

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,  
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

# Faktory ovlivňující výsledky mechanických zkoušek hornin

Bakalářská práce

Martin Čermák



Vedoucí diplomové práce: Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

Praha 2010

## PODĚKOVÁNÍ

V úvodu mé bakalářské práce bych rád poděkoval svému školiteli, panu Doc. Mgr. Richardu Příkrylovi Dr, který mě vedl a byl nápomocen při tvorbě této práce. Děkuji za věcné připomínky, rady a za pomoc s hledáním odborné literatury.

## ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem různých faktorů, jenž mohou ovlivňovat výsledky mechanických zkoušek hornin. Jedná se o rešeršní práci, která čerpá především z odborných článků a konferenčních příspěvků. V úvodu nejprve popisuje zkušební laboratorní metody, kterými jsou horniny zkoušeny a jsou tak získány pevnostní charakteristiky a dále popisuje přetvárné a deformační vlastnosti hornin. V druhé části této práce jsou definovány faktory, které ovlivňují výsledky mechanických zkoušek. Konkrétně se jedná o faktory, které jsou dány vlastním složením a stavbou zkoušené horniny, dále jejími fyzikálními vlastnostmi. Dále jsou to faktory, které lze ovlivnit, jako jsou zkušební podmínky a příprava zkušebních těles. Ke každému vybranému faktoru je popis jak ovlivňuje výsledky mechanických zkoušek různých litologických typů hornin. Z poznatků, které tato práce přináší je zřejmé, že popisované faktory mohou mít velmi výrazný vliv na mechanické vlastnosti a je tedy přínosné tyto faktory při mechanických zkouškách zohledňovat.

## SUMMARY

This submitted bachelor thesis deals with the influence of different factors that may influence the results of mechanical tests of rock. This is a search thesis, which draws primarily from academic articles and conference papers. In the introduction this thesis describes the laboratory testing methods, which we can test a rocks and obtain a strength characteristics and additionally the thesis describes the strain and deformational properties of rocks. In the second part of this thesis there are defined a factors that influence the results of mechanical tests, namely those given by their composition and structure of the tested rocks and on its physical properties. Additionally there are also included factors that can be influenced, such as test conditions and preparation of test specimens. For each selected factor there is a description of how it affects the results of mechanical tests of the different lithological types of rocks. This thesis brings clear knowledge, that the described factors can have strong effects on mechanical properties and is beneficial to these factors account for the mechanical tests.

## OBSAH

Poděkování	i
Abstrakt	ii
Summary	ii
1. Úvod	1
2. Laboratorní zkoušení hornin	2
2.1. Základní pojmy	2
2.2. Typy pevnostních zkoušek	2
2.3. Přetvárné vlastnosti	4
2.4. Deformační chování hornin	5
3. Faktory ovlivňující mechanické vlastnosti hornin	7
3.1. Vymezení faktorů	7
3.2. Složení a stavba hornin	7
3.2.1. Vliv struktury na mechanické vlastnosti hornin	7
3.2.2. Vliv anizotropie na mechanické vlastnosti hornin	7
3.2.3. Vliv nerostného složení hornin na mechanické vlastnosti	9
3.2.4. Vliv zvětrávání na mechanické vlastnosti	10
3.2.5. Vliv velikosti zrn na mechanické vlastnosti hornin	12
3.3. Fyzikální vlastnosti hornin	13
3.3.1. Vliv hustoty na mechanické vlastnosti hornin	13
3.3.2. Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti hornin	14
3.4. Zkušební podmínky	15
3.4.1. Vliv obsahu vody na mechanické vlastnosti	15
3.5. Vliv přípravy zkušebních těles pro laboratorní zkoušky mechanických vlastností	17
3.5.1. Výběr vzorků	17
3.5.2. Doporučený počet vzorků	17
3.5.3. Vliv velikosti a opracování zkušebních těles	18
4. Závěr	19
5. Literatura	20

## 1. ÚVOD

Mechanika hornin je vědecká disciplína, která se zabývá chováním hornin v silovém poli. Pro praktické účely se mechanika hornin zabývá studiem mechanických vlastností hornin, jako jsou pevnostní charakteristiky jednotlivých hornin nebo jejich přetvárné vlastnosti v závislosti na změnách napětí. Tyto mechanické vlastnosti jsou pak závislé na řadě fyzikálních vlastností a petrografických parametrech studovaných hornin (Škopka a kol. 1986). Rozsah působnosti, pro který se provádí výzkum mechanických vlastností, je dán rozsahem hornických prací a inženýrsko-geologickým průzkumem pro povrchové a podzemní stavby. Mechanika hornin je proto úzce spjata především s aplikovanou geologií a inženýrskou geologií.

Vývoj mechaniky hornin probíhal podle Škopka a kol. (1986) ve dvou liniích. První se utvářela ze znalostí mechaniky zemin, které byly s časovým odstupem přibližně 30let aplikovány na horniny a skalní masiv. Vznikla tak mezinárodní organizace pro mechaniku hornin (International Society for Rock Mechanics). Její první kongres věnovaný mechanice skalních hornin se uskutečnil v roce 1966 v Lisabonu (<http://www.isrm.net/gca/index.php?id=231>). Druhá linie vývoje vycházela z potřeb získání kvantitativního ohodnocení skalního prostředí, ve kterém se razila důlní díla.

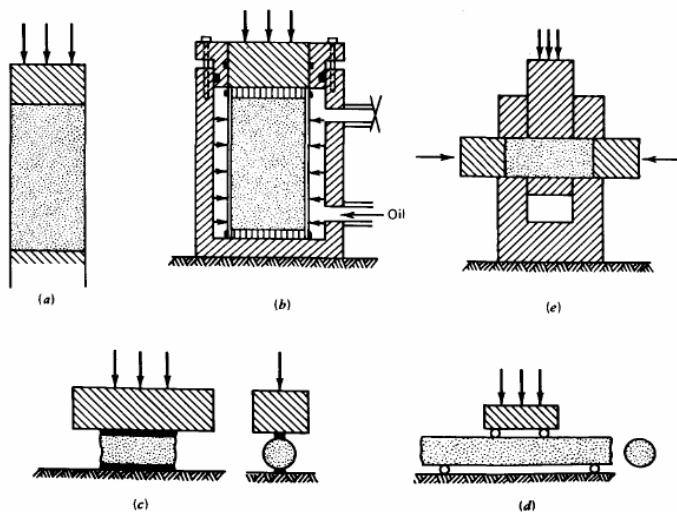
Přesné popsání mechanických vlastností hornin je důležité pro využití zkoušených hornin pro praktické účely. Určení mechanických vlastností hornin dovoluje popsat interakci stavebního díla s horninovým prostředím a dále udává vhodnost pro praktické využití hornin např. jako stavební kámen. Správné určení mechanických vlastností hornin je tedy velmi důležité a proto je nutné znát faktory, které mohou mít na výsledky mechanických zkoušek vliv. Proto tato bakalářská práce má za cíl popsat a zhodnotit vlivy vybraných faktorů na mechanické vlastnosti hornin, zkoušených v laboratorních podmínkách.

## 2. LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ HORNIN

### 2.1. Základní pojmy

Termín zatížení se používá pro označení silového působení z vnějšího prostředí. Pro zkoušení hornin v laboratorních podmínkách je zatížení generováno tlakovými přístroji. Napětí se používá pro označení silového působení uvnitř horninového vzorku (Škopek a kol. 1986). Napětí je vyvoláno zatěžováním a je přímo úměrné síle zatížení a nepřímo úměrné ploše, na kterou zatížení působí. Působí-li zatížení kolmo na uvažovanou plochu, vzniká tak normálové napětí. Pokud zatížení působí na tečnu k uvažované ploše, pak se toto napětí označuje jako smykové. Jelikož má uvažované napětí velikost a směr působení, tak se označuje jako vektory složky (normálové a smykové). Stav napětí na povrchu nekonečně malé krychle uvnitř obecného tělesa lze v pravouhlých souřadnicích  $x, y, z$  popsat 9ti složkami napětí  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ . První tři jsou normálové složky ve směru  $x, y, z$ , dalších šest jsou smykové složky, určené prvním indexem určitou plochou a druhým indexem pro směr příslušné osy (Škopek a kol. 1986).

K určování pevnostních charakteristik hornin se užívá několika typů zkoušek. Většina z nich se provádí v laboratoři. Základní rozdělení mechanických zkoušek je podle směru tlaku, který působí na zkušební těleso. Za základní se tedy považují zkoušky v tlaku, v tahu a ve stříhu (Obr. 1). Dále se rozdělují podle toho, zda je zkušební těleso horniny zpevňováno zpevňovacím tlakem. Mimo tyto hlavní typy mechanických zkoušek existují i další, které se používají pouze pro velmi specifické aplikace. Výsledky mechanických zkoušek charakterizují nejenom maximální pevnost horniny, ale i její deformační chování, pokud je při zatěžování měřeno přetváření. Maximální pevnost horniny se vyjadřuje většinou v MPa nebo v  $\text{N/mm}^2$  (přičemž  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$ ).



Obr. 1. Základní uspořádání při zkoušení mechanických vlastností hornin (Goodman 1986). A = prostý tlak, B = triaxiální zkouška, C = zkouška v nepřímém tahu (brazilská zkouška), D = zkouška pevnosti za ohybu, E = smyková zkouška.

### 2.2. Typy pevnostních zkoušek

Nejrozšířenější zkouškou mechanických vlastností je zkouška v prostém tlaku. Při zkoušení je zkušební těleso horniny namáháno jednoosým tlakem  $\sigma_1$ , který se postupně zvyšuje až do porušení

zkušební tělesa, přičemž druhá dvě hlavní napětí  $\sigma_2=\sigma_3=0$  (Goodman 1989). Výsledná pevnost v tlaku je dána vzorcem:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1),$$

kde  $P$  je maximální dosažená síla při porušení zkušební tělesa (N) a  $A$  je jeho počáteční průřezová plocha ( $\text{mm}^2$ ). Zkušební tělesa by měla být válcového či hranolového tvaru se štíhlostním poměrem mezi 2-3.

Pevnost v přímém tahu znamená namáhání zkušební tělesa jednoosým tahem  $\sigma_1$  až do porušení zkušební tělesa, přičemž druhá dvě hlavní napětí  $\sigma_2=\sigma_3=0$ . Výsledná pevnost v přímém tahu se vypočte podle vzorce:

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (2),$$

kde  $P$  je maximální dosažená síla při porušení zkušební tělesa (N) a  $A$  je jeho počáteční průřezová plocha ( $\text{mm}^2$ ). Zkušební tělesa by měla být válcového či hranolového tvaru, ale s výrazně převažující délkou, která by měla být minimálně 3 násobně větší než průřezový profil. Tento postup je až na změnu směru tlaku velmi podobný tlakové zkoušce. Ale přímá tahová zkouška nedosahuje takového významu, protože pro její správné provedení je zapotřebí vyřešit několik problémů. Prvním problémem je přenos tahové síly ze zkušební lisu na zkušební těleso. Musí být použito velmi pevné uchycení, které je prováděno lepením pomocí pryskyřice do speciálních čelistí. Přesnost výsledků dále ovlivní jakákoliv odchylka podélné osy zkušební tělesa od směru působící síly. Proto se pro určení pevnosti v tahu více používá tzv. „brazilská zkouška“ v příčném tahu.

Při zkoušce v příčném tahu je zkušební těleso horniny namáháno mezi dvěma ocelovými čelistmi. Zkušební těleso je sice stlačováno tlakem, ale uvnitř tělesa dochází k vektorovému rozkladu tlakové síly na tahovou sílu. Porušení zkušební tělesa tak nastane při překročení pevnosti v tahu a to v předem dané rovině, která je spojnicí protilehlých zatěžujících desek. Tato zkouška má tři modifikace podle tvaru zkušebních těles. Jedná se o diskové, hranolové nebo deskové tvary zkušebních těles. Podle jejich tvaru jsou i rozdílné vzorce pro výpočet. Vzorec pro výpočet pevnosti v příčném tahu diskového zkušební tělesa je:

$$\sigma_{tb} = \frac{2P}{\pi dt} \quad (3),$$

kde  $P$  je maximální dosažená síla při porušení příčným tahem,  $d$  je průměr válcového zkušební tělesa a  $t$  je tloušťka zkušební tělesa. Takto zjištěná pevnost je trochu vyšší, než pevnost zjištěna přímou tahovou zkouškou. Zkouška pevnosti v příčném tahu je nejrozšířenější tahovou zkouškou.

V mechanice hornin jsou velmi rozšířené také zkoušky v podmínkách trojosé napjatosti. Při nich je zkušební těleso horniny umístěno uvnitř triaxiálního přístroje. Ve svislém směru na něj působí vzrůstající tlak  $\sigma_1$ , jenž je vyjádřen jako v tlakové zkoušce:  $\sigma_1 = P/A$ . Na těleso však zároveň působí konstantní plášťové tlaky  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  (přitom platí  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ), vyvolané zvýšením tlaku zpevňovacího média (hydrostatický olej). Při této zkoušce se používají zkušební tělesa válcovitěho tvaru, která musí být ošetřena proti vniknutí zpevňujícího média. Výhoda této zkoušky je v tom, že vyvolané napětí horniny by se mělo přibližovat původnímu přírodnímu stavu. K porušení nedochází v předem určeném bodě, ale tam, kde vnitřní struktura vykazuje nejmenší pevnost. Výsledek triaxiální zkoušky se vynáší graficky pomocí obálky pevnosti.

Při zkoušce pevnosti za ohybu je zkušební těleso horniny zatěžováno zároveň tahem i tlakem. Podle způsobu zatížení může mít tato zkouška dvě modifikace: 3-bodovou nebo 4-bodovou. Spodní části kvádrového zkušebního tělesa jsou na jejich konci podporovány dvěma body. Z horní strany je zkušební těleso zatěžováno vzrůstajícím tlakem. A to buďto jedním bodem umístěným v prostřed tělesa (3-bodový ohybový test), nebo 2 body, které jsou umístěny ve třetinách od konce tělesa (4-bodový ohybový test). Pro 4-bodovou ohybovou zkoušku, kdy dochází k porušení tělesa ve střední třetině jeho rozpětí, se pevnost vypočte ze vzorce:

$$R_{pt} = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^3} \quad (4),$$

kde  $F$  je maximální zatížení (MN),  $L$  je osová vzdálenost podpěr (m),  $b$  šířka příčného průřezu tělesa (m) a  $h$  je výška příčného průřezu tělesa (m). Velikost ohybového testu je 2-3× větší než pevnost horniny v přímém tahu (Goodman 1989). Při zkoušení hornin pro účely stavebního kamene je tato zkouška 2. nejpoužívanější (Přikryl 2010 ústní sdělení).

Dále se horniny mohou zkoušet pomocí bodového zatížení. V této zkoušce je hornina zatěžována mezi dvěma koaxiálními ocelovými kužely až do porušení. Standardně se tato zkouška používá pro válcovitá zkušební tělesa z vrtného jádra, ale může se použít i pro tělesa s nepravidelným tvarem. Většinou se zkouší válcovité těleso kolmo k ose jádra. Index pevnosti v bodovém zatížení se stanoví ze vzorce podle Brocha a Franklina (Goodman 1989):

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (5),$$

kde  $P$  je maximální dosažená síla při poruše vzorku a  $D$  je počáteční vzdálenost mezi hroty.

Štíhlostní poměr zkušebního tělesa by měl být nejméně 2,5 (poměr výšky a průměru). Průměr válcových zkušebních těles zkoušené horniny je zpravidla mezi 10 mm až 70 mm. Proto se smluvně výsledek standardizuje na 50 mm. Jestliže je jiná počáteční vzdálenost dvou hrotů než 50 mm, tak se musí pomocí grafu výsledek upravit právě na tuto počáteční vzdálenost. Tímto vznikne hodnota  $I_{s(50)}$ . Podle této hodnoty pak převedeme hodnotu indexu pevnosti v bodovém zatížení na hodnotu pevnosti v tlaku podle vzorce (Goodman 1989):

$$q_u = 24 \cdot I_{s(50)} \quad (6),$$

kde  $q_u$  je hodnota pevnosti nezpevněného zkušebního tělesa v tlaku a  $I_{s(50)}$  je hodnota pevnosti v bodovém zatížení upravený pro průměr 50mm. Tento test je vhodný pro svoji nenáročnost, rychlost a možnosti použití v terénu.

### 2.3. Přetvárné vlastnosti

Přetvárné vlastnosti hornin charakterizují vztah mezi zatížením horniny a její deformací. Obvyklým způsobem pro charakterizaci procesu je měření podélných a příčných deformací v závislosti na působícím tlaku. Lineární závislost mezi napětím a přetvořením u hornin je vyjádřena pomocí Hookova zákona:

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (7),$$

kde  $\sigma$  je napětí,  $\varepsilon$  je přetvoření a  $E$  je modul pružnosti (Youngův modul). Tento zákon platí pro elastický materiál.

Z výsledků měření deformací lze vypočítat několik modulů, které popisují přetvárné a deformační vlastnosti. Modul pružnosti  $E$ , který vychází z Hookova zákona, platí pro elastické homogenní a



izotropní prostředí. Modul pružnosti (Youngův modul) je potom vyjádřen poměrem mezi přírůstkem tlakového napětí a odpovídajícím přírůstkem relativního přetvoření v elastické části zatěžující větve přetvárného diagramu. Modul přetvárnosti  $E_{def}$  je definován proto, že horniny nejsou obecně elastické, ale projevují se v nich ve větší či menší míře i plastické vlastnosti a nespĺňují tedy předpoklady Hookova zákona. Modul přetvárnosti  $E_{def}$  je vyjádřen poměrem mezi rozdílem tlakového napětí a odpovídajícím rozdílem přetvoření v přímkové části odlehčující větve přetvárného diagramu.

Tyto moduly závisí na vlastnostech zkoušeného materiálu a ne na jeho rozměru. Mohou však být ovlivněny teplotou. Další moduly, popisující deformačním chování hornin, jsou například modul pružnosti ve smyku  $G$  a modul objemové stlačitelnosti  $K$  (Škopek a kol. 1986). Všechny moduly mají rozměr svého napětí, tedy MPa, popřípadě GPa.

Deformace se normalizuje původním rozměrem proto, aby bylo možné porovnávat různě velká zkušební tělesa hornin. Je to tedy podíl změny jejich velikosti vůči původnímu rozměru ve sledovaném směru podle vzorce  $\epsilon = \Delta l / l$  a jedná se o bezrozměrnou jednotku. Takto normalizovaná deformace se označuje jako přetvoření. Podle povahy studovaného materiálu se rozeznává přetvoření pružné, plastické či celkové a podle směru pak osově (ve směru zatížení) a příčné (kolmé na směr zatížení). Přetváření je snímáno různými způsoby, například pomocí změny elektrického odporu v nalepených drátkových tensometrech nebo pomocí indukčních snímačů (Přikryl 2010 ústní sdělení). Naměřená přetvoření se vynášejí pomocí přetvárných křivek, které charakterizují závislost přetvoření vůči zatížení  $\sigma_1$ . Tvar křivky přetvoření udává, zda je hornina elastická, křehká či plastická.

Vztah mezi příčnou a podélnou deformací je dán Poissonovým číslem  $\nu$ , které udává poměr mezi příčným přetvořením horninového tělíska při tlakové zkoušce (deformace kolmo k zatížení) a podélným přetvořením (deformace ve směru zatížení).

## 2.4. Deformační chování hornin

Při studiu deformačního chování hornin se rozeznávají následující fáze deformace (elastická, plastická a porušení). Vzhledem k heterogennímu složení hornin dochází ve studovaných horninových materiálech velmi často k jejich kombinaci. Pro horniny je typické elasticko-plastické chování. Mimo vlastností samotného studovaného materiálu jsou tato deformační chování závislá na tlaku, teplotě a času.

Elastická deformace: Deformace je vratná. To znamená, že po odstranění působící síly se těleso vrátí do původního stavu. Platí zde Hookův zákon. Rozsah elastické deformace je však omezený. V ideálním případě při stálém zvyšování tlaku končí elastická deformace křehkým porušením vzorku. V některých materiálech a především v horninách přechází elastická deformace do plastické po překročení určitého napětí, jenž se označuje jako mez úměrnosti (Škopek a kol. 1986).

Plastická deformace: Deformace je nevratná. Tvar tělesa má sice tendenci po ukončení působení síly se vrátit do svého původního tvaru, ale původního tvaru již nedosáhne.

Porušení: Ve studovaném materiálu se objeví makroskopické praskliny a je nenávratně porušen. Podle typu porušení se studovaný materiál rozděluje ještě na dva typy (křehké a plastické porušení).

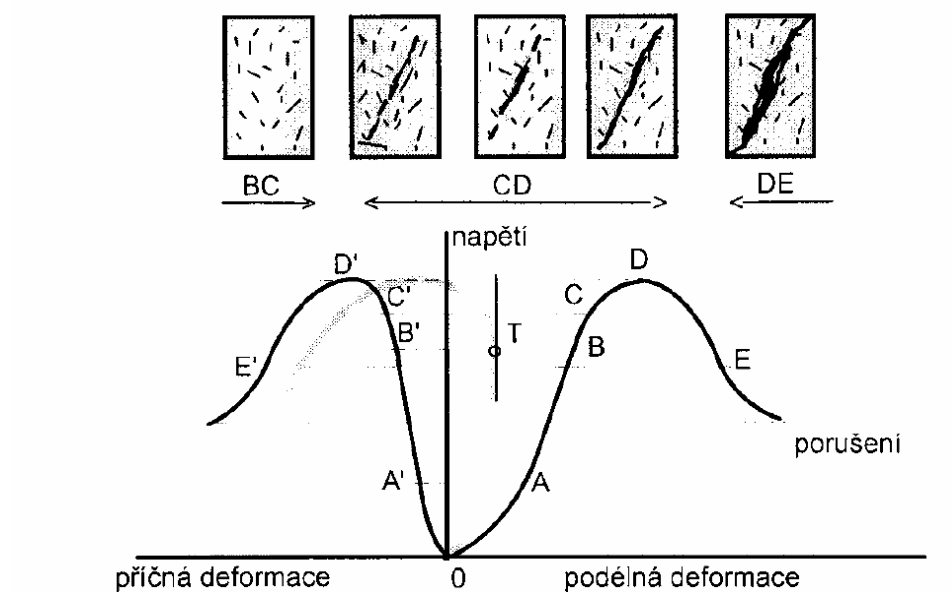
Křehký materiál: Při zatěžování převažuje elastické chování a před porušením se malý úsek chová plasticky a po porušení je doprovázeno strmým poklesem odlehčující větve křivky přetvoření. Typické pro křehké porušení je odtržení či prasknutí materiálu.

Plastický materiál: Při zatěžování převažuje plastické chování a po dosažení maximální pevnosti následuje mírný pokles křivky přetvoření.

Pro popis deformačního chování hornin tlaku je nutné rozdělit působící tlak na dvě části: litostatický tlak, který působí na zkušební těleso horniny ze všech směrů stejnou silou a deviatorický tlak, kde převažuje jedna směrová komponenta tlaku. Teoreticky je to tlak, který působí na horninu po odečtení litostatického tlaku. Při působení deviatorického tlaku dochází k porušení hornin, kdežto litostatický tlak většinou nezpůsobuje porušení horninového tělesa.

Deformační chování horniny při zatěžování se nechá rozdělit do několika fází (Goodman 1989). Při počátečním působení deviatorického tlaku dochází ve zkušební tělese horniny k uzavírání pórů a mikrotrhlin. Toto neelastické chování se projeví v křivce přetvoření jako konkávní křivka (Obr. 2). Při dalším postupném zvyšování tlaku dochází k lineárnímu vztahu mezi vzrůstajícím napětím a přetvořením podle Hookova zákona. Poté začínají vznikat uvnitř vzorku mikrotrhliny. Tyto novotvořené mikrotrhliny začínají vznikat na místech původních mikrotrhlin a rozšiřují se paralelně ve směru působícího tlaku. Dále je růst mikrotrhlin stabilní a s každým přírůstkem napětí se trhliny prodlužují až do konečné délky a tahovou silou se rozšiřují. Po dosažení konečné délky se vnitřní mikrotrhliny začnou šířit k okraji zkušebního tělesa a postupně se propojují, až vznikne na povrchu okem viditelná prasklina. V tomto bodě dosáhla hornina svoji maximální pevnosti.

Další informace o deformaci hornin poskytuje měření akustických impulsů. Při vzniku mikrotrhlin se vytváří akustické vlny, které je možno zaznamenat a zpětně tak určit místo, četnost, velikost a čas vytvoření mikrotrhlin. Tímto procesem lze pomocí dvou nezávislých měření (deformace a akustické emise) kontrolovat a zpřesňovat průběh přetváření a porušování studovaného horninového vzorku Konečný (1998).



Obr. 2. Schématické znázornění průběhu procesu přetváření při vzrůstajícím zatížení (Konečný 1998). Úsek O-A = uzavírání pórů a mikrotrhlin; úsek A-B = přetvoření podle Hookova zákona; úsek B-C = vznik mikrotrhlin; úsek C-D = zvětšování mikrotrhlin; bod D = maximální pevnost.

### 3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

#### 3.1. Vymezení faktorů

Pro potřeby této práce jsou faktory, které ovlivňují mechanické vlastnosti hornin, rozdělené do několika kategorií. Za prvé se jedná o faktory, které nemohou být ovlivněny a jsou závislé na typu a stavbě horninového zkušební tělesa. Jsou to především petrografické aspekty, jako je mineralogické složení, struktura a projevy zvětrávání. Dále to jsou fyzikální vlastnosti jednotlivých zkušebních těles. Další vymezenou skupinou faktorů jsou ty, jejichž vliv na mechanické vlastnosti hornin lze ovlivnit, jako je výběr vzorku a postupy při kterých se ze vzorku horniny připravují zkušební tělesa. Poslední vymezené faktory, které mohou mít na mechanické vlastnosti vliv, jsou samotné zkušební podmínky, za kterých jsou zkušební tělesa zkoušena.

#### 3.2. Složení a stavba hornin

##### 3.2.1. Vliv struktury na mechanické vlastnosti hornin.

Struktura hornin je definována jako velikost, tvar a prostorové uspořádání minerálních zrn v hornině. Její znaky jsou dány podmínkami, za kterých docházelo ke vzniku horniny. Při určitých podmínkách při genezi horniny může dojít k vytvoření foliace a je tedy žádoucí tuto míru foliace nějak kvantifikovat.

Stupeň foliace se nechá kvantifikovat měřením pomocí obrazové analýzy či pomocí metody vyjádření foliačního indexu FIX, která počítá poměr délky hranic zrn minerálů paralelně a kolmo k uměle vytvořeným měřicím liniím (Åkesson 2003). Tyto výsledky se pak mohou porovnat s výsledky mechanických zkoušek.

Jelikož je struktura hornin závislá na prostorovém uspořádání minerálních zrn jednotlivých horninotvorných minerálů, tak se zde projevuje určitá míra anizotropie. Vliv struktury na mechanické vlastnosti hornin je popsán v následující kapitole.

##### 3.2.2. Vliv anizotropie na mechanické vlastnosti hornin

Anizotropie je všeobecně považována za vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru. Pro účely studia mechaniky hornin jsou za měnící se veličiny považovány mechanické vlastnosti hornin, konkrétně pevnostní charakteristiky. Goodman (1989) definuje termín pevnostní anizotropie jako změny pevnosti v tlaku závislé na směrech, ve kterých působíme na orientovaný vzorek horniny. K vyjádření velikosti pevnostní anizotropie existuje několik postupů. Obecně se však dá uvažovat o poměru mezi největší a nejmenší naměřenou pevností hornin při mechanických zkouškách. Podle těchto definic se nechá všeobecně usoudit, že vysoká míra anizotropie je předpokládána u hornin, ve kterých je patrná vrstevnatá struktura, foliace a další plochy nespojitosti. Proto se nechá očekávat, že vysokou míru anizotropie je možno zjistit například u břidlic nebo u metamorfovaných hornin, které vykazují vysokou míru usměrnění zrn minerálů. Anizotropii lze však pozorovat i u hornin, které nemají viditelné diskontinuity či na první pohled usměrněná zrna minerálů. Jedná se především o magmatické horniny.

Při úvahách o anizotropii je velmi důležité uvést měřítko, ve kterém se zkouší. V následujícím textu je popsána anizotropie, která se vztahuje na laboratorní měření, jedná se tedy o vzorky v řádech prvních desítek cm.

Pro studiu vlivu přednostní tvarové orientace minerálů na anizotropii pevnostních parametrů je potřeba vybrat vzorky hornin tak, aby dostatečně reprezentovaly možné variace daného litologického typu hornin (Přikryl 2001). Následně se ze vzorků vytvoří výbrusy a ty se podrobí obrazové analýze, která poskytne důležité údaje jako modální složení hornin a orientaci minerálních zrn. Samotné zkoušení pevnosti se provádí na jednoosém tlakovém přístroji ve všech 3 hlavních směrech, tím se získají pro daný vzorek 3 hodnoty pevnosti v tlaku: USCmax, USCinter a USCmin. Celková hodnota pevnosti v tlaku USCmean se vypočte jako (Přikryl 2001):

$$USC_{mean} = \sqrt[3]{USC_{max} \times USC_{inter} \times USC_{min}} \quad (8).$$

Tato průměrná hodnota udává charakteristickou pevnost pro každý typ zkoušeného vzorku. Anizotropie studovaných materiálů je pak vyjádřena buďto poměrem USCmax/USCmin či vzorcem (Přikryl 2001):

$$R_a = \frac{USC_{max} - USC_{min}}{USC_{mean}} \quad (9).$$

Výsledné stupně anizotropie  $R_a$  se porovnají se všemi dostupnými mikrostrukturálními parametry získané z obrazové analýzy a s výsledky jednoosé tlakové zkoušky. Přikryl (2001) konstatoval, že velikost anizotropie v granitech závisí především na přednostní orientaci a tvaru hlavních horninotvorných minerálů. Jestliže orientace minerálů v hornině je všesměrná, tak stupeň anizotropie je nepřesáhne 10 %. S rostoucí uspořádaností hlavních horninotvorných minerálů do jednoho směru roste stupeň anizotropie až o desítky procent. Průměrná velikost anizotropie  $R_a$  (v procentech) 11 vzorků granitů je 14.9 % (Přikryl 2001). Vzorky granitů s výraznou přednostní orientací minerálů mají více než dvojnásobně větší stupeň anizotropie než je celkový průměr z celé studie. Největší hodnota  $R_a$  pro granity je 33 %. Pro porovnání vzorky rul, které mají již makroskopicky zjevné usměrnění zrn minerálů, je pevnostní anizotropie až 88% (Tab. 1).

Tab. 1. Pevnost v prostém tlaku a jeho anizotropie. Písmena za hodnotou pevnosti v tlaku označují orientaci zkušebního tělesa vůči hlavním osám elipsoidu konečné deformace (Přikryl 2001).

Vzorek	Pevnost v prostém tlaku (MPa)				Anizotropie $R_a$
	Max.	Střed.	Min.	průměr	
<b>Granit G6</b>	136.5 X	131.2 Y	128.9 Z	132.2	<i>Nízká anizotropie</i>
<b>Granit G4</b>	195.2 X	183.7 Z	182.0 Y	184.9	
<b>Granit G5</b>	193.2 X	185.7 Y	180.6 Z	186.4	
<b>Granit G8</b>	95.0 Z	89.5 Y	86.1 X	90.1	<i>Střední anizotropie</i>
<b>Granit G3</b>	117.2 X	104.4 Y	103.3 Z	108.1	
<b>Granit G7</b>	116.2 Z	108.2 X	101.5 Y	108.5	
<b>Granit RP6</b>	127.7 X	113.4 Y	110.5 Z	117.0	
<b>Granit G9</b>	112.1 Y	100.5 Y	95.8 Z	102.6	
<b>Granit RP7</b>	160.7 Z	153.8 Y	135.1 X	149.5	
<b>Granit RP1</b>	269.3 X	230.7 Y	209.2 Z	235.1	<i>Vysoká anizotropie</i>
<b>Granit RP8</b>	159.8 X	150.0 Y	113.7 Z	139.7	
<b>Ortorula R2</b>	143.9 Z	131.3 X	88.7 Y	118.8	
<b>Ortorula R3</b>	115.4 X	75.5 Z	52.6 Y	77.1	

Popis pevnostní anizotropie uvádí ve své práci i Vasconcelos a kol. (2008), který zkoumal mechanické vlastnosti a chování granitů v tahových zkouškách. Anizotropii zde definuje jako poměr mezi

lomovými vlastnostmi získaných ve směrech rovnoběžných a kolmých k foliaci či ploše dělitelnosti granitů. V této práci však nepoužil obrazovou analýzu, či jiný nástroj, který by určil přednostní krystalografickou a tvarovou orientaci minerálů. Proto konstatuje jenom, že anizotropie závisí na vnitřní struktuře granitů. Dudková (1960) udává, že hlavní význam pro pevnostní anizotropii v granulitech má orientace biotitu a pravděpodobně v menší míře i tvarová orientace křemene. Působí-li zatížení kolmo na štěpnost biotitu, tak jsou zaznamenány vyšší hodnoty pevnosti v prostém tlaku, než když zatížení působí paralelně na štěpné plochy biotitu.

Dalším způsobem, jak vyjádřit anizotropii zdánlivě izotropních těles, je mnohosměrné prozařování zkušebních těles ultrazvukovým signálem a následné vypočtení anizotropie rychlosti seismických vln. Seismickou anizotropií se zabýval (Přikryl a kol. 2007), který v této práci použil stejné vzorky hornin jako ve své předchozí práci (Přikryl 2001), a proto je možné porovnat výsledky pevnostní anizotropie a seismické anizotropie.

Pro potřeby měření rychlosti šíření seismických vln je nutné připravit kulovité zkušební těleso, na které působíme ultrazvukovým signálem. Na každém vzorku probíhá měření ve 132 na sobě nezávislých směrech. Po získání údajů o rychlosti šíření seismických vln je pro jejich prostorové vykreslení použita Lambertova polární projekce. Popsané měření je prováděno za postupného zvyšování zpevňovacího tlaku od atmosférické hodnoty až do hodnoty přes 400 MPa. Tímto postupem je možno korelovat změnu rychlosti šíření seismických vln v závislosti na zvyšujícím se tlaku (Přikryl a kol. 2007).

Při atmosférickém či nízkém zpevňovacím tlaku je seismická anizotropie ovlivněna především přítomností orientovaných mikrotrhlin. Při zvyšujícím se zpevňovacím tlaku dochází postupnému uzavírání mikrotrhlin a velikost anizotropie je více ovlivněna přítomností krystalograficky preferovanou orientací a tvarovou orientací krystalů hlavních horninotvorných minerálů (Přikryl a kol. 2007). Dále při zvyšování zpevňovacího tlaku se zmenšuje stupeň seismické anizotropie. V některých případech, kde vzorek nevykazuje přednostní krystalografickou a tvarovou orientaci zrn, tak za vysokého zpevňovacího tlaku nevykazuje seismickou anizotropii (změna rychlosti šíření seismických vln). Z dalších srovnání je zřejmé, že velikost pevnostní anizotropie je lépe porovnatelná s velikostí seismické anizotropie měřené za vysokého zpevňovacího tlaku (Přikryl a kol. 2007). Tento způsob měření míry anizotropie je ovlivněn saturací zkoumaného tělesa. Nasycené zkušební těleso snižuje citlivost měřicího zařízení detekovat mikrotrhliny, které indikují anizotropii (Vasconcelos a kol. 2008). Toto měření se provádí za atmosférického tlaku, a jak uvádí Přikryl a kol. (2007), tak při těchto podmínkách anizotropii ovlivňuje nejvíce přítomnost orientovaných mikrotrhlin. Proto Vasconcelos a kol. (2008) doporučují využít tuto metodu pro orientační účely a pouze na suchých horninových zkušebních tělesech.

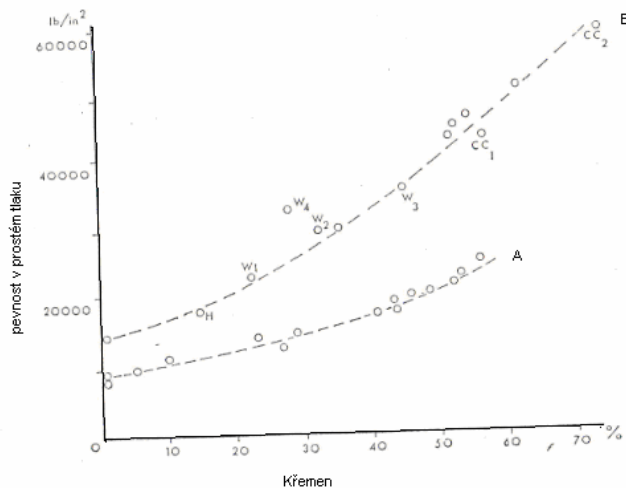
Z výše uvedených závěrů je zřejmé, že problém anizotropie by měl být brán v potaz při mechanických zkouškách hornin, neboť i makroskopicky neznatelná anizotropie hornin podstatně ovlivňuje výsledky jejich mechanických vlastností. Při výběru vzorků granitů či jiných hornin, které budou použity pro experimentální zkoušky je třeba zohlednit několik následujících faktorů. Při odběru vzorku z původní skalního tělesa je třeba zaznamenat orientaci lomových ploch a puklin či případnou foliaci. Následně vzorek popsat koordinačním systémem podle jeho vnitřní stavby. Výsledné hodnoty mechanických zkoušek hornin by pak měly být uvedeny v závislostech na těchto výše uvedených faktorech.

### 3.2.3. Vliv nerostného složení hornin na mechanické vlastnosti

Na mechanické vlastnosti hornin má vliv i samotné mineralogické složení hornin. U magmatických a metamorfovaných hornin obecně rostou jejich pevnostní charakteristiky s rostoucí bazicitou hornin a

snížení nastává při zvýšeném obsahu velmi dobře štěpných minerálů, konkrétně slíd (Dudková 1960). Mineralogické složení se však může měnit působením zvětrávacích procesů, kdy dochází k alteraci primárních minerálních zrn či k jejich úplnému rozložení na minerál jiný. Gupta a Rao (2000) studovali pomocí rentgenové difrakce změny v mineralogickém složení v rozdílných stupních zvětrávání u granitu, bazaltu a kvarcitu. U granitu dochází při vyšší zvětrávacích stupních k zvýšenému výskytu kaolinitu a jílovitých minerálů. U bazaltu postupně dochází k zmenšení zastoupení plagioklasů, pyroxenů a rozložení olivínu. Z novotvořených minerálů se objevuje montmorillonit a goethit. U kvarcitu dochází k minimálním změnám v mineralogickém složení. Tyto změny v mineralogickém složení vedou ke snížení pevnosti v prostém tlaku.

U sedimentárních hornin jsou pevnostní charakteristiky závislé nejen na nerostném složení hlavních minerálů konkrétní horniny, ale i na složení cementačního tmelu a matrix. Price (1966) studoval prachovce a pískovce, které rozdělil podle jejich cementačního tmelu na jílovou složku a složku, která obsahuje mimo jílu i karbonátové minerály. Pískovce s jílovou cementační složkou jsou méně pevné než pískovce se stejným obsahem křemene, ale s jílovito-karbonátovou cementační složkou (Obr.3). Je tedy zřejmé, že minerální složení matrix a cementačního materiálu má značný význam (Price 1966). U pískovců z Hořického hřbetu dochází při zvýšení obsahu křemene o 1 % ke zvýšení pevnosti v tlaku suchého vzorku o 2,5 MPa. Při zvýšení obsahu kaolinitu z 1 na 2 %, který se vytváří jako autigenní minerál, má za následek snížení pevnosti v tlaku v suchých vzorcích o 10 MPa (Šrámek 1991). Obě závislosti jsou podpořeny korelačními koeficienty, které jsou výrazně nad hranicí významnosti (Šrámek 1991).

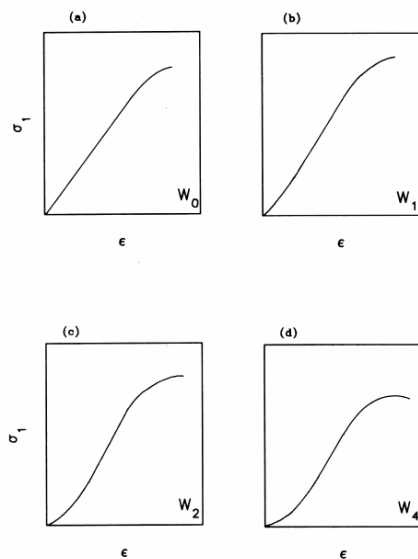


Obr. 3. Vztah mezi obsahem křemene v pískovcích a prachovcích a pevností v prostém tlaku. Křivka A reprezentuje typy hornin s jílovito-cementační složkou. Křivka B reprezentuje horninové typy s jílovito-karbonátovou cementační složkou (Price 1966).

### 3.2.4. Vliv zvětrávání na mechanické vlastnosti

Zvětrávání je soubor procesů, při kterých dochází k mechanickému rozpadu a chemickému rozkladu hornin na zemském povrchu (Bland a Rolls 1998). Na těchto procesech se podílejí i organismy. Intenzita zvětrávání je závislá mimo jiné na vlastním složení horniny, klimatu ve kterém se hornina nachází, charakteru reliéfu a také na délce působení faktorů. Obecně je zvětrávání intenzivnější, čím je hornina blíže k zemskému povrchu. A jelikož spousta inženýrsko-geologických prací je prováděna v přípovrchové zóně, tak pochopení vlivu a vyjádření vztahů mezi zvětráváním a mechanickými vlastnosti hornin je velmi potřebné.

Pro studium vlivu zvětrávání na mechanické vlastnosti hornin je zapotřebí vybrat vzorky hornin tak, aby pokryly rozdílné zvětrávací stupně pro daný litologický typ. Každý ze zvětrávacích stupňů je charakterizován podle několik faktorů. Změna barvy, struktury, vnitřní stavby, rozpad a rozklad minerálních zrn a změna pevnosti. Podle těchto faktorů byly horniny rozděleny do šesti kategorií, které popisují zvětrávání. Gupta a Rao (2000) došli k následujícím závěrům: Bazalt a granit ukazují podobný trend poklesu pevnosti v tlaku při zvýšeném zvětrávacím stupni. Obě dvě horniny vykazují pokles pevnosti v tlaku z čerstvé horniny do 4. zvětrávacího stupně o 98 %. Konkrétní vyjádření pevnosti v tlaku na suchých vzorcích: Granit z 132,8 MPa na 2,54 MPa u bazaltu z 172,55 MPa na 3,40 MPa. U kvarcitu je to snížení o 94 %, konkrétně z 207 MPa na 12,4 MPa. Podle normy ČSN 731001 je formální hranice mezi skalními a poloskalními horninami stanovena na  $\sigma_c=50$  MPa. Tuto hranici překročí studované horniny po druhém zvětrávacím stupni. U kvarcitu je to těsně před ní. Dále autoři zkoumali průběh křivky přetvoření. Většina čerstvých hornin ukazuje lineárně-elastické až kvazi-lineární chování přetvoření. S postupným zvýšením vlivu zvětrávání se tyto křivky mění více v plastické chování, které je charakterizováno „S“ tvarem křivky přetvoření (Obr. 4).

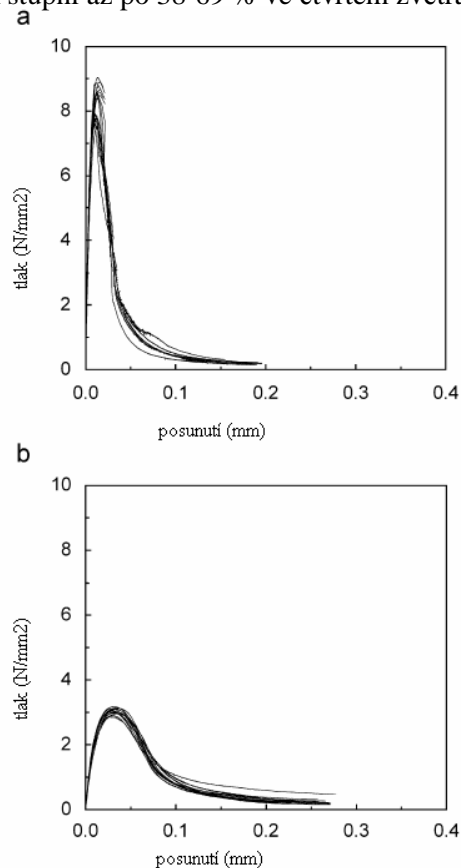


Obr. 4. Zobecněné přetvárné křivky při zatěžování prostým tlakem pro krystalické horniny: A = nepostižené zvětrávacími procesy; B = slabě zvětralé; C = středně zvětralé; D = úplně zvětralé (Gupta a Rao 2000).

Vliv zvětrávání se projevil i ve zkouškách v tahu. Výsledné mechanické vlastnosti a deformační chování byly porovnány s ohledem na rozdílnou míru zvětrání litologicky stejných vzorků. Z výsledků vyplývá, že dochází k značnému snížení pevnosti v tahu u navětralých granitů (Vasconcelos a kol. 2008). Co se týká deformačního chování v tahu, tak Vasconcelos a kol. (2008) popisují změny v křivce přetvořnosti. Pro čerstvé granity je po dosažení maximální pevnosti v tahu typické rychle klesající čára přetvoření. Naopak v případě více zvětralých granitů je po dosažení maximální pevnosti v tahu typické, že čára přetvoření klesá mnohem mírněji (Obr. 5). Dále autoři uvádí, že tvárnostní index  $d_u$  (poměr lomové energie ku maximální pevnosti v tahu) je u zvětralých granitů vyšší. To znamená, že více zvětralé horniny se chovají při deformaci více plasticky, než čerstvý stejný litologický typ horniny.

Kelsall a kol. (1986) měli ve své práci k dispozici dolerit ve všech jeho zvětrávacích stupních a vyjádřili zde závislost mezi stupněm zvětrání a pórovitostí. Kdy se pórovitost zvyšuje se zvyšujícím se stupněm zvětrání až na hodnotu více než 50 %.

Při zvyšujícím se zvětrávacím stupni se zvyšuje hustota mikrotrhlin a velikost pórů. A to má za následek lepší a rychlejší vsakování vody a tím i dochází k zvýšené vlhkosti horniny a snížení hodnot pevnostních charakteristik horniny. Toto snížení dosahuje v jemnozrnných pískovcích hodnot 6-13 % ve druhém zvětrávacím stupni až po 38-69 % ve čtvrtém zvětrávacím stupni (Mohamad a kol. 2008).



Obr. 5. Vybrané diagramy křivky přetvoření a, vysoce pevnostní granit b, nízko pevnostní granit (směr zkoušení: paralelní s plochou foliace) (Vasconcelos a kol. 2008).

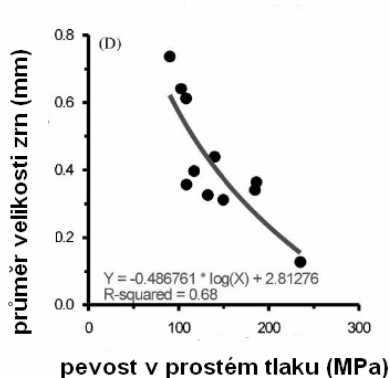
### 3.2.5. Vliv velikosti zrn na mechanické vlastnosti hornin

Průměrná velikost zrn v hornině je dalším petrografickým prvkem, který má prokázaný vztah k pevnostním charakteristikám hornin. Tento vztah popsal ve své práci Brace (1961), který předpokládá spojitost mezi maximálním průměrem zrn a Griffithovou teorií. Ta předpokládá, že struktura horniny je nestejnorodá a ve skalní hornině se vyskytují malé dutiny a trhliny, přičemž při namáhání se kolem těchto diskontinuit soustřeďuje příčné tahové napětí. K porušení horniny při namáhání tlakem dochází tím, že šíří porušení vzniklá soustředěným napětím lokalizovaným u diskontinuit (Škopek a kol.1986). Brace (1961) předpokládá, že se trhliny začínají šířit na hranicích zrn. Délky těchto trhlin nepřesahují délku maximálního průměru zrn a zvětšují se zvětšením velikosti zrn. Brace (1961) ve své práci zkoumal několik vzorků hornin (kvarcit, bazalt, vápenec, dolomit). Každý stejný litologický typ se lišil velikostí zrn. A pro všechny horniny platí, že se zvětšením maximálního průměru zrn se snižuje jejich pevnost.

Vztahem mezi průměrnou velikostí zrn a výsledky mechanických zkoušek u granitů a ortorul z Českého masivu se zabýval Příkryl (2001). Průměrnou velikost všech hlavních horninotvorných minerálů ve všech vzorcích hornin byla zjištěna pomocí obrazové analýzy, která počítá průměrnou velikost zrna jako průměr kruhu, který odpovídá ekvivalentní ploše analyzovaného zrna. Po porovnání



těchto parametrů a zanesení jejich hodnot do grafů jasně vyplývá, že mezi průměrnou velikostí zrna a střední hodnotou pevnosti v tlaku je nelineární negativní závislost. To znamená, že s rostoucí průměrnou velikostí zrna klesá pevnost v tlaku (Obr. 6).



Obr. 6. Vztah mezi pevností v prostém tlaku a průměrnou velikostí zrn (Příkryl 2001).

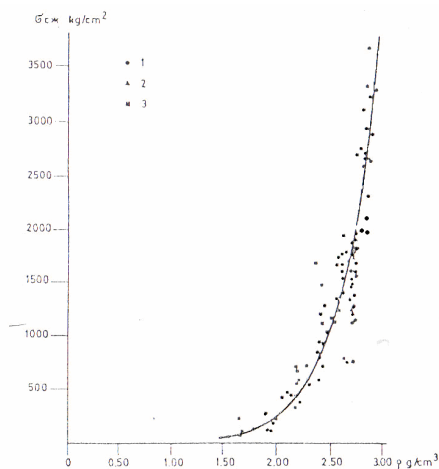
### 3.3. Fyzikální vlastnosti hornin

#### 3.3.1. Vliv hustoty na mechanické vlastnosti hornin

Zdánlivá hustota udává hmotnost vzorku vůči jeho objemu i s uzavřenými póry. Je tedy ovlivněna vlastním minerální složením, přítomností fluid a pórů v objemové jednotce.

U magmatických a metamorfovaných hornin je jejich hustota v podstatě funkcí jejich mineralogického složení a proto je definovaná i mineralogická hustota, která je vyjádřena jako poměr hmotnosti pevné nerostné složky horniny ( $M_m$ ) k jejímu objemu ( $Vol_m$ ). Udává se v jednotkách ( $kg \times m^{-3}$ ;  $g \times cm^{-3}$ ) a závisí pouze na nerostném složení. V podstatě se představuje vážený průměr hustot jednotlivých minerálů podle jejich objemového zastoupení. Tato hodnota se zvyšuje s rostoucí bazicitou hornin.

Smorodinov a kol. (1970) uvádějí, že s rostoucí hustotou karbonátových hornin se zvyšuje jejich pevnost v tlaku (Obr. 7). V principu se jedná o zvyšování dolomitové složky na úkor kalcitové složky (Příkryl 2010 osobní sdělení). Smorodinov a kol. (1970) hledali vztah mezi hustotou a pevností v tlaku také u křemenných pískovců a kvarcitů. Ale v tomto případě nemohl vztah vyjádřit, protože na vysoké rozpětí hodnot pevnosti v tlaku se vztahovalo pouze malé rozpětí hustoty.



Obr. 7. Vztah mezi pevností v prostém tlaku a hustotou karbonátových hornin (Smorodinov a kol. 1970).

### 3.3.2. Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti hornin

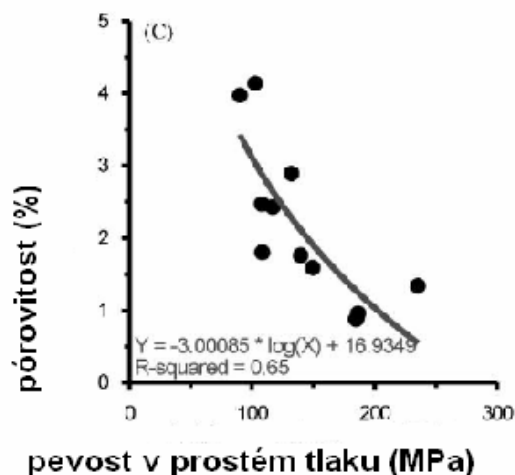
Pórovitost je definovaná jako poměr objemu pórů  $V_p$  k celkovému objemu horniny  $V_t$  podle vzorce (Goodman 1989):

$$n = \frac{V_p}{V_t} (\%) \quad (10).$$

Takto definovaná pórovitost zahrnuje všechny póry v hornině bez ohledu na to, jestli jsou vyplněny vodou, vzduchem a zda spolu komunikují či nikoli, proto se označuje jako pórovitost celková. Dále je definovaná i otevřená pórovitost, kde jsou započítávány jenom ty póry, které jsou navzájem propojené a dochází mezi nimi k migraci fluid. Hodnota pórového prostoru se zjistí tak, že rozdíl hmotnosti nasyceného a vysušeného vzorku je vydělen hustotou vody.

Pórovitost lze rozdělit ještě na primární a sekundární. Primární pórovitost je stanovena při vzniku horniny, například při utužení magmatu. Sekundární pórovitost je ovlivněna důsledkem diagenese, metamorfních procesů či zvětrávání. Význam má i tvar pórů. V čerstvých magmatických a metamorfovaných hornin je tvar pórů většinou ve tvaru protáhlých mikropuklin. Postupným zvětrávání a alterací původních minerálů dochází i v těchto horninách k zvýšení zastoupení sférických pórů (studium doleritu Kelsall a kol. 1986). V sedimentech je tvar póru závislý na tvaru klastů, ale převažuje sférický tvar. Tvar pórů pak může ovlivnit velikost seismické anizotropie.

V magmatických horninách je pórovitost většinou menší než 1-2 % (Goodman 1986), ale se zvyšujícím se stupněm zvětrávání se pórovitost výrazně zvyšuje. Vztah mezi pórovitostí a pevnostní charakteristikou u granitů a rul popsal Příkryl (2001). Rozsah hodnot pórovitost je zde od 0,88 % až po 4,14 % s následujícím vztahem, který uvádí, že se zvyšující se pórovitostí klesá pevnost v tlaku (Obr. 8). K podobným výsledkům dospěl i Vasconcelos a kol. (2004), který popisuje inverzní vztah mezi pórovitostí a rychlostí seismických vln granitů.



Obr. 8. Vztah mezi pevností v prostém tlaku a pórovitostí (Příkryl 2001).

Snížení pevnosti v tlaku se zvyšující se pórovitostí u karbonátových a křemenných pískovců a kvarcitů uvádí Smorodinov a kol. (1970). U karbonátových hornin (mramory, vápence a dolomity) uvádí lineární rovnici závislosti s korelačním koeficientem  $r^2=0.81$ . Dále však dodává, že karbonáty se zvyšující se pórovitostí do 4% rychle snižují pevnost v tlaku a nad hranicí 4% se závislost mezi pórovitostí a pevností v tlaku zmenšuje. U křemenných hornin s maximální pórovitostí cca. 7% byla

popsána také stejná závislost (Smorodinov a kol. 1970). U pískovců pórovitost také ovlivňuje vyříděnost zrn. S rostoucí mírou vyříděnosti se pórovitost zmenšuje.

U břidlic může být pórovitost dobrým indikátorem pevnostních vlastností, ale není již dobře porovnatelná s ostatními faktory (Lashkaripour a Passaris 1995).

Kelsall a kol. (1986) porovnávají vliv pórovitosti na pevnost u hornin, jejichž póry vznikaly rozdílnými procesy. Konkrétně se jedná o dolerit ze severozápadní Anglie a vezikulární bazalt z východní Kalifornie. Vznik pórovitosti u doleritu je vysvětlen jednak primární pórovitostí a dále pórovitostí vzniklou při zvětrávání, která může dosáhnout u silně rozvětralých doleritů více než 50 %. U vezikulárního bazaltu je rozsah pórovitosti od 0 % až po více než 25 %. Tato změna závisí na pozici, ve které tekoucí láva utuhla. Ve vrchu lávového proudu je pórovitost vysoká, naopak na spodu je pórovitost nízká (Kelsall a kol. 1986). U obou typů hornin má pórovitost hlavní vliv na jejich pevnost v tlaku. Kelsall a kol. (1986) uvádí příklad, kdy hornina s pórovitostí 5 % může snížit výslednou hodnotu pevnosti v tlaku až o 70 %, než stejná hornina s nulovou pórovitostí. Proto tyto vztahy vysvětlují původ toho, že některé horniny vykazují značně menší pevnostní charakteristiky, než se očekává.

Ze všech výše popsaných vztahů vyplývá, že pórovitost má velký vliv na mechanické vlastnosti hornin. Přítomnost pórů snižuje hodnoty pevnostních charakteristik hornin a zvyšuje se zastoupení plastické deformace tělesa. Pórovitost se obecně zvyšuje se stářím horniny a blízkostí zemského povrchu, kde je ovlivněna zvětrávacími procesy, které mají na sekundární pórovitost největší vliv.

### 3.4. Zkušební podmínky

#### 3.4.1. Vliv obsahu vody na mechanické vlastnosti

Voda může mechanické vlastnosti ovlivňovat jak svými fyzikálními vlastnostmi, tak i jako reaktant pro různé chemické reakce. Možnost nasycení horninových vzorků je závislá na pórovitosti a tedy i na stupni zvětrávání. Voda však zaplní jenom ty póry, které spolu komunikují. Jde tedy o tzv. efektivní pórovitost. Při zkouškách hornin na jejich mechanické vlastnosti lze uvažovat tři možnosti podle nasycení zkušebního tělesa vodou. Jedná se o vzorek vysušený, 100% nasycený nebo vzorek s přirozenou vlhkostí, resp. Nedokonale nasycený.

Hodnota nasycení horniny vodou je dána poměrem mezi objemem vody v pórech a objemem všech volných pórů a je přepočtená na procentuální vyjádření. Schopnost nasycení se zvyšuje se zvýšením zvětrávacího stupně hornin. Při zvětrávání dochází ke zvětšení velikosti pórů a hustotě mikropuklin a voda se tak snáze dostane do většiny volných prostor v hornině (Mohamad a kol. 2008). Při určitém stejném procentuálním stavu nasycení různých vzorků stejného litologického typu hornin však může být absolutní obsah vody různý.

Vlhkost představuje poměrné zastoupení volné vody v hornině, kterou lze odstranit vysušením při teplotě 105°C do stále hmotnosti, minimálně však po dobu 24 hodin. Rozlišuje se vlhkost hmotová a objemová. Používanější hmotová vlhkost se vypočítá ze vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} (\%) \quad (11),$$

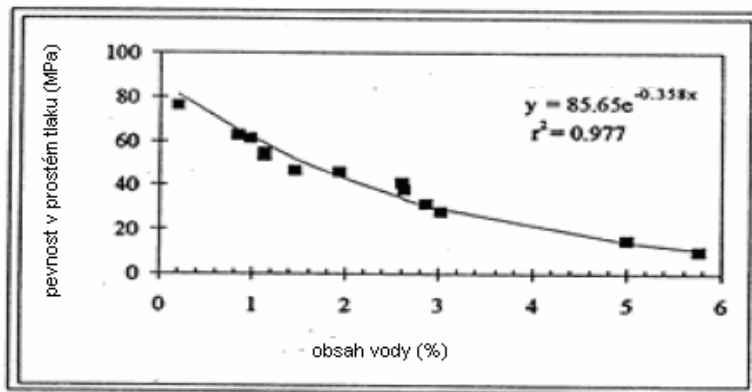
kde  $m_w$  je hmotnost vlhkého zkušebního tělesa a  $m_d$  je hmotnost vysušeného zkušebního tělesa.

U běžných magmatických hornin se přirozená vlhkost pohybuje v rozsahu prvních procent. Naopak u hornin poloskalních (prachovce, jílovce) a u hornin navětralých dosahuje vlhkost většího zastoupení a má větší význam. Gupta a Rao (2000) popisují změny pevnosti v prostém tlaku u krystalických hornin

(bazalt, granit a kvarcit) v závislosti na stupni jejich zvětrání a na stavu nasycení. U všech nasycených testovacích těles hornin je patrné snížení pevnosti v tlaku. Největší rozdíl v pevnosti mezi suchým a nasyceným čerstvým vzorkem je u bazaltu. Nejmenší je pak u kvarcitu. U více zvětralých hornin se rozdíly hodnot pevnosti v tlaku mezi suchým a nasyceným zkušebním tělesem zvyšují. Zvýšený obsah vody v hornině může mít za následek i chemické procesy, které mají za následek zhoršení pevnostních vlastností cementačního pojiva především v sedimentárních horninách (Goodman 1986).

Vasconcelos a kol. (2004) popisují změnu v chování granitu při tahových zkouškách v závislosti na stupni nasycení. Udává příklad na vzorku granitu s relativně vysokou pórovitostí (7,24 %), kdy jeden vzorek byl zkoušen po vysušení a druhý vzorek byl testován při 100% nasycením vodou. Při porovnání těchto dvou hodnot je patrné, že se pevnost v tahu u nasyceného vzorku snížila přibližně o 25 % a to při stejném tvaru křivky přetvoření granitu v tahu.

Lashkaripour a Passaris (1995) uvádí, že obsah vody v břidlicích je velmi dobrým indikátorem pevnosti v tlaku a jiných mechanických vlastností. S rostoucím obsahem vody klesá velmi výrazně pevnost v jednoosém tlaku. Tuto závislost zjistili na 13 vzorcích břidlic s rozsahem obsahu vody od 0% až po 6% s významným korelačním koeficientem  $r^2=0.977$  (Obr.9).



Obr. 9. Závislost mezi obsahem vody a pevností v prostém tlaku u břidlic (Lashkaripour a Passaris 1993).

Romana a Vásárhelyi (2007) uvádějí možné příčiny snížení pevnosti v tlaku u sedimentárních hornin. U dobře zpevněných hornin dochází při zatěžování k postupnému zvětšování mikrotrhlin, které se vytvářejí na hranicích jednotlivých zrn. Povrchová energie na hranicích jednotlivých zrn se snižuje se vzrůstajícím obsahem vody, a proto se mikrotrhliny rozšiřují rychleji. Tímto dochází ke snížení pevnosti v prostém tlaku. Proces růstu trhlin je dále podporován zvýšením tlaku v pórech. V méně zpevněných horninách může mít přítomnost vody za následek zhoršení pevnosti cementačního pojiva. Po srovnání dat z několika předchozích studií Romana a Vásárhelyi (2007) popsali nezávislý vztah pevností v prostém tlaku mezi nasycenými a suchými zkušebními tělesy sedimentárních hornin podle míry jejich zpevnění.

- Dobře zpevněné horniny:  $USC_{sat}/USC_{dry} = 0.80-0.90$
- Středně zpevněné horniny:  $USC_{sat}/USC_{dry} = 0.60-0.70$
- Měkké jílovité horniny:  $USC_{sat}/USC_{dry} = 0.30$

Kde  $USC_{sat}$  je pevnost nasyceného zkušebního tělesa v prostém tlaku a  $USC_{dry}$  je pevnost vysušeného zkušebního tělesa v prostém tlaku.

### 3.5. Vliv přípravy zkušebních těles pro mechanické zkoušky

Mechanické vlastnosti hornin jsou ovlivňovány nejen samotným složením a stavbou horniny, ale vliv na výsledky mechanických zkoušek mají i přípravné a laboratorní postupy, kterými je hornina zkoušena.

#### 3.5.1. Výběr vzorků pro zkoušky

Samotný výběr vzorku horniny by měl být systematický s ohledem na jevy, které jsou studovány. Vzorky by měly být odebrány z charakteristického místa pro danou lokalitu. Dále by měly být vzorky pečlivě zdokumentovány. Mimo jiné například zaznamenat typ výchozu, ze kterého byly vzorky odebrány. Zda se jedná a přirozený skalní výchoz nebo zda byl vzorek odebrán v opuštěném či činném lomu. V tomto případě se zapíše odhad hloubky pod povrchem. Při odběru je žádoucí popsat orientaci vzorku vůči původnímu uložení ve skalním masivu. Například při odběru granitů je vhodné poznamenat orientaci k plochám odlučnosti.

#### 3.5.2. Doporučený počet vzorků pro laboratorní zkoušky

Pro zjištění hledaného parametru s určitou přesností by mělo být zkoušeno více vzorků stejného typu horniny. V zásadě se při určení počtu zkoušených těles vychází ze statistických metod. Především z předpokládané variability získaných hodnot. Čím větší je očekávaná variabilita získaných dat, tím větší počet vzorků by měl být testován. Samozřejmě je nutné brát ohled i na finanční náklady. Určité doporučení pro zjištění minimálního počtu vzorků založený na statistických metodách a algoritmech uvádí Gill a kol. (2005) (Tab.2).

Tab. 2. Doporučený počet zkušebních těles podle ISRM (2007) uvedené Gillem a kol. (2005).

Typ testu	Počet zkušebních těles
Prostý tlak	Určení podle praktické úvahy, ale nejméně 5
Prostý tah Nepřímý tah	Určení podle praktické úvahy, ale nejméně 5
Bodový tlak	Nejméně 10. Více pro heterogenní a anizotropní horniny. 2 nejvyšší a nejmenší hodnoty nemusí být započítány
<u>triaxiální</u>	Určení podle praktické úvahy, ale nejméně 5
Pórovitost/ hustota	Nejméně 3

#### 3.5.3. Vliv velikosti a opracování zkušebních těles na mechanické vlastnosti

Při volbě vzorku a z něj připravených zkušebních těles je zapotřebí, aby dostatečně reprezentovaly stavbu horniny a měl by být potlačen vliv opracování povrchových ploch.

Objemový faktor měřítka spočívající v úvaze, že čím větší bude objem zkoumaného vzorku, tím větší je možnost, že se v něm objeví různé prvky nespojitosti. Povrchový faktor měřítka charakterizuje relativní narušení zkušebního tělesa způsobené vlastní přípravou. Tedy například vrtáním, řezáním a broušením. Tento faktor se více projeví u hrubozrnných, či porfyrických hornin, kde vliv opracované

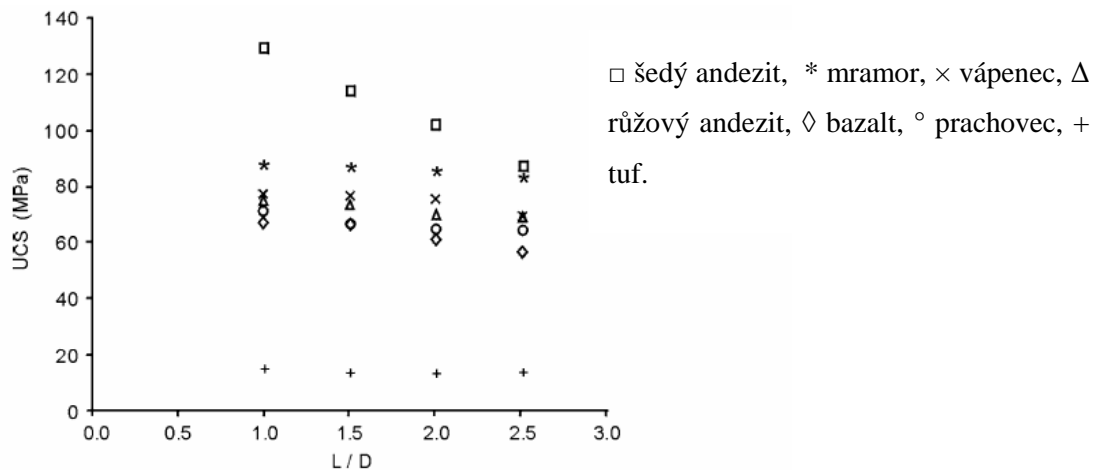
plochy zasahuje v důsledku velkých zrn do větší hloubky. Dále u menších zkušebních těles, kde jejich velikost a dosah poškození má v relativním měřítku větší význam (Bláha 1975).

Co se týče samotného tvaru zkušebního tělesa, zásadními problémy je štíhlostní poměr  $\lambda$ , tedy poměr výšky a šířky studovaného vzorku. Bláha (1975) navrhuje, aby štíhlostní poměr pro zkoušky v jednoosém tlaku  $\lambda=L/D>1$ . Konkrétní doporučený štíhlostní poměr pro různé druhy laboratorních zkušebních metod je uveden v ISRM (2007). Ve většině případů je doporučován poměr (L/D) 2,5-3.

Poměr nejmenšího rozměru vzorku D a střední hodnotou průměru zrn d, jenž je dán výrazem D/d, přičemž jeho hodnota by měla být minimálně  $D/d \geq 10$  (Bláha 1975). Tento poměr zmiňuje ve své práci i Vasconcelos a kol. (2008), který jej pro zkoušky v jednoosém tahu nemohl dodržet při zkouškách hrubozrnných granitů. Kvůli omezení maximální velikosti vzorku v měřicím přístroji. Tento problém vyřešil zvýšením počtem zkoušených zkušebních těles hrubozrnných granitů. Absolutní velikosti průměru zkušebního tělesa by měla být nejméně 54 mm ISRM (2007).

Předchozí výzkumy prokázaly, že hodnoty pevnosti v prostém tlaku se zmenšují s rostoucím poměrem (L/D). Výrazné snižování pevnosti s rostoucím štíhlostním poměrem jsou zaznamenány pro poměr  $L/D < 2$ . Velmi malé snížení hodnot pevnosti je mezi štíhlostním poměrem 2-2,5. Při štíhlostním poměru  $>2$  zůstává pevnost v prostém tlaku konstantní (Tuncay a Hasancebi 2009).

Tuncay a Hasancebi (2009) zkoušeli pevnost v prostém tlaku na suchých válcových zkušebních tělesech (bazalt, růžový a šedý andezit, vápenec, prachovec, mramor a tuf) v závislosti na jejich štíhlostním poměru, který byl u všech zkušebních těles v poměrech: 1, 1,5, 2 a 2,5. U většiny zkoušených typů hornin dochází ke snížení pevnosti v prostém tlaku při zvyšování štíhlostního poměru (Obr. 10). Tento pokles se netýká tufu, což je vysvětleno rozdílnou velikostí zrn a navíc tuf má podstatně nižší hodnoty pevnosti v tlaku než ostatní zkoušené horniny. Autoři dále poznamenali, že získané výsledky pevnosti v prostém tlaku nejsou významně závislé na rychlosti zatěžování.



Obr. 10. Vztah mezi průměrnou pevností v prostém tlaku a štíhlostním poměrem zkušebních těles (Tuncay a Hasancebi 2009).

Zkušební tělesa by měla splňovat standardy pro opracování. Především by měla být hladce opracovaná. Tlačné plochy zkušebních těles by měly být ploché a po stranách tělesa by neměly být žádné odchylky od rovinnosti. Z těchto důvodů je nutné tlačné plochy zkušebních tělísek dobrušovat a také kontrolovat tlačné plochy zkušebního zařízení. Ve většině současných prací, které jsou věnovány zkoušení mechanických vlastností hornin, je použito doporučení International Society for Rock Mechanics ISRM (2007).

#### 4. ZÁVĚR

Mechanické vlastnosti hornin jsou dány především samotným mineralogickým složením a stavbou horniny. Tyto parametry se však mohou měnit a tím dochází k ovlivnění mechanických vlastností. Za důležitý faktor, který ovlivňuje mechanické vlastnosti hornin lze považovat vliv zvětrávání. Při tomto procesu dochází ke zvýšení pórovitosti, změnám v mineralogickém složení a zvýšené nasákavosti. Všechny tyto faktory mají za následek znatelné snížení pevnostních charakteristik a změnu přetvárných charakteristik.

U čerstvých hornin, ze kterých jsou získána zkušební tělesa, může mít značný vliv anizotropie, neboť i u zdánlivě izotropních těles např. magmatické horniny mohou být pevnostní charakteristiky ovlivněny až o desítky procent. Proto by měly být u výsledků mechanických zkoušek uváděny alespoň stručné popisy výše zmíněných faktorů a popis orientace vzorku v původním uložení. Záleží na požadované míře přesnosti a pro jaké účely jsou mechanické vlastnosti zjišťovány.

Další ovlivnění jsou dány zkušebními postupy a přípravou zkušebních vzorků. Proto je snaha tyto postupy co nejvíce standardizovat. Největší vliv na výsledné pevnostní charakteristiky hornin má velikost a tvar zkušebního tělesa. Tento vliv je dobře popsán, takže je možné s dostačující přesností odhadnout změny pevnostních hodnot v závislosti na změně velikosti zkušebního tělesa.

Některé popsané vztahy mezi fyzikálními faktory, složením a stavbou hornin a pevnostními charakteristikami mají docela významné lineární korelační koeficienty. Proto se nechá v některých případech, kdy to dovoluje přesnost požadovaného výsledku, odhadnout velikost pevnostních charakteristik aniž by se musely samostatně zkoušet. A to na základě jiných zjištěných faktorů, které jsou popsány v této práci. Tím se mohou snížit finanční náklady.

## 5. LITERATURA

Åkesson U., Stigh J., Lindqvist J. E., Göransson M., 2003. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy, *Engineering Geology*, (68), str. 275-288

Bláha F., 1975. Vliv velikosti a tvaru vzorků na pevnost v jednoosém tlaku. *Sborník GPO-8*, květen. str. 85-100

Bland W., Rolls D. 1998. *Weathering. An introduction to the scientific principles*. Arnold, London, 271 str.

Brace W.F., 1961. Dependence of fracture strength of rocks on grain size. *Proceedings of the 4th Symposium Rock Mechanics*. University Park, USA, str. 99-103.

ČSN 731001. Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy

Dudková I., 1960. Souvislost struktury hornin s jejím fyzikálně mechanickými vlastnostmi. *Zprávy ÚTAM*, č.24.

Gill D. E., Corthésy R., Leite M. H., 2005. Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. *Engineering Geology*, 78: 29-51.

Goodman R. E., 1989. *Introduction to rock mechanics*. 2nd edition, Wiley and sons, New York, 576 str.

Gupta A.S., Rao K.S., 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56: 257-274.

ISRM. 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. *Ulusay R., Hudson J.A., Suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group*, Kozan ofset, Ankara 628 str.

Kelsall P.C, Watters R.J , Franzone J.G., 1986. Engineering characterization of fissured, weathered dolerite and vesicular basalt. *Proceedings of the 27th U.S. symposium on rock mechanics „Rock mechanics: key to energy production“*. Tuscaloosa. Alabama. June 23-25th. str.77-84

Lashkaripour G.R., 1995. Passaris E.K.S., Correlation between index parameters and mechanical properties of shales. *8th Int. Cong. On Rock Mech. Tokyo*. Vol. 1, str. 257-261

Mohamad E.T., Komoo I., Kassim K.A., 2008. Influence of moisture content on strength of weathered sandstone. *Malaysian J. of Civil Engng*. 20 (1): 137-144.

Price N. J., 1966. *Fault and joint development*, Pergamon Press, Oxford, 176 str.

Přikryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 38: 671-682.

Přikryl R., Lokajíček T., Pros Z., Klíma K., 2007. Fabric symmetry of low anisotropic rock inferred from ultrasonic sounding: Implications for the geomechanical models. *Tectonophysics*, (431) str. 83-96

Romana M., Vásárhelyi B., 2007. A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples. *The ISRM 11th International Congress on Rock Mechanics*, Lisbon (Portugal), July 9-13th, 4 str.

Smorodinov M.I., Motovilov E.A., Volkov V. A., 1970. Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks. *Proceedings of the 2nd Congress of the*



*International Society of Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, September 21–26, vol. II, Theme 3, 3 str.

Škopek J., Ťavoda O., Drozd K., 1986. *Mechanika hornin I*. Univerzita Karlova v Praze, Praha, 242 str.

Šrámek J., 1991. Vliv nerostného složení křídových křemenných pískovců na fyzikálně-mechanické vlastnosti. *Horniny ve vědách o Zemi*, Univerzita Karlova v Praze, Praha.

Tuncay E., Hasancebi N., 2009. The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, (68) str 491-497.

Vasconcelos G., Lourenço P.B., Alves C.A.S., Pamplona J., 2004. Experimental properties of granite. *6th. Int. Symposium on the conservation of monuments in the mediterranean basin*, Lisbon (Portugal), April 6-10th, str. 376-380.

Vasconcelos G., Lourenço P.B., Alves C.A.S., Pamplona J., 2008. Experimental characterization of the tensile behaviour of granites. *Int. J. of rock mechanisc & mining science*, (45) str. 268-277.

### **Internetové zdroje**

<http://www.isrm.net/gca/index.php?id=231>

<http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/zkousky/pevnosti-vlastnosti/pevnost-v-tahu-za-ohybu>