOI: 10.14311/APP.2018.16.0040
- [13] ŠUJANSKÁ, D., ZÁVACKÝ, M., KRMÍČEK, L., 2018. Behaviour of syenite under triaxial load conditions. In: *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. Sofia: STEF92 Technology, s. 137-144. ISBN: 978-619-7408-36-2.

- [14] HORÁK, V., ZÁVACKÝ, M., 2018. Předběžné posouzení interakce základu dálničního mostu na konstrukci stávajícího železničního tunelu. In: *Tunely a podzemné stavby 2018 - zborník príspevkov* [CD]. Žilina: Slovenská tunelárska asociácia, s. 56-56. ISBN: 978-80-973073-9-4.
- [15] ZÁVACKÝ, M., CHALMOVSKÝ, J., ŠTEFAŇÁK, J., MIČA, L., BÍLEK, P., 2018. Modelling of tunnel lining degradation. In: *5th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2018)*. Zagreb: University of Zagreb, s. 1499-1505. ISBN: 978-953-8168-25-3. DOI: 10.5592/CO/CETRA.2018.794
- [16] ZÁVACKÝ, M., 2018. Způsob vyhodnocení triaxiálních zkoušek hornin. In: *Juniorstav 2018 – sborník příspěvků* [CD]. Brno: Fakulta stavební – Vysoké učení technické v Brně, s. 552-557. ISBN: 978-80-86433-69-1.
- [17] KRMÍČEK, L., ZÁVACKÝ, M., 2017. Triaxial compression testing of multicomponent geomaterials from quartz-poor (syenitic) systems. *Geoscience Engineering*, 63(4), s. 1-7. ISSN: 1802-5420.
- [18] CHALMOVSKÝ, J., ZÁVACKÝ, M., MIČA, L., 2017. Calibration of an advanced material model for a shotcrete lining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, 012078. ISSN:1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012078
- [19] ZÁVACKÝ, M., ŠTEFAŇÁK, J., HORÁK, V., MIČA, L., 2017. Statistical estimate of uniaxial compressive strength of rock based on shore hardness. *Procedia Engineering*, 191, s. 248-255. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.178
- [20] ZÁVACKÝ, M., 2016. Modernizace laboratoře mechaniky hornin Ústavu geotechniky VUT v Brně. In: *Workshop doktorandů 2016* [CD]. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, s. 1-4. ISBN: 978-80-86407-61-6.

Abstrakt

Abstrakt:

Disertační práce se zabývá vlastnostmi hornin významných z pohledu navrhování geotechnických konstrukcí, jako jsou pevnostní a přetvárné charakteristiky, nebo podmínky porušení horniny. Tato práce dále podrobněji zkoumá možnost využití korelačních vztahů k odhadu pevnostních charakteristik hornin z indexových zkoušek, což může přinést zefektivnění procesu testování hornin.

První část práce pojednává o vybraných laboratorních zkouškách hornin a identifikuje specifika a omezení těchto testů na základě vlastních praktických zkušeností. V druhé části práce je provedena korelační analýza rozsáhlého souboru dat a odvození regresních vztahů pro vybrané závislosti. Dále je srovnávána kvalita odhadu pevnosti hornin pomocí vlastních a již publikovaných regresních vztahů.

Z analýzy vyplývá, že dosažená míra korelace není dostatečná pro zevšeobecnění testovaných regresí. Významnou příčinou je kombinace variability vlastností hornin se specifiky a omezeními praktického provádění zkoušek. Zpřesnění odhadu vlastností hornin pro spolehlivý geotechnický návrh lze dále hledat v kalibraci vztahů na místní poměry určité menší oblasti.

Abstract:

The dissertation thesis deals with the properties of hard rocks important for designing geotechnical structures, such as strength and deformation characteristics, as well as rock failure criteria. This work examines the possibility of using correlation relations to estimate the strength characteristics of rocks from index tests, which can make the rock testing process more efficient.

The author described selected laboratory tests of rocks and identified several limitations of the tests procedures based on his own practical experience. The correlation analysis of an extensive data set and the derivation of regression relations for selected dependencies were performed. Furthermore, the rock strength estimation quality of the newly derived regressions was compared with the already published regressions.

The analysis shows that the achieved degree of correlation is not sufficient to generalize the examined regressions. A significant reason of the low degree of correlation is the combination of the variability of rock properties and limitations of practical testing procedures. Thus, focus should be paid on calibration of the regression relationships within smaller areas in order to precisely estimate the rock properties as reliable input to the geotechnical design.