

UNIVERZITA KARLOVA, PRAHA

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Zjišťování pevnosti v prostém tlaku hornin v inženýrskogeologické praxi

Bakalářská práce

Martin Činčura

Praha 2024

Vedoucí práce: Mgr. Jiří Rout

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zjišťování pevnosti v prostém tlaku hornin v inženýrskogeologické praxi“ vypracoval samostatně a uvedl všechnu použitou literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Praha, 2024

.....

Martin Činčura

Poděkování

Rád bych vyjádřil poděkování svému vedoucímu práce Jiřímu Routovi za jeho trpělivost a ochotu při vzájemné spolupráci, dále pak za jeho cenné rady poskytující hlubší porozumění zkoumaného tématu.

Abstrakt

Pevnost v prostém tlaku patří ke stěžejním materiálovým parametrům v inženýrské geologii. Na základě pevnosti podloží se určuje způsob zakládání pozemních i dopravních staveb (a dalších) tak, aby nedošlo k jejich selhání v rámci vyměřené životnosti stavby a zároveň aby nedošlo k jejich předimenzování, a tedy k zvýšení nákladů prací. Tato bakalářská práce si klade za cíl posoudit vhodnost aplikace nejběžnějších metod zjištění pevnosti hornin v prostém tlaku, a dále vymezit jejich limitující faktory a přesnost měření. Na základě literární rešerše práce představuje jednotlivé metody ke stanovení pevnosti v prostém tlaku a určuje jejich vhodnost při řešení inženýrskogeologických problémů. Nejspolehlivější metodou pro stanovení pevnosti v prostém tlaku je jednoosá tlaková zkouška. Na rozdíl od ostatních metod má přímý fyzikální význam a nezávisí na empirických korelačních vzorcích, jednoduchost samotného výpočtu se odráží i na přesnosti výsledné pevnosti. Pro rychlé stanovení pevnosti v terénu bez důrazu na vysokou přesnost jsou metody Schmidtova kladiva, bodového zatížení a polní zkouška dostačující. V případě, kdy nelze odebrat kvalitní vzorky in situ, má vyhovující výpovědní metodu i geofyzikální měření.

Klíčová slova: pevnost v prostém tlaku hornin, inženýrská geologie, terénní měření, laboratorní zkoušky

Abstract

Unconfined compressive strength classifies as one of the key material parameters in engineering geology. Based on the strength of bedrock surface and transport structures (and more) are designed in a manner, so they will not collapse or be over-engineered, resulting in higher costs. This thesis compares suitability of the most common methods for determining unconfined compressive strength of rock, and further defines limiting factors and accuracy of its measurements. The research presents methods for determining unconfined compressive strength and suggest their suitable use in engineering geology. The most reliable method seems to be uniaxial compression test. Unlike other methods presented, it has real physical meaning, is not dependent on empirical correlation formulas and simplicity of calculation is also reflected on final accuracy. For fast strength determination in the field, the method of Schmidt hammer, the point-load test and the field test are sufficient. In case where it is not possible to obtain quality rock sample geophysical methods are sufficient.

Keywords: unconfined compression strength, engineering geology, field measurements, laboratory tests

Obsah

1. Úvod	1
2. Pevnost hornin v prostém tlaku.....	2
2.1 Stupeň pevnosti hornin	3
2.2 Parametry ovlivňující pevnost hornin v prostém tlaku.....	4
2.2.1 Velikost vzorku.....	4
2.2.2 Tvar vzorku.....	4
2.2.3 Anizotropie	4
2.2.4 Vlastnosti zatěžovacího zařízení	4
2.2.5 Obsah vody	5
2.2.6 Teplota	5
2.3 Statistické zpracování měření	6
3. Metody zjištění pevnosti – přesnost, okrajové podmínky, využitelnost v praxi	7
3.1 Metoda Schmidtova kladiva	7
3.1.1 Popis zařízení	8
3.1.2 Normalizace měření	9
3.1.3 Postup měření	10
3.1.4 Faktory ovlivňující měření	11
3.1.5 Korelace s pevností v prostém tlaku	11
3.2 Zkouška bodového zatížení.....	13
3.2.1 Popis zařízení	13
3.2.2 Postup měření	14
3.2.3 Měření na anizotropních horninách	15
3.2.4 Faktory ovlivňující měření	16
3.2.5 Vyřazení neplatných měření	16
3.2.6 Index bodového zatížení.....	17
3.2.7 Oprava na velikost	17
3.2.8 Korelace indexu bodového zatížení s pevností v prostém tlaku	18
3.3 Jednoosá tlaková zkouška	19
3.3.1 Popis zařízení	19
3.3.2 Postup měření	19
3.3.3 Předpoklady pro tvar vzorku.....	20
3.3.4 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	20
3.3.5 Vyhodnocení měření a určení pevnosti.....	20
3.4 Triaxiální zkouška	21

3.4.1 Popis zařízení	21
3.4.2 Postup měření	22
3.4.3 Hoek-brownovo kritérium selhání.....	22
3.5 Geofyzikální metody	24
3.5.1 Geoelektrické metody	25
3.5.2 Ultrazvukové měření.....	26
3.5.3 Seismický průzkum	27
3.6 Polní stanovení pevnosti v prostém tlaku.....	28
3.6.1 Postup měření	28
3.6.2 Faktory ovlivňující měření	28
4. Přesnost a interpretace metod	29
5. Závěr	31
6. Seznam literatury.....	32
7. Seznam obrázků.....	36
8. Seznam tabulek	36
9. Seznam grafů	36

Nomenklatura

σ_c pevnost v prostém tlaku [MPa]

F_{max} síla při porušení vzorku [N]

σ_1 normálové napětí [MPa]

$\sigma_{2,3}$ radiální napětí [MPa]

R Schmidtova pevnost (odrazové číslo)

Δ směrodatná chyba [jednotka závislá na vstupní veličině]

γ objemová tíha [kN/m³]

D vzdálenost kuželových hrotů [mm]

D_e ekvivalentní průměr jádra [mm]

I index bodového zatížení [-]

I₅₀ index bodového zatížení pro vzorek o průměru 50 mm [-]

1. Úvod

V inženýrskogeologické praxi se používají různé parametry pro predikci chování horninového prostředí v interakci s projektovanou výstavbou. Ve většině případů hraje stěžejní roli pevnosti v prostém tlaku. Jedná se o základní parametr pro hodnocení kvality hornin i horninového masívu. Pevnost v prostém tlaku vstupuje jako jeden ze základních parametrů i do běžně používaných klasifikací horninového masívu (RMR, Q, QTS).

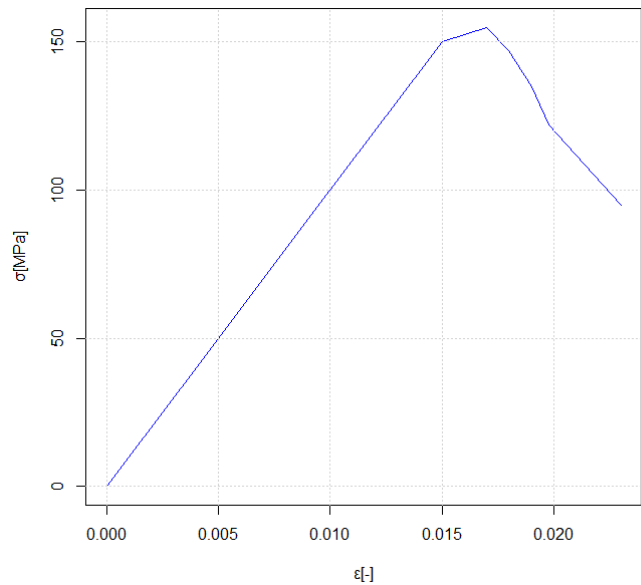
Metody měření jsou často standardizovány a definovány evropskými a českými normami. Některé metody, zejména geofyzikální, nejsou standardizovány ISRM ani ASTM, což snižuje jejich vypovídací hodnotu. S takovými výsledky je pak nutno pracovat obezřetně jako s orientační hodnotou.

Při inženýrskogeologickém průzkumu pevnost hornin v prostém tlaku σ_c vyjadřujeme v MPa. Na základě hodnoty pevnosti pak zařídíme horninu do klasifikační třídy R1-R6 dle platné normy ČSN P 73 1005 – Inženýrskogeologický průzkum. Obdobnou klasifikaci využívají i jiné oborové normy.

V práci se budu zabývat všeobecně nejběžnějšími metodami používanými ke zjištění pevnosti v prostém tlaku.

2. Pevnost hornin v prostém tlaku

Materiálový parametr pevnosti vychází z maxima deformační křivky materiálu, tu vyjadřuje závislost relativního přetvoření na normálovém napětí. Při zatěžování materiál zprvu podléhá pružné deformaci lineárního charakteru řídicí se Hookovým zákonem. Pokud vzorek přestaneme zatěžovat před dosažením meze kluzu, vrací se do výchozího tvaru (Halliday et al., 2021). Po překročení meze kluzu se materiál chová plasticky, to znamená, že již nepodléhá vratné deformaci. Závislost již není lineární. Plastická deformace končí v momentě rozrušení vzorku, což definujeme jako mez pevnosti. Pevnost tedy definujeme jako maximální normálové napětí, při kterém dojde k porušení. Stanovuje se experimentálně v laboratorních podmínkách standardizovanými postupy, běžně se udává v MPa. Lze ji vypočítat dle následujícího vztahu (Halliday et al., 2021):



Graf 1: závislost přetvoření na napětí granitu (vlastní)

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A}$$

Kde σ_c představuje pevnost v prostém tlaku, F_{max} maximální dosaženou sílu při zatěžování a A obsah podstavy vzorku.

Prostý tlak nastává při splnění dvou základních předpokladů. První předpoklad říká, že radiální napětí (σ_2 a σ_3) musí být nulové, pokud by tato podmínka nebyla splněná, docházelo by k ovlivnění výsledné pevnosti horniny (viz kapitola 3.4 Triaxiální zkouška). Dále testovaný vzorek musí být zatěžován na střednici.

Existuje celá řada dalších typů pevností (tlaková, tahová, smyková, nárazová, ohybová, torzní a další). Při zkoumání materiálových vlastností hornin v inženýrské geologii nás zajímá především pevnost v tlaku (což odráží převládající způsob zakládání pozemních a dopravních staveb). Velikost tahové síly bývá řádově menší, což je i důvod proč se horniny nepoužívají k přenášení tažného napětí (v případě betonu se pevnost v tahu zvyšuje ocelovými výztuhami). V případě měření pevnosti na horninách s diskontinuitami může být důležitá i smyková pevnost.

2.1 Stupeň pevnosti hornin

Pro lepší orientaci ve spektru pevností se zavádí uměle vytvořené kategorie rozdělující horniny na základě jejich pevnosti. V České republice se ke klasifikaci hornin dle jejich pevnosti používají normy ČSN EN ISO 14689-1 (721005) a ČSN P 73 1005 (hlavní rozdíl spočívá v rozdílných velikostech jednotlivých kategorií viz *tabulka 1 a 2*). Extrémně měkké horniny (*tabulka 1*) se chovají jako zeminy a lze je alternativně popisovat podle ČSN EN ISO 14689-1 (721005).

Název	Popis	Pevnost v prostém tlaku [Mpa]
Extrémně měkká	Lze vytvořit rýhu nehtem.	menší než 1
Velmi měkká	Rozpad po jednom úderu geologickým kladivem, může být odlupován kapesním nožem.	1 až 5
Měkká	Ztěžka odlupován kapesním nožem, vzniká mělká jamka po jednom úderu hrotem geologického kladiva.	5 až 25
Středně pevná	Nemůže být oškrábán nebo odlupován kapesním nožem. Vzorek může být rozbit jedním silným úderem geologického kladivem.	25 až 50
Pevná	Pro rozbití vzorku je nutné více než jeden úder geologickým kladivem.	50 až 100
Velmi pevná	Pro rozbití vzorku je nutné mnoho úderů geologickým kladivem.	100 až 250
Extrémně pevná	Vzorek je po mnoha úderech geologickým kladívkem pouze otlučený.	více než 250

Tabulka 1: zařídění hornin podle pevnosti (ČSN EN ISO 14689 (721005))

Třída	Pevnost σ_c [MPa]	Stupeň pevnosti	Charakteristika	Typy hornin (příklady)
R6	0.5 až 1.5	Extrémně nízká	Horninu lze škrábat nehtem.	Zcela zvětralé: horniny třídy R3 až R5 Eluvia: charakteru zemin
R5	1.5 až 5	Velmi nízká	Horninu lze rozdrobit rukou.	Zdravé: velmi slabě zpevněné pískovce, prachovce a jílovce; tufity; dislokační jíly Zcela zvětralé: horniny třídy R1 a R2 Silně zvětralé: horniny třídy R3 Mírně zvětralé a zvětralé: horniny třídy R4
R4	5 až 15	Nízká	Horninu lze škrábat nožem, nikoli nehtem.	Zdravé: slabě zpevněné pískovce, prachovce a jílovce; chloritické a grafitické břidlice, fylonity; ultramylonity Silně zvětralé: horniny třídy R1 a R2 Mírně zvětralé a navětralé: horniny třídy R3
R3	15 až 50	Střední	Horninu lze kladivem lehce rozbít.	Zdravé: jílovce, slínovce, vulkanické tufy, kataklasity Mírně zvětralé: horniny třídy R1 Zvětralé: horniny třídy R2
R2	50 až 150	vysoká	Horninu lze kladivem těžce rozbít.	Zdravé: vápenec, dolomity, slepence, pískovce, droby, pevné prachovce, pararuly, svory, fylity Navětralé: horniny třídy R1
R1	>150	Velmi vysoká	Horninu lze kladívkem těžce otlukat.	Zdravé: granitoidy, diority, gabra, migmatity, granulity, kvarcity, amfibolity, bazalty, prokřemenělé pararuly, ortoruly, krystalické vápence, silicity

Tabulka 2: Inženýrskogeologický průzkum (ČSN P 73 1005)

2.2 Parametry ovlivňující pevnost hornin v prostém tlaku

Pevnost hornin zprostředkovává jejich petrografická struktura, přičemž hraje roli geneze, chemické složení, porozita, cementace, ostrohrannost jednotlivých zrn a mnohé další. V této kapitole bych se, ale chtěl spíše zaměřit na faktory, které ovlivňují přímo proces laboratorního/terénního zkoušení pevnosti v prostém tlaku.

2.2.1 Velikost vzorku

Pevnost v prostém tlaku různě velkých vzorků se zachováním konstantního poměru průměru a výšky vzorku se může pro některé typy hornin lišit. Hlavní příčinou je rostoucí množství diskontinuit se zvětšováním rozměru vzorku. Statisticky se u větších vzorků obvykle objevuje více nehomogenit než u vzorků malých (Weibull, 1951). Horniny s výskytem nehomogenit jsou typicky charakteristické sníženou pevností (Bieniawski, 1968).

2.2.2 Tvar vzorku

Tvar testovaného vzorku může ovlivnit rozložení sil v tělesu. Při měření na vzorcích z jádrových vrtů závisí pevnost materiálu na poměru výšky a průměru vzorku, přičemž klesá s rostoucím poměrem. Proto se doporučuje provádět měření na vzorcích o poměru výšky a průměru 2:1 nebo 3:1, kdy pevnost zůstává konstantní (blíže specifikováno u jednotlivých metod). U vzorků s větším poměrem může docházet k odchýlkám od skutečné pevnosti. (Özcan et al., 2019)

2.2.3 Anizotropie

Pojem anizotropie označuje rozdílné vlastnosti v závislosti na požadovaném směru. Anizotropie pevnosti často kopírují směry geologických anizotropií (například foliace) (ISRM, 1985). V takovém případě je žádoucí provést měření ve směru největší a nejmenší pevnosti (případně ve vertikálním směru uložení vrstev in situ).

2.2.4 Vlastnosti zatěžovacího zařízení

Tření styčných ploch

Hlavní příčinou tření na styčných plochách je zatěžování neryze vertikálního vzorku (jeho střednice není kolmá na podložku). Dále může vznikat zvýšeným (a nerovnoměrným) třením pístitnice o vnitřní stranu pouzdra. Řeší se údržbou zařízení (zařízení by mělo podstupovat pravidelný preventivní servis).

Rychlost zatěžování

Pokud testované těleso zatěžujeme příliš rychle, nedochází k rovnoměrnému vnitřnímu rozložení sil, a dochází tak k podhodnocení pevnosti materiálu (ZHAO et al. 1999).

2.2.5 Obsah vody

Voda může ovlivnit vzorek chemicky a fyzicky. Vzorky s vyšší vlhkostí a vyšším stupněm nasycení mají tendenci vykazovat nižší pevnost než jejich vysušené varianty. Testování by se mělo provádět za stejných podmínek (vzorky s přirozenou vlhkostí je nejsnadnější měřit), avšak musíme brát v potaz geologické podmínky in situ, technologii odběru vzorků a dle nich přizpůsobit testování (Zhou et al., 2016).

2.2.6 Teplota

Pevnost materiálu také závisí na jeho historii zahřívání (po vykrytalizování a prvotním vychladnutí). Když se materiál zahřívá, dochází k tepelnému praskání za vzniku mikrotrhlin, což snižuje pevnost materiálu. (Friedman, 1982).

2.3 Statistické zpracování měření

Jelikož provádíme výpočet z výběrového souboru dat na základě náhodně měřených hodnot, musíme stanovit směrodatnou chybu průměru. Ta vyjadřuje nepřesnost měření způsobenou měřeními na náhodně vybraných bodech. Směrodatnou chybu můžeme spočítat na základě následujícího vztahu:

$$\Delta = t_{\alpha}(n-1) * \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = t_{\alpha}(n-1) * \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

Kde Δ je směrodatná chyba, $t_{\alpha}(n-1)$ je tabulková kritické hodnoty studentova t-rozdělení, s^2 je rozptyl (střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty), n je počet měření, x_i je konkrétní měření a \bar{x} je průměr základního souboru. Hodnota $t_{\alpha}(n-1)$ se vybírá pro stupeň volnosti roven $n-1$ a spolehlivost $(1-\alpha)$ s jakou by při opětovném provedení pokusu průměr spadl do vypočteného intervalu (Anděl, 1978).

Výběr spolehlivosti závisí na subjektivním uvážení, pokud však chceme, aby náš výsledek co nejlépe odrážel realitu, volíme co nejvyšší spolehlivost. Běžně se používají spolehlivosti 0.90, 0.95 a 0.99. Ve výpočtu používáme studentovo rozdělení namísto rozdělení normálního, jelikož pracujeme s malým základním souborem a neznáme skutečnou směrodatnou odchylku. Kritické hodnoty studentova t-rozdělení významné

Stupeň volnosti	t _{0.90}	t _{0.95}	t _{0.99}
1	3.078	6.314	31.821
6	1.440	1.943	3.143
10	1.372	1.812	2.764
14	1.345	1.761	2.624
20	1.325	1.725	2.528
Inf.	1.282	1.645	2.326

Tabulka 3: kritické hodnoty studentova t-rozdělení (vytvořeno dle Chajdiak, et al., 1997)

pro statistické zpracování Schmidtovi pevnosti jsou uvedeny v tabulce 3. Výslednou hodnotu Schmidtovi pevnosti pak zapisujeme v následujícím tvaru (ojediněle se můžeme setkat i s intervalovým zápisem):

$$R = \bar{x} \pm \Delta$$

3. Metody zjištění pevnosti – přesnost, okrajové podmínky, využitelnost v praxi

Metody stanovení pevnosti lze rozdělit dle povahy měření na přímé a nepřímé. Přímé metody měří maximální napětí, při kterém dochází k porušení horniny. Nepřímé metody měří jiné fyzikální parametry, které se následně korelují s pevností v prostém tlaku. Běžně používané metody představím v následujícím textu.

3.1 Metoda Schmidtova kladiva

Metoda Schmidtova kladiva vznikla na přelomu 40. let minulého století pro stanovení pevnosti betonu v tlaku. Počátkem 60. let se začala uplatňovat i na určování kompresní pevnosti hornin (Karaman a Kesimal, 2015). Principiálně se jedná o indexovou nedestruktivní odrazovou metodu. Za její oblíbeností stojí především nedestruktivní charakter zkoušky, cena měření a jednoduchá manipulace se zařízením. Uplatnění Schmidtova kladiva však u měření pevnosti hornin nekončí – autoři uvádějí širokou škálu využití v geoinženýrské praxi od stanovení míry zvětrávání hornin (Karpuz, 1997; Karaman et al., 2011), výkonnosti výložníkových fréz (roadheaderu) a plnoprofilových razících štítů (TBM) (Poole, 1978; Bilgin et al., 1990), až po klasifikaci těžitelnosti skalního masivu (Karpuz, 1990).

Pro testování hornin se běžně používají Schmidtova kladiva typu N a T. Typ N (viz *obrázek 1*) o momentu síly 2.207 Nm není pro svoji vysokou energii úderu tolik citlivý na nehomogenitu, a nabízí tedy široké terénní použití. Typ L o momentu síly 0.735 Nm (Wang, 2019) nalézá uplatnění převážně u hornin s menší pevností, kde by při použití typu N hrozilo rozdrčení vzorku, a zároveň

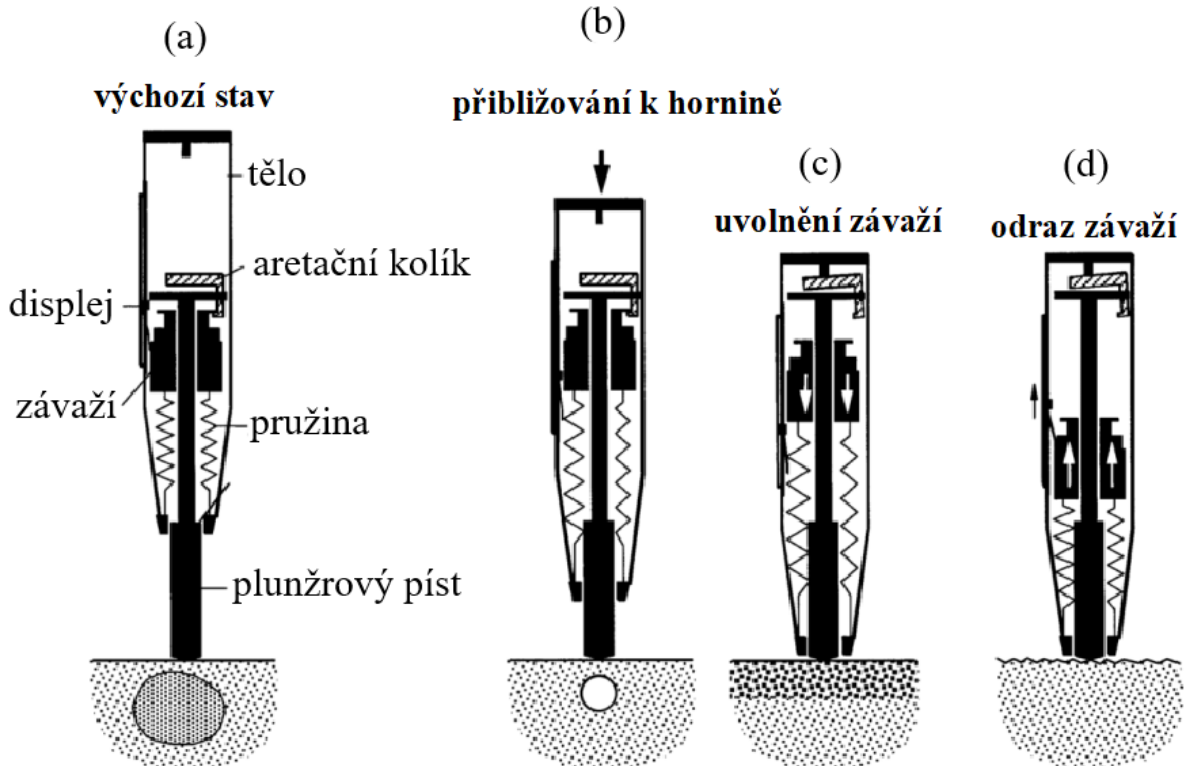


Obrázek 1: Schmidtovo kladivo typu N (vlastní)

pro tyto horniny nabízí vyšší přesnost výsledku (Aydin, 2009). Výrobce (Gilson company s.r.o.) uvádí, že kladiva typu N i L efektivně operují na vzorcích o pevnosti v rozmezí 20–150 MPa. Pro horniny s velmi vysokou pevností se používá Schmidtovo kladivo typu M o momentu síly 29.43 Nm (Janach a Merminod, 1982). Za zmínku stojí rovněž Schmidtovo kladivo typu P (kyvadlové kladivo), které se používá pro stanovení pevnosti povrchů s pevností nižší než 70 kPa (Saptono et al., 2013) – uplatnění nalézá spíše při měření pevnosti omítek ve stavitelství.

3.1.1 Popis zařízení

Zařízení se skládá ze závaží umístěného v kovovém ochranném pouzdře. Závaží je ze spodní strany připevněno na pružině (viz *obrázek 2*). Při zatlačení plunžrového pístu do těla Schmidtova kladiva se závaží zvedá za pomoci aretačního kolíku do horní části zařízení (*obrázek 2: poloha (b)*) a pružina tím získává potenciální energii. Po dosažení koncové polohy se aretační kolík automaticky odjistí a píst se uvede do pohybu po pevně stanovené trajektorii (*obrázek 2: poloha (c)*). Nárazem závaží do plunžrového pístu se mění směr pohybu, přičemž energie odrazu závisí na pevnosti zkoumaného materiálu (Basu, 2004). Při odrazu se část energie přetvoří na teplo a zvuk. Zbývající energie popisuje schopnost povrchu materiálu odolávat nárazům (Wang, 2019). Vlastnosti materiálu mají tedy vliv na charakter odrazu, což nás opravňuje k posuzování pevnosti horniny pomocí Schmidtova kladiva. Maximální odraz pístu se zaznamenává na analogové stupnici, popřípadě na digitálních displeji v rozmezí 10-100 (Basu, 2004). Nastavení zařízení do výchozí pozice zajišťuje horní pružina (na obrázku 1 není vyobrazena, aby nesnižovala čitelnost schématu). Odjistěním aretačního kolíku se uvolní, a vytlačí plunžrový píst ven z těla Schmidtova kladiva (*obrázek 2: přechod z polohy (d) do polohy (a)*).



Obrázek 2: popis Schmidtova kladiva (upraveno dle ACI, 2003)

3.1.2 Normalizace měření

Při vyhodnocování výstupu Schmidtova kladiva musíme brát v potaz působení gravitační síly na mechanické (hmotné) součástky zařízení. Při měření na stejném bodě za stejných podmínek, avšak s rozdílným náklonem aparátu, budeme měřit rozdílné hodnoty. Proto se zavádí tzv. normalizace měřené hodnoty. Pro měření v horizontálním směru platí následující vztah (Basu, 2004):

$$\frac{kx_1^2}{2} = \frac{MV_1^2}{2}$$

Levá strana rovnice vyjadřuje uvolněnou energii pružiny a pravá strana vyjadřuje kinetickou energii závaží na kontaktu s plunžrovým pístem, kde k je konstanta tuhosti pružiny a x_1 označuje její maximální natažení. M vyjadřuje hmotnost závaží a V_1 je jeho rychlost při dotyku s plunžrovým pístem. Stejný vztah lze aplikovat na energii maximálního odrazu pístu:

$$\frac{kx_2^2}{2} = \frac{MV_2^2}{2}$$

Přičemž levá strana vyjadřuje energii pružiny při maximálním odrazu a pravá strana vyjadřuje kinetickou energii závaží po odrazu od plunžrového pístu. Zde k opět označuje konstantu tuhosti pružiny a x_2 je její maximální natažení. V_2 je rychlost závaží po odrazu od plunžrového pístu a M jeho hmotnost. Řešením soustavy rovnic (1) a (2) (můžeme například substituuovat za konstantu tuhosti k) získáme:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

Podíl prodloužení pružiny vyjádřený v procentech se nazývá odrazové číslo (Basu, 2004).

$$R = \frac{x_2}{x_1} * 100$$

Pro měření s náklonem vzhledem k horizontální ose by platil podobný vztah. Moderní digitální Schmidtova kladiva ovšem provádí opravu na náklon zařízení automaticky, proto si zde vystačíme pouze s popisem nejjednoduššího případu (Basu, 2004).

3.1.3 Postup měření

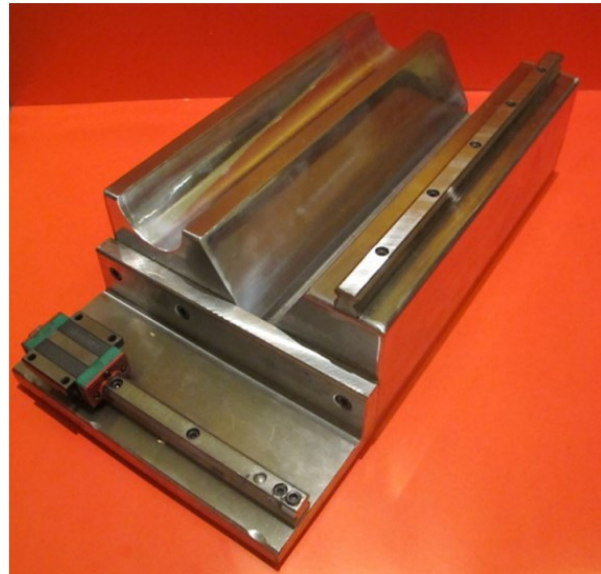
Testované subjekty povětšinou tvoří nehomogenní horniny. Pokud chceme, aby naše výsledky byly reprezentativní a charakterizovaly celou horninu, musíme provést více vzájemně nezávislých měření na několika různých bodech. Získáme tak několik různých hodnot pevnosti pro jedno testované těleso. Popisovat horninu několika pevnostmi však není velmi praktické, a proto se hodnoty statisticky zpracovávají. Výpočtem získáme tzv. Schmidtovu pevnost (bez jednotek) (Karaman, 2015).

Způsobů zpracování existuje v literatuře celá řada, nelze tedy tvrdit, že existuje pouze jeden správný postup stanovení. Mnohé zdroje se liší jak v počtu měření, tak i vyřazováním nekvalitních hodnot. Mezinárodní společnost pro mechaniku hornin (ISRM) doporučuje provést 20 měření, kde jsou body měření vzájemně vzdálené minimálně o průměr plunžrového pístu, 10 největších hodnot se následně zprůměruje (ISRM, 2007). Americká společnost pro testování a materiály (ASTM) zase doporučuje provést 10 nezávislých měření vzorku, kde jsou místa měření vzájemně vzdálená minimálně o průměr plunžrového pístu, přičemž se vyřadí měření, která se liší o 7 jednotek od průměru (ASTM, 2001).

Komparativní studie provedená Kadir Karamanem zaměřená na nalezení nejspolehlivější metody pro stanovení pevnosti v prostém tlaku vzájemně porovnává nejčastější postupy navržené ISMR, ASTM a nezávislou vědeckou obcí s vlastními postupy. Na základě statistického zpracování dat z měření na 47 různých horninových vzorcích dospěl k závěru, že nejspolehlivější postup měření je jeho vlastní, kde se provádí 6 měření vzdálených alespoň o průměr plunžrového pístu a následně se zprůměrují. Pro 22 vzorků (47 % celkového počtu vzorků) byla procentuální chyba od skutečné hodnoty (měřené pomocí UCT) menší než 10 %, zatímco pro metodu navrženou ISMR byla chyba menší než 10 % pouze pro 17 vzorků (36 % celkového počtu vzorků). Vzhledem k tomu, že metoda dosahuje vyšších přesností a zároveň je méně časově náročná, lze ji tedy považovat za vhodnější (Karaman, 2015).

3.1.4 Faktory ovlivňující měření

Aby se dal pokus považovat za opakovatelný (tedy aby při opakování pokusu vycházely stejné hodnoty), musíme zajistit stabilitu vzorku při jeho testování. Pokud bychom například prováděli měření Schmidovým kladivem na skalním masivu dostaneme výrazně odlišné hodnoty oproti měření vrtného jádra ze stejného masivu volně umístěného na stole se sklonem 45° měřidla od horizontální roviny. V případě skalního masivu tedy žádnou úpravu neprovádíme. Vzorky, které může Schmidovo kladivo uvést do pohybu, musíme umístit do speciální úchytné podložky o standardizovaných parametrech dle ISRM (délka x šířka x výška [cm] 35x20x10, 60 kg). Měření následně provádíme s libovolným sklonem podložce (Rahimi, 2022).



Obrázek 3: podložka určená pro měření Schmidovým kladivem na jádrech (převzato od Rahimi, 2022)

3.1.5 Korelace s pevností v prostém tlaku

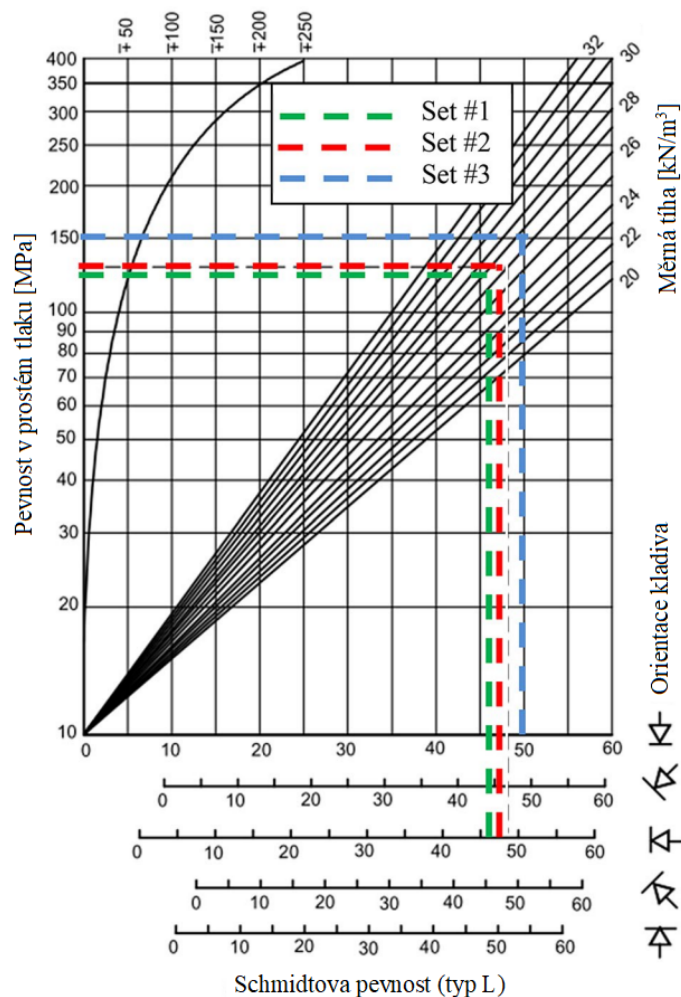
Metoda Schmidova kladiva představuje nepřímou metodou, naměřené hodnoty Schmidovi pevnosti tedy sami o sobě nemají vypovídající informaci o hornině (krajně při relativním posuzování dvou Schmidových pevností). Význam nabývá až korelací s pevností v prostém tlaku získanou z jednoosé tlakové zkoušky. Korelační metody se s rozšířením informačních technologií neustále zdokonalují. V rané fázi se vycházelo z komparace experimentálních dat získaných z jednoosé tlakové zkoušky a metody Schmidova kladiva na stejných vzorcích (Aufmuth, 1973). Při dostatku pokusů bylo možné vytvořit tzv. převodní grafy viz graf 2, ze kterých lze odhadnout pevnost hornin v tlaku. Vystupuje v nich objemová tíha γ testované horniny, pokud ji neznáme, použijeme průměrnou hodnotu 27 kN/m³. Objemovou tíhu lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\gamma = \frac{m}{V} * g \quad (6)$$

Kde m [kg] vyjadřuje hmotnost a V [m³] označuje objem testovaného vzorku horniny a g [m/s²] místní tíhové zrychlení.

Před nástupem informačních technologií se závislost mezi pevností v prostém tlaku a indexovými zkouškami často vyjadřovala pomocí lineární závislosti. S postupným nárůstem dat z vícera měření se dospělo k závěru, že závislost nelze vyjádřit jednoduchou lineární závislostí vypočtenou pomocí metody nejmenších čtverců. Dnes se na zpracování dat často podílí výpočetní modely jako Fuzzy control system, umělá neuronová síť či hybridní algoritmy (Wang, 2020), které tolerují nepřesné, nespolehlivé či aproximované vstupní hodnoty. S jejich nástupem se přesnost odhadů výrazně zpřesnila. Umožnila to nejen jejich schopnost pracovat s nepřesnými daty, ale také možnost začlenit do výpočtu další parametry jako například suchou hustotu či nadzvukovou rychlost p-vln. Pro použití v inženýrskogeologické praxi však nejsou vhodné a stále se běžně používají lineární modely, které pro obor nabízejí dostatečnou přesnost (Wang, 2019).

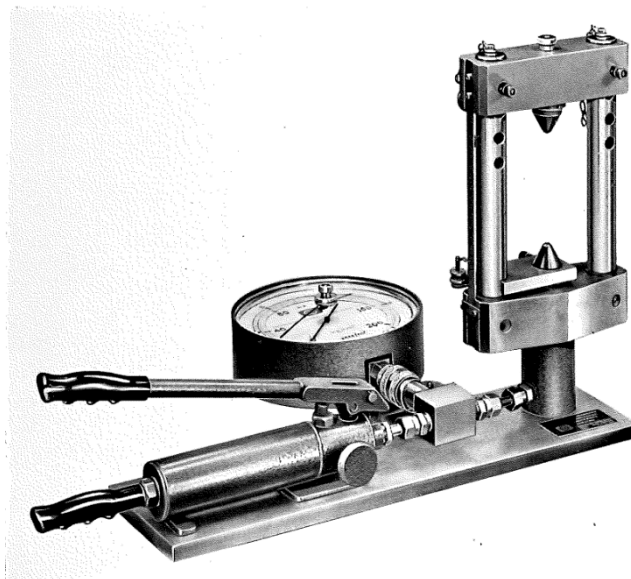
Výpočet pevnosti v prostém tlaku si demonstrujeme na odhadovém grafu poskytnutým Bartonem a Choubeyem (Barton a Choubey, 1977) viz *graf 2*. Pokud chceme určit pevnost v prostém tlaku, musíme znát Schmidovu pevnost R a případně i objemovou tíhu γ . Při experimentu byla měrná tíha vzorků stanovena na 27.1 kN/m^3 (Sari, 2019), což lze při grafickém stanovení určení pevnosti vztáhnout na polopřímku charakterizující vzorky o měrné tíze 27 kN/m^3 . K určení budeme hledat funkční hodnoty pro $R_1 = \bar{x} - \Delta$ a pro $R_2 = \bar{x} + \Delta$. Zjistíme tak krajní meze intervalu jednoosé pevnosti v tlaku pro daný vzorek.



Graf 2: převodní graf (upraveno dle Sari, 2019)

3.2 Zkouška bodového zatížení

Zkouška bodového zatížení patří k indexovým metodám. Přímé metody zjištění pevnosti v prostém tlaku, jako je jednoosá tlaková zkouška, jsou časově náročné na přípravu vzorků, a tudíž nejsou vhodné k rychlému stanovení v terénu. Proto zavádíme tzv. indexové metody (výsledkem zkoušky je hodnota indexu, kterou následně korelujeme s pevností získanou z jednoosé tlakové zkoušky) sloužící k rychlému a levnému testování vzorků v terénu i laboratoři. Metodu jako první představil Broch a

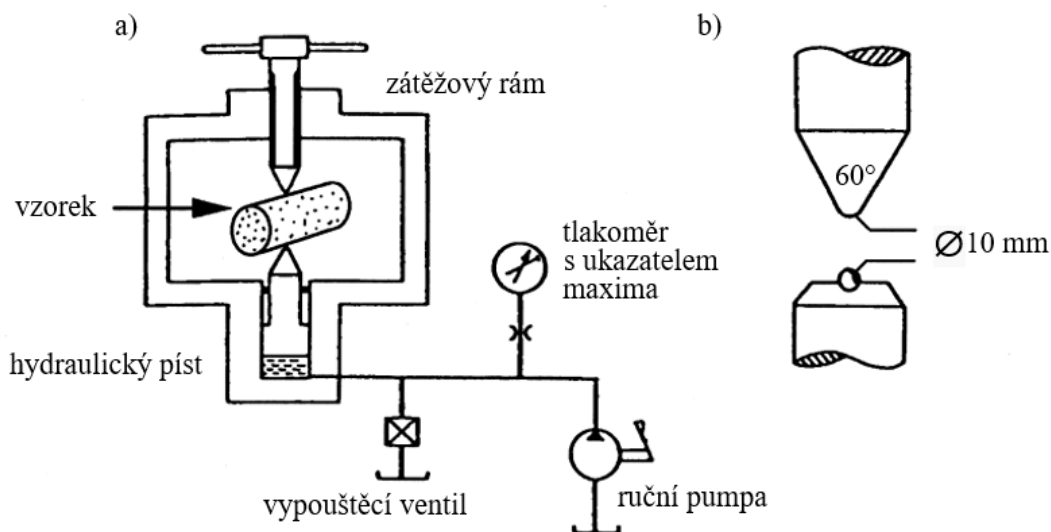


Obrázek 4: aparatura zkoušky bodového zatížení (převzato od Broch a Franklin, 1972)

Franklin v roce 1972 (Broch a Franklin, 1972), v roce 1985 pak byla standardizována Mezinárodní společností pro mechaniku hornin (ISRM) (Basu a Kamran, 2010).

3.2.1 Popis zařízení

Podobnost aparatury bodového zatížení a jednoosé tlakové zkoušky je na první pohled zřejmý, liší se však v detailech, které mají podstatný vliv na princip zkoušky. Styčné plochy jsou opatřeny o kónické kužely o známé geometrii a tvrdosti. Protilehlé strany kuželů z pravidla uzavírají úhly 60° a jejich hroty tvoří koule o poloměru 5 mm, přičemž přechod mezi kužely a koulemi by měl být hladký (tangenciální). Aparatura se skládá ze zatěžovací části a části měřící



Obrázek 5: a) schéma aparatury pro zkoušku bodového zatížení a b) zatěžovací hroty (upraveno dle Hudson, 1993)

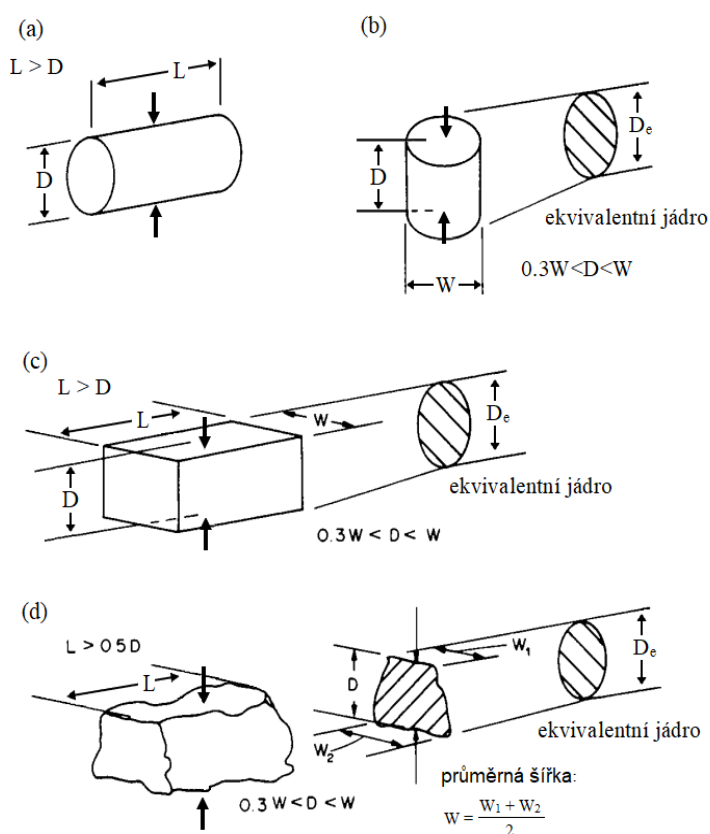
zatížení. Zatěžovací část se skládá z rámu ostrojeného dvěma tyčemi s kuželovými hroty. Jeden je stacionární a druhý je hydraulickým pístem. Konstrukci zařízení povětšinou doplňuje úchylkoměr pro snazší měření horizontální velikosti vzorku. Tření mezi hroty a vzorkem by mělo být minimální, aby se předešlo ovlivnění měření. Dále není žádoucí, aby konstrukce byla poddajná vzorku, tedy, že střednice (křivka těžišť všech vodorovných průřezů) pístů musí být přímková, jinak by mohlo docházet k nepřesnostem měření (Broch a Franklin, 1972).

3.2.2 Postup měření

Měření můžeme provádět na horninových jádrech, na horninových blocích i na nepravidelných úlomcích. Postupy uchycení vzorků mezi sousedí kužely se liší v závislosti na jejich tvaru. Pro každý typ uchycení se také specifikují unikátní parametry vzorku. V následujících oddílech se budeme zabývat postupy různých podtypů zkoušky.

a) Horizontální zkouška

Pevnost testovaného vzorku nezávisí na délce L , za předpokladu, že poměr délky L a průměru D (viz obrázek 6: (a)) je větší než 1. Pro dostatečnou přesnost měření se doporučuje zkoušku opakovat alespoň 10krát (v případě anizotropních či heterogenních vzorků i více) (ISRM, 1985). Při samotné zkoušce se jádrový vzorek uchytí do aparatury na průměru tak, aby byl uchycen právě v polovině délky (L) vzorku. Následně se provede přesné měření vzdálenosti mezi hroty kuželů (D), jehož hodnotu budeme potřebovat při výpočtu indexu bodového zatížení. Při zkoušce se vzorek cyklicky zatěžuje (tedy že po každém přitížení se čeká, zdali nedojde k porušení), dokud nedojde k porušení (standartně se doporučuje časový interval 10 až 60 sekund (ISRM, 1985)). Proces opakujeme, dokud nedosáhneme dostatečného množství platných měření.



Obrázek 6: požadavky na rozměr vzorku: a) horizontální zkouška, b) vertikální zkouška, c) bloková zkouška a d) zkouška na nepravidelném vzorku (upraveno dle ISRM, 1985)

b) Vertikální zkouška

Jádra o poměru délky D a průměru W nabývající hodnot 0.3 až 1.0 (viz *obrázek 6: (b)*) jsou vhodná pro vertikální zkoušku. Pokud poměr přesahuje hodnotu 1.0 lze zvážit použití horizontální zkoušky, či zkrácení vzorku (řezáním nebo štípáním). Postup měření se do jisté míry podobá horizontální zkoušce. V případě izotropní horniny se vzorek uchycuje za středy základů válce a v případě anizotropní horniny se vzorek uchycuje za body průniku vertikální osy procházející těžištěm a pláštěm vzorku. Následně se změří vzdálenost mezi hroty kuželů D . Vzorek se cyklicky zatěžuje stejně jako při horizontální zkoušce. Měření opakujeme, dokud nezískáme 10 platných měření (pro anizotropní a heterogenní vzorky i více) (ISRM, 1985).

c) Bloková zkouška a zkouška na nepravidelném vzorku

Vstupní požadavek pro provedení platné zkoušky jsou rozměry testovaného tělesa. Všechny ortogonální velikosti musí mít rozměr 15 až 85 mm. Poměr výšky D a šířky W (viz *obrázek 6: (c, d)*) by měl spadat do intervalu od 0.3 do 1.0 (ideální vzorky se číselně přibližují k 1.0 (ISRM, 1985). Délka vzorku L by měla být alespoň dvojnásobná šířce W . Uchycení vzorky do aparatury může být v případě nepravidelného vzorku výzvou, vzorek se snažíme upnout v bodech co nejvzdálenějších od okrajů vzorku. Dále změříme výšku D a šířku W (pokud se šířky horní a spodní podstavy číselně nerovnaj, použijte aritmetický průměr). Vzorek opět cyklicky zatěžujeme jako při horizontální a vertikální zkoušce. Postup opakujeme, dokud nedosáhneme 10 platných měření.

3.2.3 Měření na anizotropních horninách

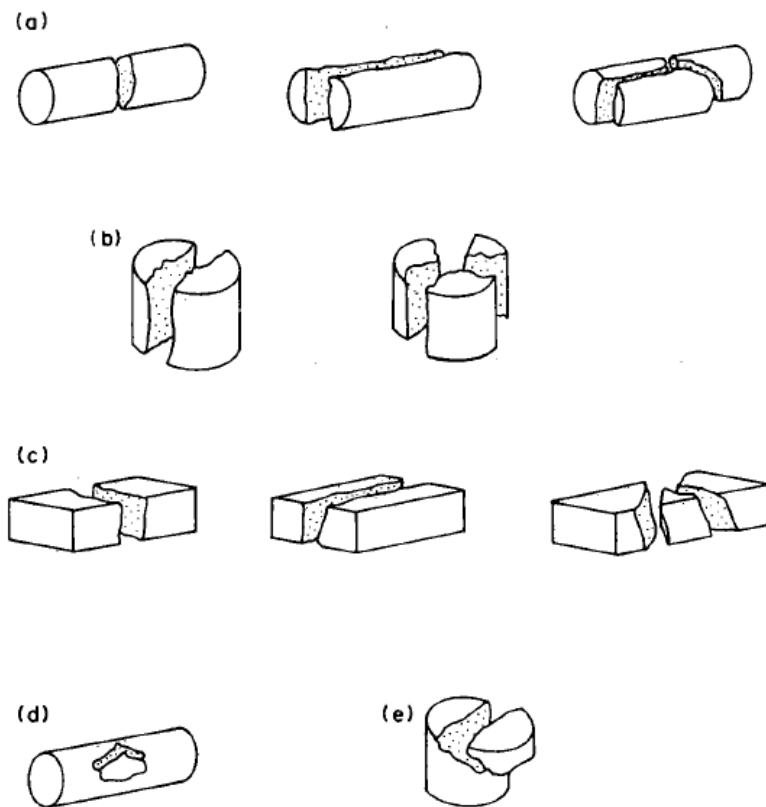
Kvalitu každé metody reflektuje její výpovědní hodnota. V případě měření na anizotropních horninách by pevnost pouze v jednom směru nereflektovala skutečnost, že pevnost v jiném směru může být řádově jiná. Proto se při zkouškách na anizotropních vzorcích z pravidla provádí měření ve směru největší a nejmenší pevnosti. Dále zavádíme index anizotropie bodového zatížení jako poměr největší pevnosti ku pevnosti nejmenší. Horninu můžeme považovat za izotropní, pokud se hodnota indexu anizotropie blíží 1. Pokud dosahuje hodnot vyšších než 1, je anizotropní (lze využít spíše k porovnání jednotlivých vzorků než ke kvantifikaci anizotropie) (Broch a Franklin, 1972).

3.2.4 Faktory ovlivňují měření

Mimo anizotropii má majoritní vliv na zatížení při porušení pouze saturace vzorku vodou. Po saturaci vzorku vodou může pevnost klesnout až o 33% původní hodnoty (Broch a Franklin, 1972).

3.2.5 Vyřazení neplatných měření

Vhodné rozměry vzorku lze ověřit předvídatelným vzorcem rozrušení vzorku. Pokud se rozrušuje jinak, než predikujeme, musíme pokus považovat za neplatný a měření vyřadit. *Obrázek 7* ukazuje platné (a, b c) a neplatné (d, e) pokusy. Pokud si nejsme zcela jistí, do které kategorie vzniklé rozrušení patří, zpravidla vzorek považujeme za neplatný (pokud tedy máme k dispozici dostatečný počet testovacích vzorků).



Obrázek 7: typické vzory porušení platných a neplatných zkoušek: a) platná horizontální zkouška, b) platná vertikální zkouška, c) platná bloková zkouška; d) neplatná horizontální zkouška; e) neplatná vertikální zkouška (upraveno dle ISRM, 1985)

3.2.6 Index bodového zatížení

Index bodového zatížení je bezrozměrná veličina a lze ji spočítat pomocí následujícího vztahu:

$$I = \frac{P}{D_e^2}$$

Kde P je zatížení při porušení vzorku (odlišné od pevnosti v prostém tlaku) v MPa a D_e je ekvivalentní průměr jádra v milimetrech. Pro horizontální zkoušku platí $D_e = D$ (obrázek 6: (a)) a pro vertikální zkoušku, blokovou zkoušku a zkoušku na nepravidelném vzorku platí $D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}}$ (obrázek 6: (b, c, d)) (ISRM, 1985). Vypočtené indexy z každého měření statisticky zpracujeme viz kapitolu 3.1.4 Statistické zpracování měření.

3.2.7 Oprava na velikost

Index pevnosti bodového zatížení (I) je závislý na parametru D , proto se zavádí tzv. oprava na velikost. Všechna měření se normují tak, aby odpovídala horizontální zkoušce na vzorku o průměru 50 mm. V případě horizontální zkoušky není nutné provádět opravu na velikost (opravou zvyšujeme pouze přesnost měření), ale u ostatních typů zkoušek nesmíme tento krok opomenout. Oprava se provádí vynesemím závislosti zatížení při selhání P na D^2 . Závislost následně zlogaritmujeme, získáme tak lineární vztah mezi P a D^2 . Nyní můžeme provést lineární regresi a přečíst funkční hodnotu v $D^2=2500 \text{ mm}^2$, čímž získáme hodnotu zatížení při selhání P pro vzorek o průměru 50 mm. Při výpočtu indexu pevnosti bodového zatížení postupujeme jako v případě horizontální zkoušky. V případě nedostatečného množství měření můžeme použít korelační faktor velikosti F (ISRM, 1985):

$$I_{50} = I * F$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$$

kde I_{50} je index bodového zatížení pro vzorek o průměru 50 mm, F je korelační faktor velikosti a D_e je ekvivalentní průměr definovaný typem použité metody. Pro horizontální zkoušku platí:

$$D_e = D$$

Pro vertikální, blokovou a zkoušku na nepravidelném vzorku platí (ISRM, 1985):

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}}$$

3.2.8 Korelace indexu bodového zatížení s pevností v prostém tlaku

Mezi indexem bodového zatížení a pevností v prostém tlaku doposud neexistuje jednoznačně definovatelná fyzikální spojitost. Zavádí se různé korelace podle, kterých však lze přibližnou hodnotu odhadnout. Nejčastěji se korelace indexu bodového zatížení s pevností v prostém tlaku uvádí v následujícím tvaru (Broch a Franklin, 1972):

$$\sigma_c = 23.7 * I_{50}$$

Při výpočtu pevnosti v prostém tlaku z indexu bodového zatížení je však nutné volit výpočetní vztah na základě typu testované horniny. Ucelený přehled uvádí například Sair Kahraman ve studii s názvem „*The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load index*“ (Kahraman, 2005). Na území České republiky doporučuje studie „*Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rocks from the Strength Index*“ (Šancer et al., 2022) používat následující vztahu (pro poměr výšky a průměru 1:1):

$$\sigma_c = 19.1 * I_{50}$$

$$\sigma_c = 22.1 * I_{50}$$

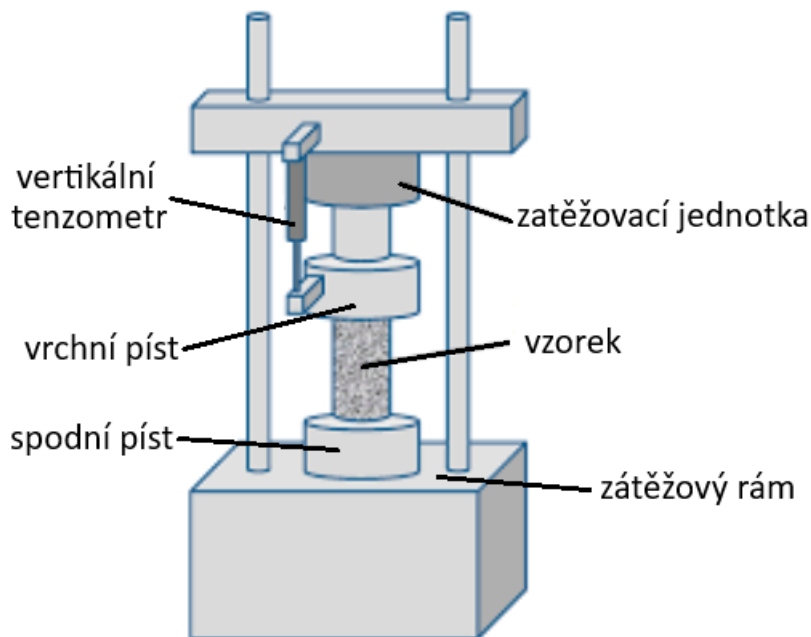
Přičemž první vztah se používá pro vyhodnocení horizontální zkoušky a druhý vztah pro vertikální. Autoři dále doporučují výpočetní vztahy pro určité regiony České republiky (Šancer et al., 2022).

3.3 Jednoosá tlaková zkouška

Jednoosá tlaková zkouška patří mezi celosvětově uznávané metody stanovení pevnosti v prostém tlaku. Valná většina metod určená k zjištění pevnosti se koreluje právě s jednoosou tlakovou zkouškou. Pevnosti hornin dosahují korelací vlastního měření se zkouškou v jednoosém tlaku. Výhoda metody spočívá ve schopnosti vystihnout charakter celého vzorku a její jednoduchost vyhodnocení.

3.3.1 Popis zařízení

Aparatura používaná pro měření jednoosého tlaku využívá principu Pascalova zákona, přičemž se měří tlak hydraulického oleje při překonání pevnosti vzorku. Zařízení se skládá z pevného rámu vybaveného sousými písty. Kontaktní plochy pístů jsou vzájemně rovnoběžné. V případě, že chceme znát i hodnotu Youngova modulu pružnosti a Poissonovu konstantu, použijeme navíc horizontální a vertikální tenzometry (ASTM, 2023).



Obrázek 8: aparatura jednoosé tlakové zkoušky (upraveno dle Isah, et al., 2020)

3.3.2 Postup měření

Jádrový vzorek umístíme mezi kontaktní plochy pístů a ujistíme se, že kontaktní plochy pístů dokonale dosedají na podstavy vzorku. Zapnutím přístroje podrobíme vzorek kontinuálnímu napětí. Stroj se automaticky vypne při překonání pevnosti vzorku a hodnotu napětí zaznamená. (ASTM, 2023).

3.3.3 Předpoklady pro tvar vzorku

Měření se provádí na jádrových vzorcích o známých rozměrech, přičemž délka vzorku by měla odpovídat dvojnásobku jeho průměru (ASTM, 2023). Plášť vzorku by měl být hladký a bez značných nepravidelností. Podstavy vzorku musí být vzájemně rovnoběžné, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení síly.

3.3.4 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

LVDT je přídavné zařízení měřící horizontální relativní deformaci vzorku. Jedná se o uskupení vzájemně kolmých měřidel (počet jednotlivých uskupení závisí na výšce vzorku). Používá se v případech, kdy chceme znát i Poissonovu konstantu materiálu. (Isah, et al., 2020)

3.3.5 Vyhodnocení měření a určení pevnosti

Při vyhodnocování potřebujeme znát plochu podstavy vzorku a maximální dosažené napětí při zkoušce. Pevnost materiálu v prostém vypočítáme pomocí následující vzorce (ASTM, 2023):

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A} = \frac{4(F_{max})}{\pi d^2}$$

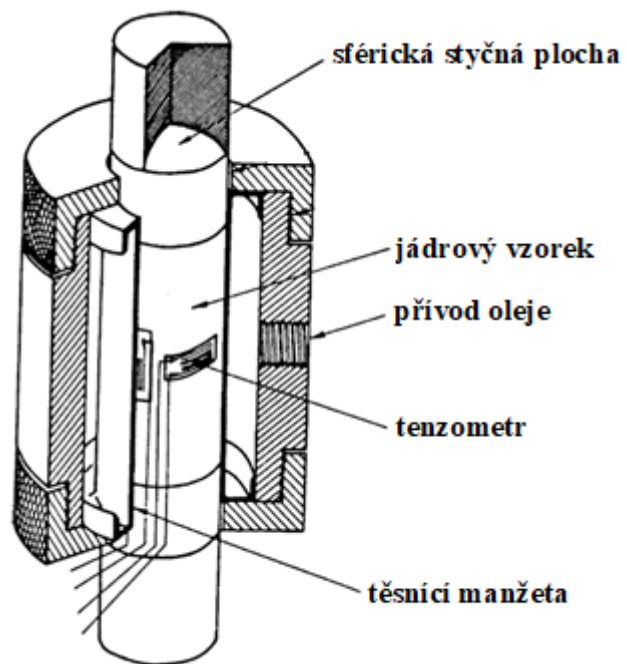
Kde σ_c označuje pevnost v prostém tlaku, F_{max} označuje zatížení při porušení horniny a A obsah podstavy vzorku.

3.4 Triaxiální zkouška

V některých situacích se vyžaduje, aby parametry charakterizující horninu odpovídaly podmínkám, ve kterých se přirozeně nachází. Příkladem mohou být horniny v povrchových (dosahujících hloubek 1 km) a hlubinných dolech (dosahujících hloubek až 4 km). Vliv radiálního napětí může zvýšit pevnost horniny 3 až 5krát (Hoek, 2007). Triaxiální zkouška simuluje podmínky in situ působením radiálního napětí na plášť vzorku. Provedení je však oproti jednoosé tlakové zkoušce technicky i časově náročnější. Před vybráním vhodné zkoušky je tedy vždy zapotřebí určit, pro jaké účely byla zvolena. Triaxiální zkouška nesplňuje podmínku prostého tlaku (viz kapitolu 2.), můžeme však ze změřených dat pevnost v prostém tlaku stanovit.

3.4.1 Popis zařízení

Aparatura se skládá ze zatěžovací jednotky jako u jednoosé tlakové zkoušky (viz obrázek 8) doplněné o Hoekovu triaxiální buňku (viz obrázek 9). Zatěžovací jednotka vyvíjí jednoosé zatížení na vzorek horniny, zatímco Hoekova buňka zatížení radiální. Buňku se skládá z ocelového těla vyplněného gumovou manžetou sloužící jako měch. Dovoluje nám aplikovat radiální napětí na horninový vzorek. Vstupní otvor měchu tvoří závit (resp. hydraulická přípojka) určený pro připojení hydraulické hadice. Jelikož se zařízení používá i při terénních měřeních (velmi



Obrázek 9: Hoekova triaxiální buňka (upraveno dle Hoek. a Franklin, 1968)

zřídka), kdy není možné docílit rovnoběžnosti podstav horninového jádra, jsou styčné plochy opatřeny o kulové zakončení, aby se dosáhlo rovnoměrného rozložení síly přes celé podstavy vzorku (Alsayed, 2002). V laboratorních podmínkách se lze setkat i s plochým zakončením, čímž se ale zvyšuje nárok na dokonalý vzorek.

3.4.2 Postup měření

Zkouška by měla být provedena co nejdříve po získání horninového vzorku z vrtu, aby se zamezilo změně jeho parametrů způsobených změnou tlaku. K popsání pevnosti horniny s narůstajícím radiálním napětím způsobeným nadložními horninami je zapotřebí provést alespoň 3 triaxiální zkoušek s rozdílným radiálním napětím (vycházíme z předpokladu, že obálka pevnosti není lineární).

Nejprve umístíme měch do ocelového těla a zajistíme ho, následně je možné vložit vzorek s připojenými tenzometry. Na podstavu vzorku se následně umístí sférické styčné plochy a celá Hoekova buňka se vloží do zatěžovací jednotky a provede se zkouška. Pokud provádíme více zkoušek po sobě, není nutné pokaždé vyjímat gumovou manžetu – pokud tedy nedojde k rozdrčení vzorku (Hoek. a Franklin, 1968).

3.4.3 Hoek-brownovo kritérium selhání

Analýza změřených dat probíhá pomocí empirických vztahů založených na dlouhodobém pozorování. V literatuře lze najít značné množství výpočetních vztahů (Bieniawski, 1974). Každý má své specifické určení, a proto by mělo být kritérium zvoleno s důrazem na účel použití. Pro detailnější přehled o kritériích doporučuji studii provedenou Mahetajimem a Brahmanem, která popisuje jejich specifické využití (Mahetaji a Brahma, 2024). K zjištění pevnosti v prostém tlaku můžeme použít například Hoek-brownovo kritérium selhání, které patří společně s Mohr-Coulombovým a Griffithovým kritériem selhání k obecně nejpoužívanějším. Vyjadřujeme ho následujícím vztahem (Hoek a Brown, 2019):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c * \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha$$

Kde m_i vyjadřuje efekt diskontinuit; α konstantu křivosti obálky, s konstantu charakterizující stav horniny, σ_1 normálové napětí; σ_3 radiální napětí; σ_c pevnost v prostém tlaku; Pro jednoduchost si předvedeme vyhodnocení na neporušené hornině. Předpokládáme, že pro neporušenou horninu se $\alpha = 0.5$ a $s = 1$ (Hoek a Brown, 2019). Dosazením hodnot do rovnice zle získat zjednodušený tvar rovnice v následujícím změnění:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = m_i * \sigma_c * \sigma_3 + \sigma_c^2$$

Při vyhodnocování vynášíme druhou mocninu rozdílu normálového a radiálního napětí na vertikální osu a radiální napětí na osu horizontální. Následně použijeme lineární regresi k nalezení přímky nejlépe popisující soubor dat (lze provést v aplikaci Excel, R, MATLAB atd.). Výslednou rovnici přímky v parametrickém tvaru ($y=kx+q$) porovnáme s rovnicí pro neporušenou horninu následujícím způsobem (Martin et al., 2020):

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

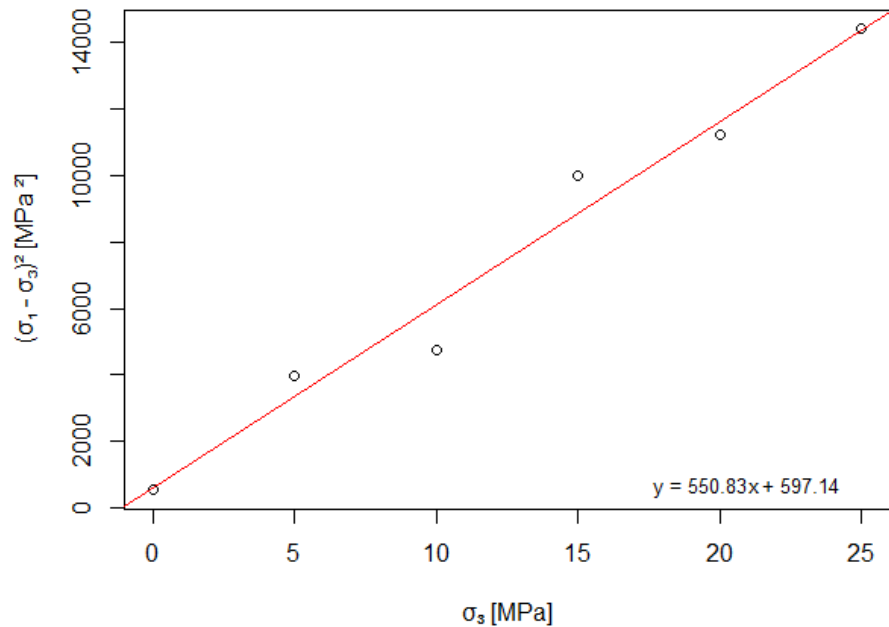
$$k = m_i \sigma_c$$

$$x = \sigma_3$$

$$\sigma_c^2 = q$$

Pevnost v prostém tlaku lze tedy vyjádřit jako odmocninu z posunu na ose y:

$$\sigma_c = \sqrt{q}$$



Graf 3: Hoek-Brownovo kritérium selhání (vlastní)

Při vyhodnocování je důležité mít na paměti, že závislost popisuje pevnost neporušené horniny (Hoek a Brown, 1980). Při většině aplikací si vystačíme s pevností v prostém tlaku, avšak při výstavbě technologicky náročnějších staveb musíme brát v potaz i triaxiální pevnost v tlaku.

3.5 Geofyzikální metody

Pokud z jakýchkoli důvodů nemůžeme zájmovou oblast narušit geologickými metodami nebo se nachází pod nedostupným terénem (respektive výstavbou), nabízí se použít alternativní nedestruktivní metody. Na základě dat získaných z geofyzikálních měření lze vypočítat pevnost v prostém tlaku pomocí lineárních korelačních vztahů (Nourani et al., 2017; Kahraman a Yeken, 2010). S pevností v prostém tlaku lze korelovat měření získané většinou geofyzikálních metod (s předpokladem, že existuje vyhovující korelační vztah) (Kumar a Mahto, 2013).

Pevnost v prostém tlaku zjištěná korelací s geofyzikálními veličinami bývá často v geoinženýrské praxi přehlížena. Údajně z důvodu nejednoznačnosti a příliš velkých chyb skutečné pevnosti. Nepřesnost spočívá především v nedostatku studií zabývajících se odvozováním korelačních vztahů pro různé druhy hornin. Stejně tvrzení bychom mohli prohlásit i o přesnosti Metody Schmidtova kladiva či zkoušky bodového zatížení, jelikož však existuje dostatečné množství dat, lze je považovat za věrohodné. Tvrzení můžeme například podpořit standardizací ISRM (ISRM, 1985). Geofyzikální měření lze tedy označit jako metody s vysokým potenciálem stát se věrohodnými v souvislosti s nepřímým měřením pevnosti.

Nižší přesnost geofyzikálních metod spočívá především v dalším rozšíření pracovního postupu. Nahromaděním malých chyb mohou vznikat významné chyby podepisující se na výsledné pevnosti. V porovnání s postupem jednoosé tlakové zkoušky, do které vstupuje vzorek s normou daným rozměr, následným měřením a dosazením do jednoduchého vztahu s přímým fyzikálním významem (Cylwik et al., 2023) jsou podmínky provedení geofyzikálních metod výrazně horší. Můžeme tedy polemizovat, zdali je použití metod odůvodněné.

V této kapitole se zaměříme pouze na nejvýznamnější metody v kontextu s pevností v prostém tlaku. Velké množství studií se věnuje především ultrazvukovému měření a geoelektrickým metodám. Ultrazvukové měření pramení z měření pevnosti betonu a je tedy široce používané i mimo geoinženýrské kruhy. Zvýšený zájem je také o geoelektrické metody (Kahraman a Yeken, 2010; Matusinović et al., 2004). Na seismickými metodami se neobjevuje příliš mnoho studií, i když mají velmi obdobný princip jako ultrazvukové měření. Magnetometrie postrádá jakékoli studie korelující magnetické veličiny s pevností v prostém tlaku. Radiometrie a gravimetrie nemá žádné věrohodné studie zabývajících se korelací s pevností. Karotážní metody mohou využívat principů výše uvedených metod. studie navrhuující korelaci pevnosti s daty ze spektrometrie, porozity a hustoty horniny mi nepřipadají tolik relevantní pro zařazení do seznamu metod.

3.5.1 Geoelektrické metody

Metodu demonstrujeme na odporovém měření. To se dá provádět jak v laboratoři, tak v terénu. Hodnocení v laboratoři se provádí na jádrových vzorcích. Při měření se vzorek zapojí do elektrického obvodu (viz *obrázek 10*), tak, aby sloužil jako vodič. Před provedením zkoušky změříme vzdálenost podstav d a vypočítáme obsah podstav A . Při zkoušce měříme napětí V a proud I . Pevnost v prostém tlaku narůstá společně se zvyšujícím se měrným odporem horniny (Bilim, et al., 2002). Vzorky s vysokou pórovitostí sytíme roztokem s obsahem iontů, který zajišťuje propojení vodivých struktur, zamezíme tak vznikutí chyb měření (Kahraman a Yeken, 2010). K zjištění pevnosti na základě korelace používáme měrný (specifický) odpor. Ten lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$\rho = \frac{R * A}{d}$$

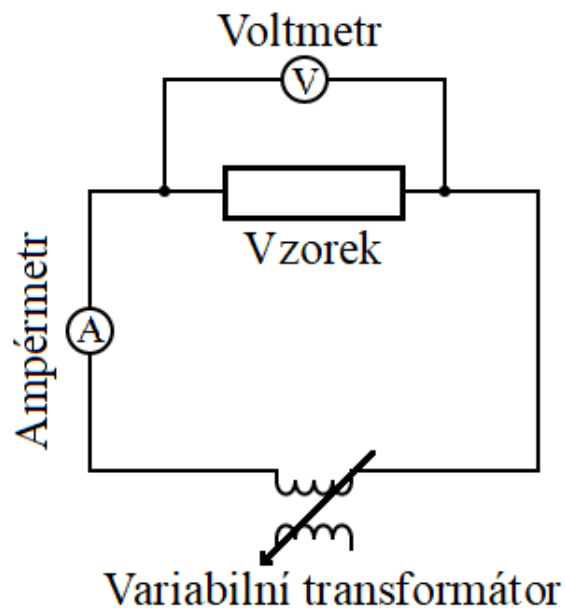
Kde ρ představuje měrný odpor v Ωm , R elektrický odpor (celé elektrické komponenty) v Ω , A obsah podstavy v m^2 a d vzdálenost podstav v m. Vzorec dále upravíme dle Ohmova zákona tak, aby v něm vystupovaly pouze známé proměnné:

$$\rho = \frac{V * A}{I * d}$$

Kahraman a Yeken například doporučují korelační vztah pro vyvřelé horniny (Kahraman a Yeken, 2010):

$$\sigma_c = 0.081\rho + 58.28$$

Při měření v terénu se známý průřez A a vzdálenost elektrod d nahrazuje konstantou k charakteristickou pro jednotlivé konfigurace elektrod. Korelace pak opět nastává pomocí empirických vztahů. Nevýhoda měření v terénu spočívá v nejasném charakteru horniny (a tedy výběru korelačního vztahu), měření tak musí kombinovat s další geofyzikální metodou pro přesnější určení typu horniny.



Obrázek 10: elektrický odvod pro měření elektrických parametrů horniny (vytvořeno podle (Kamaei, et al., 2019))

3.5.2 Ultrazvukové měření

Princip metody je založen na rychlosti šíření p-vln napříč tělesem. V případě měření na horninách se provádí především v laboratořích na vzorcích s dvěma rovnoběžnými stranami. Přičemž se na ně umísťují ocelové desky uzpůsobené k lepšímu přijímání/odrážení vln, alternativně ISMR doporučuje vyhlazení povrchů jemným brusným papírem (ISRM, 2014). Existuje více způsobů zapojení a měřených veličin. V případě většího zájmu o metodu doporučuji si přečíst článek navrhovaných metod ISRM - (Aydin, 2014). Měříme vzdálenost rovnoběžných ploch a čas příchodu vln (vzdálenost je konstantní). Pokud se některá vlna v daném průřezu vrátí dříve než v jiném bodě, lze to interpretovat jako nehomogenitu (Honarvara a Varvani-Farahani, 2020). V případě, že se vlna vrátí dvakrát, znamená to, že se nachází částečně nacházíme nad výdutí (v komplikovanějších systémech můžeme očekávat i více návratů). Opakováním postupu můžeme vymezit přesnou polohu a tvar výdutě (nutno provést měření z více směrů). Rychlost šíření lze vypočítat dle následujícího vztahu (pro případ kde máme na jedné rovnoběžné ploše vysílač a na druhé přijímač) (Yilmaz et al., 2014):

$$v = \frac{d}{t}$$

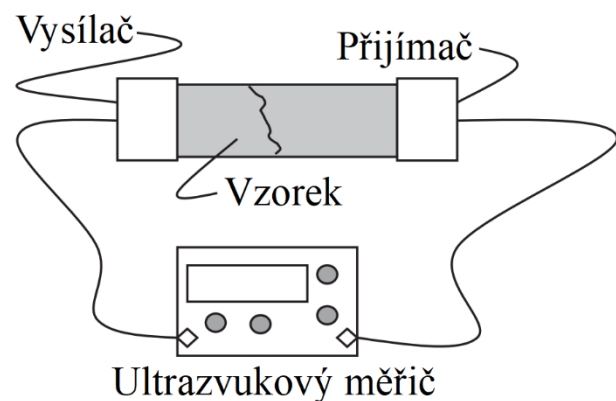
Kde v označuje rychlost šíření vln, d vzdálenost stran a t čas. Pokud zvolíme zapojení s přijímačem a vysílačem na stejné ploše, pak se dráha zdvojnásobí:

$$v = \frac{2d}{t}$$

Korelace s pevností v prostém tlaku probíhá na základě empirických vztahů. Inoue a Ohomi například uvádí následující vztah pro horniny s nízkou pevností (Inoue a Ohomi, 1981):

$$\sigma_c = k\rho V_p^2 + A$$

Kde k představuje objemový modul pružnosti, ρ hustotu horniny, V_p rychlost p-vln, A obsah podstavy vzorku. Opět bych rád zdůraznil, že korelační vztahy bychom měli používat s důrazem na testovaný soubor vzorků, z kterého byly vytvořeny.



Obrázek 11: zapojení ultrazvukového měřidla (upraveno dle Yasar a Edogan, 2004)

3.5.3 Seismický průzkum

Seismický průzkum do značné míry odpovídá ultrazvukovému měření. Liší se v dosahu propagace vln a způsobem jejich vytvoření. V laboratorním prostředí se nepoužívá kvůli přítomnosti věrohodnějších metod stanovení pevnosti v prostém tlaku. Ve zkoumání pevnosti hornin ve větších rozměrech však nemá konkurenci.

Postup měření si demonstrujeme na jednoduchém 2D prostředí s horizontálními rozhraními o dvou homogenních vrstvách. Předpokládáme, že rychlost šíření vln je v horní vrstvě nižší než ve vrstvě spodní (Lowrie, 2007). V prvním kroku si vytyčíme profil, na který rozmístíme geofony se stejným rozestupem (není podmínkou).

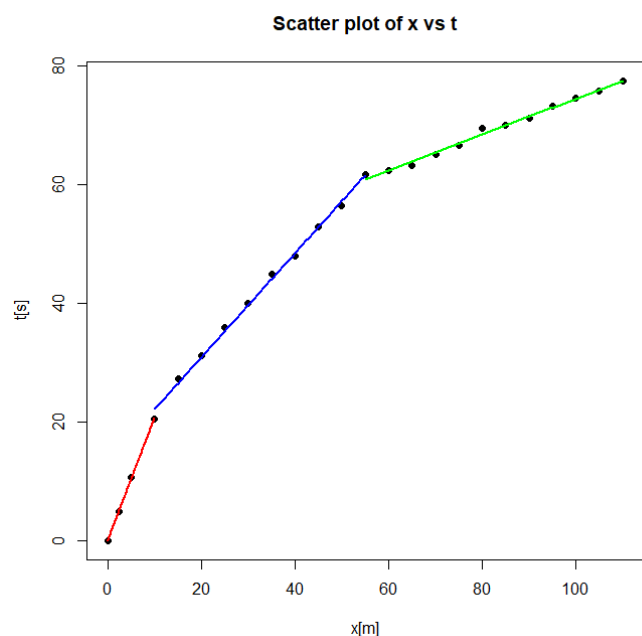
Dále zvolíme seismický zdroj dle potřebného dosahu (například pomocí úderu kladiva do kovové podložky). Výsledkem měření je závislost časů příchodu na poloze geofonů.

Změřená data následně zpracujeme graficky na základě směrnic jednotlivých přímk. První úsek označuje přímou vlnu (v grafu 4 červená úsečka), vyjadřuje rychlost šíření v přízemní vrstvě. Pro zjištění rychlostí nás však zajímají pouze směrnice hodochron lomených vln (v grafu 4 modrá a zelená úsečka). Rychlost p-vln lze vypočítat jako převrácenou hodnotu jejich směrnic (rychlost vyjde v km/s) (Lowrie, 2007).

Z této konfigurace dále můžeme vypočítat například hloubky rozhraní a kritický úhel, pro naše účely si však vystačíme pouze s rychlostí p-vln.

Awang a kolektiv uvádějí pro korelaci pevnosti v prostém tlaku břidlic následující vztah (pro zjištění typu horniny musíme použít další metody) (Awang et al., 2017):

$$\sigma_c = 0.0098 * v_p + 6.7382$$



Graf 4: grafické zpracování hodochron (vlastní)

3.6 Polní stanovení pevnosti v prostém tlaku

Polní stanovení pevnosti hornin v terénu vyžaduje minimální vybavení a přípravu vzorků. Samotné měření je však velmi subjektivní, proto by ho měl vždy provádět stejný pracovník (Kuře, 2012). Z důvodu neopakovatelnosti měření se metodu doporučuje používat pouze v krajní nouzi, kdy nelze provést jiné zkoušky. Princip metody vychází z normy ČSN EN ISO 14689-1 (721005) (účinné od května 2018). Norma přiřazuje horninám vlastnosti na základě jejich pevnosti (viz *tabulku 1*). Alternativně lze v České republice použít normu ČSN P 73 1005.

3.6.1 Postup měření

Ke zkoušce je zapotřebí pouze geologické kladivo a podložka určená k zamezení jeho pohybu. Jako podložku lze použít pytel vyrobený z pevné textilie odolné proti mechanickému poškození vyplněný pískem a rozměrech 30 x 20 cm (Kuře, 2012). Vzorek může být libovolného tvaru, musíme však brát v potaz, že pevnost hornin závisí na velikosti vzorku (viz *kapitolu 2.3.1*).

Na podložku umístíme vzorek horniny tak, aby ho úder kladivem neuváděly do rotačního pohybu. Další postup závisí na individuálním posouzení testované horniny. Pokud se na první pohled jedná o středně pevnou až extrémně pevnou horninu, použijeme geologické kladivo. Do vzorku tlučeme normovanými údery (každý úder kladiva by měl být stejný jako ten předešlý – vztahuje se i na zkoušky na dalších vzorcích) dokud se nerozbije. Na základě počtu úderů a aktuálním stavu horniny můžeme vzorek zařadit do jedné z kategorií (viz *tabulku 1*). Obdobný postup aplikujeme i v případě kdy se jedná o extrémně měkkou až středně pevnou horninu (Kuře, 2012).

3.6.2 Faktory ovlivňující měření

Horniny o větších rozměrech vykazují větší pevnosti než horniny stejného typu menších rozměrů. Navzdory nezávislosti pevnosti na velikosti vzorku se jedná o limitující faktor této zkoušky. Chybu lze minimalizovat vybíráním relativně stejně velkých vzorků. Dalším ovlivňujícím faktorem je břidličnatost, kolmo na foliace vykazuje hornina větší pevnost než ve směru rovnoběžném podél (Kuře, 2012). V tomto případě bych doporučil provádět nezávislá měření v obou směrech (podobně jako u zkoušky bodového zatížení), popřípadě metodu vůbec nepoužívat na břidličnaté vzorky.

4. Přesnost a interpretace metod

Výběr vhodné metody pro měření pevnosti vychází z požadavků na přesnost, čas provádění, cenu a schopnosti odebrat kvalitní vzorky. Znat přesnost jednotlivých metod se může hodit v případě, kdy nemáme k dispozici vybrané metody a musíme volit metodu jinou. Vzájemné porovnání přesnosti jednotlivých metod se nachází v závěru práce (viz *kapitolu 5.*).

Jednoosá tlaková zkouška

Nejpřesnější metoda s přímým fyzikálním významem a jednoznačným postupem vyhodnocení i měření, které navíc charakterizuje celý testovaný vzorek. Pokud chceme zjistit co nejreálnější hodnotu pevnosti v prostém tlaku, jednoosá tlaková zkouška se jeví jako jasný favorit. Nepřesnost měření může vznikat na základě výběru vzorku, který by dle normy měl být bez diskontinuit. Změřená pevnost pak přímo nereflektuje skutečné geologické prostředí s výskytem diskontinuit.

Zkouška bodového zatížení

Zkouška bodového zatížení nemá jednoznačný postup přepočtu indexu bodového zatížení na pevnost v prostém tlaku. Pokud k vyhodnocení použijeme odlišné empirické vzorce (viz *kapitolu 3.2.8*), můžeme dosáhnout rozdílných pevností až o větší desítky MPa. Proto bych vždy před dosazením do empirického vzorce doporučil porovnat zkoušenou horninu s horninou použitou ve studii poskytující vztah. Pro použití metody na území České republiky se nabízí použít výsledky studie zkoumající právě české území (Šancer et al., 2022). Další omezující faktor zkoušky spočívá v minimálním rozložení působící síly uvnitř vzorku, na rozdíl od jednoosé tlakové zkoušky tato síla neovlivňuje celé těleso a může tak dojít k zásadnímu zkreslení pevnosti na základě lokální diskontinuity.

Metoda Schmidtova kladiva

Podobně jako u zkoušky bodového zatížení, ani metoda Schmidtova kladiva nemá jednoznačnou korelaci s pevností v prostém tlaku. Přičemž při měření menších pevností vzniká menší rozptyl hodnot než při měření pevností vyšších (vycházíme z korelačního vztahu). Tudiž bych metodu doporučil používat spíše na méně pevné horniny. Dále se i liší samotné vyhodnocení měření (počet měření, vyřazování hodnot, vzdálenost jednotlivých bodů měření). Metoda má téměř nulový hloubkový dosah – tedy určuje pevnost pouze na povrchu vzorku/skalního bloku. Nelze tedy zaručit, že měření správně určí charakter celého vzorku. Další omezení nastává při měření na méně pevných horninách, kdy dochází k rozdrčení hornin, a tedy k neplatnému měření.

Polní stanovení pevnosti

Pomocí polního stanovení lze určit pouze interval, v kterém se pevnost horniny s největší pravděpodobností nachází. Pokud se hornina svojí pevností nachází na pomezí dvou pevnostních tříd, měli bychom horninu zařadit do obou tříd, čímž se interval pevnosti ještě více rozšíří. Další problém metody spočívá v její neopakovatelnosti, jeli prováděna jinou osobou, ba dokonce stejným operátorem. Každý si přitom slovní definice v normě může vyložit vlastním způsobem – například silný úder kladivem.

Geofyzikální metody

Přesnost geofyzikálních metod v terénu je zpochybnitelná. Spočívá především v komplikovanosti postupu metod a nedostatku korelačních vztahů pro jednotlivé typy prostředí. Přesnosti laboratorních zkoušek jsou relativně přesné, avšak poměrně zbytečné. Pokud se nacházíme v laboratoři skalních hornin, pravděpodobně máme k dispozici i hydraulický lis pro provedení jednoosé tlakové zkoušky či zkoušky bodového zatížení. Nerad bych tím zpochybnil jejich důležitost při vyhodnocování ostatních parametrů hornin, ale pro stanovení pevnosti v prostém tlaku existují příhodnější metody.

Triaxiální zkouška

Metoda se pro rutinní použití v praxi jeví příliš náročná, a to jak po stránce nároků na vzorek, komplikovanosti zařízení i výběru vhodného kritéria selhání. V případě vhodného použití však přináší stěžejní pohled na chování horniny v různých podmínkách.

5. Závěr

Výběr vhodné metody pro zjištění pevnosti v tlaku závisí na několika zcela odlišných faktorech. Nejdůležitějším faktorem je účel, pro který danou pevnost potřebujeme. Jedná-li se o výstavbu se zvýšeným důrazem na bezpečnost, jako jsou liniové struktury či přehradní hráze. V takovém případě bych doporučoval provánět výhradně jednoosé a triaxiální zkoušky z důvodu jejich vysoké spolehlivosti a nezávislosti na předešlých měřeních k vytvoření korelačních vztahů (při výstavbě podzemních struktur se dále běžně používají geofyzikální metody pro predikci vlastností hornin v doposud nedosažených oblastech (Cardarelli et al., 2003)).

Při méně důležitých projektech je možné používat i metody závislé na korelačních vztazích jako doplnění menšího počtu zkoušek jednoosých. Nepřímé metody bychom však měli používat s obezřetností. Mezi autory neexistuje shoda v jednotném korelačním vztahu. Největší přesnosti dosahují na konkrétních geologických jednotkách, kde došlo k porovnání výsledků zkoušky se zkouškou jednoosou. Nejvhodnější postup měření by se tedy měl skládat z provedení jednoosých tlakových zkoušek a následným odvozením vlastního vztahu pro následné zjednodušení měření. Tento postup je však z časových důvodů v praxi zcela nepoužitelný.

Dalším limitujícím faktorem může být rozsah měřené pevnosti. Ultrazvukové měření a metoda Schmidtova kladiva nelze provádět na velmi měkkých horninách. Zkouška bodového zatížení nelze provádět pouze na extrémně měkkých horninách (viz kapitolu 2.1) (Xie et al., 2024). Při volbě metody musíme také zohlednit čas provedení zkoušky. Metody s vysokými požadavky na kvalitu vzorku jsou většinou časově náročnější než metody bez nich. Musíme však brát v potaz možné odchylky od skutečné pevnosti v důsledku provedení expresních metod.

Počet provedených zkoušek vždy závisí na rozsahu zkoumaného území a také na komplikovanosti geologického prostředí. Nelze tedy přímo doporučit počet zkoušek zajišťující dostatečnou přesnost. Můžeme se pouze řídit doporučením legislativy, ta však nebere v potaz konkrétní případy komplikovanosti prostředí.

V běžných případech bych se tedy omezil pouze na použití jednoosé tlakové zkoušky, metody Schmidtova kladiva a zkoušky bodového zatížení. V krajních situacích, kdy potřebujeme detailnější charakter prostředí, či potřebujeme zmapovat větší území, lze použít i další metody zmiňované v textu. Zkoušku polního stanovení bych doporučil pouze v krajních situacích, kdy nemáme k dispozici jiné expresní nástroje (Schmidtovo kladivo či aparaturu bodového zatížení). Zjištěnou pevnost bych však bral pouze jako orientační a trval bych na následném přehodnocení.

6. Seznam literatury

ACI, 2003, ACI 228.1R-03, *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. 44

ALSAYED, M.I., 2002, Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 39, s. 355–366

ANDĚL, J. *Matematická statistika*. 2. vydání. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, Alfa, vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatury, 1985

ASTM, 2001, 04.09 (D 5873-00), Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method

ASTM. D7012-23, 2023, *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*

AUFMUTH, E. R., 1973, A systematic determination of engineering criteria for rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 11, s. 235–245

AWANG, H., AHMAD RASHIDI, N. R., YUSOF, M. a MOHAMMAD, K., 2017, Correlation Between P-wave Velocity and Strength Index for Shale to Predict Uniaxial Compressive Strength Value. *MATEC Web of Conferences*. 103. Dostupné z: doi.org/10.1051/mateconf/201710307017

AYDIN, A., 2009, ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 46(3), s. 627–634. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.020

AYDIN, A., 2014, Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 47, s. 255–259

BARTON, N. R. a CHOUBEY, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 10(1–2), s. 1–54. Dostupné z: doi.org/10.1007/BF01261801

BASU, A. a AYDIN, A., 2004, A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 41(7), s. 1211–1214. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.05.001

BASU, A. a KAMRAN, M., 2010, Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 47, s. 823–828. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.04.006

BIENIAWSKI, Z. T., 1968, The Effect of Specimen Size on Compressive Strength of Coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 5, s. 325–335

BIENIAWSKI, Z.T., 1974, Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*., s. 312–320

BILGIN, N., SEYREK, T. a SHAHRIAR, 1990, K. Roadheaders glean valuable tips for Istanbul metro tunnels. *Tunnelling*. s. 29–32

- BILIM, N., OZKAN, I. a GOKAY, M. K., 2002, Proceedings of the seventh regional rock mechanical symposium. s. 121-127
- BROCH, E. a FRANKLIN, J.A. 1972, The Point-Load Strength Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 9, s. 669–697. Dostupné z: doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7
- CARDARELLI, E., MARRONE, C. a ORLANDO, L., 2003, Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*. 52, s. 93–102
- CYLWIK, S., KILLIAN, J. R. a CICCHINI, P. F., 2023, A Practical Nonlinear Strength Criterion for Rock Masses and Other Geological Materials. *Proceedings of the Rocscience International Conference*. Dostupné z: doi.org/10.2991/978-94-6463-258-3_63
- ČSN EN ISO 14689-1 (721005), *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování, popis a klasifikace hornin*. ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI, 04/2018
- ČSN P 73 1005, *Inženýrskogeologický průzkum*. ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI, 11/2016.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J., 2021, *Fyzika – Svazek 1*. VUTIUM, ISBN 978-80-214-4123-1
- HOEK, E. a FRANKLIN, J.A., 1968, Simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy journal*. 77, s. 22-26
- HOEK, E., 2007, *Practical Rock Engineering*. Online. Rocscience. Dostupné z: amser.org/g6219/f4. [cit. 2024-07-25]
- HOEK, E. a BROWN, E.T., 2019, The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 11(3), s. 445-463
- HONARVARA, F. a VARVANI-FARAHANIB, A., 2020, A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*. 108
- Hudson J.A., 1993, Rock properties, testing methods and site characterisation. In: Hudson J. A., Brown E. T., Fairhurst C., Hoek senior E., *Comprehensive rock engineering principles, practice and projects*. 3. Pergamon Press, 46-51. ISBN 9780080420660
- CHAJDIAK, J., UBLÍKOVÁ, E. a GUDÁBA, M., 1997, *Štatistické metódy v praxi*. 2. vydání. Bratislava: STATIS, ISBN 80-85659-08-5
- INOUE, M. a OHOMI, M., 1981 Relation Between Uniaxial Compressive Strength And Elastic Wave Velocity of Soft Rock. *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*. s. 9–13
- ISAH, B.W., MOHAMAD, H., AHMAD, N.R., HARAHAP, I.S.H. a AL-BARED, M.A.M., 2020, Uniaxial compression test of rocks: Review of strainmeasuring instruments. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 476. Dostupné z: doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012039
- ISRM, 1985, Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstract*. 22(2), s. 51-60

- ISRM, 2007, *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. Kompilovali: ULUSAY, R. a HUDSON, J. A., Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, ISBN 978-975-93675-4-1
- JANACH, W. a MERMINOD, A., 1982, Rock Abrasivity Test with a Modified Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 19(1), s. 43-45.
- KAHRAMAN, S., GUNAYDIN, O. a FENER, M., 2005, The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 42, s. 584–589. Dostupné z: doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2005.02.004
- KAHRAMAN, S. a YEKEN, T., 2010, Electrical resistivity measurement to predict uniaxial compressive and tensile strength of igneous rocks. *Bulletin of Materials Science*. 33(6), s. 731-735. Dostupné z: doi.org/10.1007/s12034-011-0137-x
- KARAMAN, K., CIHANGIR, F., ERCIKDI, B. a KESIMAL, 2011, A weathering classification of limestone based on water absorption percent by weight. *Turkish Journal of Geosciences*. 24(2), s. 119–128
- KARAMAN, K. a KESIMAL, A., 2015, A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 74, s. 507–520
- KARPUZ, C., 1990, A classification system for excavation of surface coal measures. *Mining Science and Technology*. 11, s. 157–163
- KARPUZ, C. a PAŞAMEHMETOĞLU, A. G., 1997, Field characterisation of weathered Ankara andesites. *Engineering Geology*. 46, s. 1-17
- KAMAEI, E., MANSHAD, A. K., SHADIZADEH, S. R., ALI, J. A. a KESHAVARZ, 2019, A. Effect of the wettability alteration on the cementation factor of carbonate rocks using Henna extract. *Materialia*. 8. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100440
- KUMAR, S. a MAHTO, D., 2013, Recent Trends In Industrial And Other Engineering Applications Of Non Destructive Testing: A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 4(9)
- KUŘE, T., 2012, *Polní stanovení pevnosti v prostém tlaku hornin podle ČSN EN ISO 14689-1, RNDr. Jan Král*. Bakalářská práce. Praha: Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky
- LOWRIE, W., 2007, *Fundamentals of Geophysics*. Online. Cambridge University Press, ISBN 9780511807107. [cit. 2024-07-26]
- MAHETAJI, M. a BRAHMA, J., 2024, A critical review of rock failure Criteria: A scope of Machine learning approach. *Engineering Failure Analysis*. 159. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107998
- MARTIN, S.; FEDRIZZI, F.; BOAGA, J.; CENNI, N.; AGNINI, C. et al., 2020 Paleo-Seismicity in the Euganean Hills Province (Northeast Italy): Constraints From Geomechanical

and Geophysical Tests in the Schio-Vicenza Fault Area. *Frontiers in Earth Science*. 8. Dostupné z: doi.org/10.3389/feart.2020.586897

MATUSINOVIĆ, T., KURAJICA, S. a ŠIPUŠIĆ, J., 2004, The correlation between compressive strength and ultrasonic parameters of calcium aluminate cement materials. *Cement and Concrete Research*. 34, s. 1451–1457

NOURANI, M. H., MOGHADDER, M. T. a SAFARI, M., 2017, Classification and assessment of rock mass parameters in Choghart iron mine using P-wave velocity. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 9(2), s. 318-328

ÖZCAN, N. T.; ÖZCAN, N. T. a KALENDER, A., 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(8)

POOLE, R. W. a FARMER, I. W., 1978, Geotechnical factors affecting tunnelling machine performance in Coal Measures rock. *Tunnels and Tunnelling*. s. 27-30

RAHIMI, M. R., MOHAMMADI, S. D. a BEYDOKHTI, A. T., 2022, Correlation between Schmidt Hammer Hardness, Strength Properties and Mineral Compositions of Sulfate Rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*. 40, s. 545-574

SAPTONO, S.; KRAMADIBRATA, S. a SULISTIANTO, B., 2013, Using the schmidt hammer on rock mass characteristic in sedimentary rock at tutupan coal mine. *Procedia Earth and Planetary Science*. 6, s. 390–395. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.051

SARI, M., 2019, Stability analysis of cut slopes using empirical, kin-ematical, numerical and limit equilibrium methods: case of old Jeddah-Mecca road (Saudi Arabia). *Environmental Earth Sciences*. 78(21), s. 621. Dostupné z: doi.org/10.1007/s12665-019-8573-9

ŠANCER, J., ŠIROKÝ, T. a KRENŽEL, V., 2022, Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rocks from the Strength Index. *GeoScience Engineering*. 68(2), s. 158-166. Dostupné z: doi.org/10.35180/gse-2022-0078

WANG, M. a WAN, W., 2019, A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 123. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104094

WANG, M.; WAN, W. a ZHAO, Y., 2020, Prediction of the uniaxial compressive strength of rocks from simple index tests using a randomforest predictive model. *Comptes Rendus Mecanique*. 348(1), s. 3–32

WEIBULL, W., 1951, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*.

XIE, W., LIU, X., ZHANG, X., LIU, Q. a WANG, E., 2024, A review of test methods for uniaxial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.003

YASAR, E. a ERDOGAN, Y., 2004, Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41(5), s. 871-875. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.012

YILMAZ, T., ERCIKDI, B., KARAMAN, K. a KÜLEKÇI, G., 2014, Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test. *Ultrasonics*. 54(5), s. 1386-1394

ZHAO, J., LI, H.B., WU, M.B. a LI, T.J., 1999, Dynamic uniaxial compression tests on a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 36, s. 273-277

ZHOU, Z., CAI, X., ZHAO, Y., CHEN, L., XIONG, C. et al., 2016, Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 26(7), s. 1919-1925

7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schmidtovo kladivo typu N (vlastní)

Obrázek 2: popis Schmidtova kladiva

Obrázek 3: podložka určená pro měření Schmidtovým kladivem na jádrech

Obrázek 4: aparatura zkoušky bodového zatížení

Obrázek 5: a) schéma aparatury pro zkoušku bodového zatížení a b) zatěžovací hroty

Obrázek 6: požadavky na rozměr vzorku: a) horizontální zkouška, b) vertikální zkouška, c) bloková zkouška a d) zkouška na nepravidelném vzorku

Obrázek 7: typické vzory porušení platných a neplatných zkoušek: a) platná horizontální zkouška, b) platná vertikální zkouška, c) platná bloková zkouška; d) neplatná horizontální zkouška; e) neplatná vertikální zkouška

Obrázek 8: aparatura jednoosé tlakové zkoušky

Obrázek 9: Hoekova triaxiální buňka

Obrázek 10: elektrický obvod pro měření elektrických parametrů hornin

Obrázek 11: zapojení ultrazvukového měřidla

8. Seznam tabulek

Tabulka 1: zatřídění hornin podle pevnosti (ČSN EN ISO 14689 (721005))

Tabulka 2: inženýrskogeologický průzkum (ČSN P 73 1005)

Tabulka 3: kritické hodnoty studentova t-rozdělení

9. Seznam grafů

Veškeré vlastní grafy byly vytvořené v programu R.

Graf 1: závislost přetvoření na napětí granitu (vlastní)

Graf 2: převodní graf

Graf 3: Hoek-Brownovo kritérium selhání (vlastní)

Graf 4: grafické zpracování hodochron (vlastní)