

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geotechnologie



**Natálie Šilínková**

**Koeficient drsnosti diskontinuit JRC a subjektivita při jeho stanovení**  
Joint Roughness Coefficient JRC and Subjectivity in its Determination

Typ závěrečné práce:

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Mgr. Jakub Roháč, Ph.D.

Praha, 2025

## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 23.7. 2025

Natálie Šilínková

## Poděkování

Ráda bych poděkovala všem, kteří mě během psaní této práce podporovali a podíleli se na jejím vzniku. Především děkuji vedoucímu práce Mgr. Jakubovi Roháčovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost během konzultací a pomoci při realizaci studie a práci se vzorky. Dále děkuji Mgr. Jiřímu Routovi za jeho cenné připomínky a doporučení. Děkuji odborníkům z firem a institucí: SG Geotechnika a.s., státní instituce Česká geologická služba, PUDIS a.s., INSET s.r.o., GeoTec-GS a.s., 3G Consulting Engineers s.r.o., kteří se účastnili průzkumu. Dále děkuji studentům a zaměstnancům z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy z Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky a odborníkům z 13. konference Svahové deformace a pseudokras 2025, že se zúčastnili studie publikované v této práci. Všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na vzniku této práce, upřímně děkuji.

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Vývoj JRC v souvislostech .....	2
3. Metody určování JRC .....	13
3.1. Smykové zkoušky ( <i>shear tests</i> ).....	13
3.1.1. Přímé smykové zkoušky ( <i>direct shear tests</i> ) .....	14
3.1.2. Náklonové zkoušky ( <i>tilt tests</i> ).....	18
3.1.3. Tažné zkoušky ( <i>push – pull tests</i> ).....	20
3.2. Kontaktní metody měření a vizuálního určení JRC .....	22
3.2.1. Metoda amplitudy a rovné hrany ( <i>Straight edge method</i> ) .....	23
3.2.2. Profilovací hřeben .....	28
3.2.3. Profilometry .....	29
3.2.4. Vizuální metoda porovnání profilů dle Bartona a Choubeyho (1977).....	30
3.3. Bezkontaktní metody .....	33
3.3.1. Optické metody .....	33
4. Vlivy na hodnoty JRC.....	34
4.1. Vliv měřítka ( <i>scale effect</i> ).....	34
4.1.1. Intervaly vzorkování .....	38
4.2. Anizotropie.....	42
5. Studie subjektivity určení JRC v praxi .....	45
5.1. Předchozí studie .....	46
5.2. Vlastní studie subjektivity vizuálního určování JRC .....	47
5.2.1. Metodika .....	47
5.2.2. Vzorky.....	50
5.2.3. Výsledky studie.....	54
5.2.4. Vlastní měření a výsledky .....	61
6. Diskuse.....	63
7. Závěr .....	68
Použitá literatura .....	69

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá koeficientem drsnosti diskontinuit (*Joint Roughness Coefficient*, JRC), který je jedním z klíčových parametrů při hodnocení smykové pevnosti horninových diskontinuit a tím i stability horninového masivu. Práce obsahuje přehled vývoje konceptu JRC, metod jeho stanovení a faktorů ovlivňujících jeho hodnoty, se zvláštním důrazem na problematiku subjektivity při použití vizuální metody podle Bartona a Choubeyho (1977). Důkladná rešerše metod určování JRC obsahuje příklady použití těchto metod v praxi.

Součástí práce je praktická studie, v níž 85 respondentů hodnotilo JRC na pěti reálných horninových vzorcích podél vyznačených profilů. Jedná se o první známou studii, která zkoumá subjektivitu určování JRC přímo na skutečných vzorcích, nikoli pouze na vykreslených profilech.

Výsledky potvrdily značnou míru subjektivity vizuální metody a byly porovnány se závěry obdobných studií, se kterými jsou výsledky studie v této práci v souladu. Na základě výsledků jsou navržena doporučení pro přesnější určování JRC v inženýrskogeologické praxi, přičemž jako nejvhodnější metoda byla doporučena modifikovaná metoda amplitudy a přímé hrany.

Závěrem je navržen směr dalšího výzkumu, který by se měl zaměřit na bezkontaktní metody stanovení JRC a jejich uplatnění v terénních podmínkách.

# Abstrakt

This bachelor thesis focuses on the Joint Roughness Coefficient (JRC), a key parameter in evaluating the shear strength of rock discontinuities and, consequently, the stability of rock masses. The thesis provides an overview of the development of the JRC concept, methods for its determination, and factors influencing its values, with special attention given to the subjectivity issues associated with the visual method proposed by Barton and Choubey (1977). A thorough review of JRC determination methods includes examples of their practical application.

The practical part of the thesis involves a study in which 85 respondents evaluated the JRC on five real rock samples along marked profiles. This is the first known study to investigate the subjectivity of JRC determination directly on actual rock samples rather than on drawn profiles.

The results confirmed a high degree of subjectivity in the visual method and were compared with the conclusions of similar studies, with which the findings of this thesis are in agreement. Based on the results, recommendations are proposed to improve the accuracy of JRC determination in engineering geological practice, with the modified amplitude and straight edge method being recommended as the most suitable.

Finally, a direction for future research is proposed, focusing on contactless methods for determining JRC and their application in field conditions.

# 1. Úvod

Téměř všechny horninové masivy blízko zemského povrchu jsou protkány puklinovými systémy, které řídí smykovou pevnost, stabilitu, propustnost a další inženýrskogeologické vlastnosti horninového masivu. Koeficient drsnosti diskontinuit JRC (*Joint Roughness Coefficient*) představuje empirické zhodnocení drsnosti povrchů horninových diskontinuit. Drsnost na diskontinuitě řídí její smykovou pevnost, která má hlavní vliv na stabilitu a pevnost horninového masivu. Proto koeficient drsnosti diskontinuit, dále pouze JRC, je jedním z nejdůležitějších parametrů při hodnocení smykové pevnosti na diskontinuitách, zvláště v případech nepřemístěných a propojených nevyplněných diskontinuit (Barton et al., 2023). JRC je nejvíce využíván v geotechnické a inženýrskogeologické praxi, zejména v hodnocení stability svahů u liniových staveb, výrubů u tunelových a podzemních staveb, stability a propustnosti podloží a stěn u přehrad. Své uplatnění nachází také v důlním i environmentálním inženýrství a v oblasti vodních zdrojů (Barton et al., 2023).

Tato bakalářská práce se zaměřuje na podrobnou rešerši problematiky stanovení hodnot JRC. Cílem je poskytnout čtenáři – ať už se jedná o studenta, odborníka z oblasti geotechniky či inženýrské geologie – ucelený přehled o vývoji tohoto parametru, postupech a metodách jeho stanovení. Součástí práce je také přehled faktorů, které mohou ovlivnit přesnost stanovení JRC, a rovněž doporučení týkající se vhodných měřicích postupů a metod využitelných v praxi. Zvláštní důraz je kladen na problematiku subjektivity při určování JRC v praxi vizuální metodou podle Bartona a Choubeyho (1977). Tato otázka je zkoumána prostřednictvím rešerše, ale především vlastní studií s dobrovolníky z profesionální praxe.

Praktická část práce je založena na studii subjektivity stanovení JRC provedené s 85 respondenty, kteří stanovili hodnoty JRC podél vyznačených 15 cm dlouhých profilů na pěti reálných horninových vzorcích. Dosud nebyla publikována žádná studie, která by se zabývala subjektivitou určování JRC tímto způsobem – tedy jeho přímým hodnocením na skutečných horninových vzorcích. Tímto způsobem určování koeficientu drsnosti diskontinuit se studie snaží přiblížit podmínkám při reálném určování drsnosti diskontinuit v praxi. Vzhledem k tomu, že respondenti JRC hodnotí přímo na skutečném vzorku, mohou využít nejenom zrak, ale i hmat a různé metody určování JRC běžně používané v praxi. Například u jednoho vzorku ze studie bylo zjištěno, že kvůli hmatovému hodnocení povrchu respondenti neuváděli ani přibližně správné hodnoty JRC. Součástí průzkumu je rovněž dotazník, který umožňuje získat přehled o nejběžněji používaných metodách stanovení JRC, četnosti určování JRC v praxi a délce praxe daného respondenta. Studie Beer et al. (2002) a Alameda-Hernández et al. (2014) se touto problematikou zabývaly pouze na základě hodnocení několika vykreslených profilů prostřednictvím online nástrojů.

Práce je rozdělena do sedmi kapitol, z nichž první kapitola je úvod. Druhá kapitola se věnuje historickému vývoji JRC, a také zmiňuje další parametry používané pro charakterizaci drsnosti povrchů diskontinuit. Třetí kapitola pojednává o metodách určování JRC. Ty jsou rozdělené do třech hlavních skupin – smykové zkoušky, kontaktní metody měření a vizuálního určení a poslední skupinou jsou bezkontaktní metody, které jsou s ohledem na rozsah práce představeny pouze okrajově. Čtvrtá kapitola je zaměřena na vlivy na hodnoty JRC. Je zde rozebírán vliv měřítka na hodnoty JRC a anizotropie hodnot JRC. Pátá kapitola se věnuje vlastní studii subjektivity určení JRC v praxi. Také shrnuje předchozí studie subjektivity z odborné literatury, metodiku vlastní studie, výsledky studie a výsledky vlastního měření hodnot JRC. Šestá kapitola se věnuje diskusi výsledků a jejich porovnání s naměřenými hodnotami a poznatky z literatury. Závěrečná kapitola obsahuje doporučení pro využití navržených metod v praxi, shrnuje výsledky studie a navrhuje možnost dalšího výzkumu ve formě diplomové práce.

## 2. Vývoj JRC v souvislostech

Prvně vliv nerovností povrchu na smykovou pevnost zmínili ve své studii Newland a Allely (1957) v souvislosti s objemovými změnami vzorků ze zrnitých materiálů. V této studii autoři navrhují teorii o interakcích mezi zrny z pohledu geometrického uspořádání částic. V analýze pohybu částic během smyku zvažují také situaci, kdy se vzorek chová jako celek a je porušen jednou ostrohrannou diskontinuitou. Na této situaci jednoduše demonstrovali zvětšení objemu vzorku při smykání podél nejstrmějších kontaktů diskontinuity. Pro odhad smykové pevnosti zrnitých materiálů (především písku a šterku) navrhli modifikaci tzv. Mohr-Coulombové rovnice (Hudson a Harrison, 1997) popisující smykovou pevnost (rovnice 1) do následujícího tvaru:

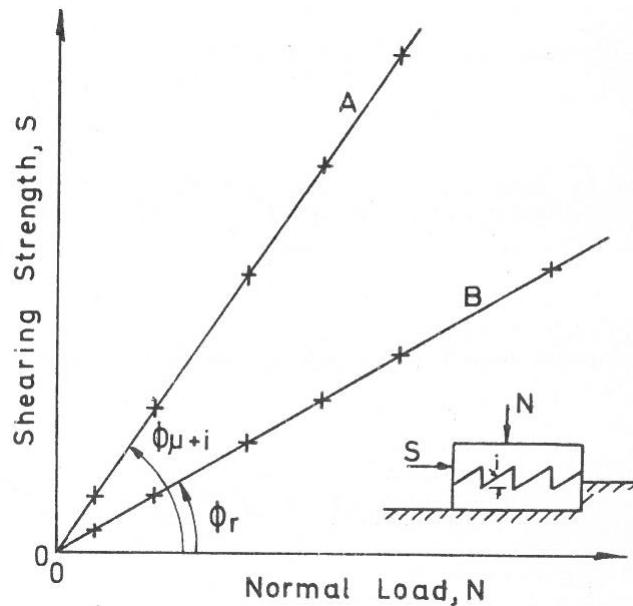
(1)

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i)$$

kde  $\tau$  je vrcholová smyková pevnost,  $\sigma_n$  efektivní normálové napětí,  $\varphi_b$  je základní úhel vnitřního tření,  $i$  představuje průměrný úhel odchylky posunutí zrn od směru působícího smykového napětí, tj. úhel sklonu nerovnosti povrchu.

Podrobnější výzkum poté provedli Ripley a Lee (1961; cit. dle MacDonald et al., 2023), kteří se zaměřili na smykovou pevnost hornin. Na sedimentárních horninách s přirozenou drsností a uměle vyhlazeným povrchem diskontinuit uskutečnili sérii víceúhlových smykových testů. Zjistili, že drsnější povrchy mají vyšší smykovou pevnost, která přesahuje příspěvek tření mezi dvěma plochami (Ripley a Lee, 1966; cit. dle MacDonald et al., 2023). Byli první, kteří na základě experimentu oddělili

vliv geometrie diskontinuity od součinitele tření materiálu (Withers, 1964; cit. dle MacDonald et al., 2023).



Obr. 1 - Obálka porušení maximální (vrcholové) smykové pevnosti (linie A) a reziduální pevnosti (linie B) pro vzorky s drsným povrchem. Tyto dvě obálky porušení jsou typické pro testy prováděné při nízkém normálovém napětí. Linie A podle Pattona (1966) reprezentuje dva typy pevnosti: externí třecí odpor podél nakloněných ploch a vnitřní pevnost zubů v místě porušení. Parametr  $\phi_{\mu}$  představuje úhel třecího odporu při skluzu. Hodnota  $\phi_{\mu}$  se mění v závislosti na povrchových charakteristikách horniny. Jeho hodnotu lze zjistit po velkých posunech na makroskopicky hladkých, ale mikroskopicky nerovných (neleštěných) mokřých površích. Zdroj: Patton, 1966

Na předchozí práce navázal Patton (1966), který použil model rovnice (1) pro smykové vlastnosti drsných diskontinuit za nízkého normálového napětí. Podle Pattona (1966) se nerovnosti při nízkém normálovém napětí zásadně nedeformují, a proto jejich sklon  $i$  zvyšuje úhel vnitřního tření  $\phi_b$ . Příspěvek sklonu nerovností  $i$  je rozdíl mezi maximální obálkou pevnosti a reziduální obálkou pevnosti, viz Obr. 1. V případě vysokého normálového napětí předpokládal, že dochází k odstranění asperit (mikronerovností či výstupků) smykem a tím jejich vliv zaniká. Proto pro vysoká normálová napětí se smyková pevnost definovala podle Mohr-Coulombova lineárního vztahu (Hudson a Harrison, 1997), kde se objevuje jak úhel vnitřního tření  $\phi_b$ , tak koheze  $c$ , viz rovnice (2), což vedlo k vytvoření bilineární obálky pevnosti z rovnic (1) a (2). Později se místo Mohr-Coulombovy lineární obálky pevnosti přijala skutečnost, že při nulovém normálovém napětí může být nulová smyková pevnost. To podle Bartona (1973) představovalo výrazné zlepšení oproti předpokládaným lineárním charakteristikám ( $c$ ,  $\phi_b$ ). Patton (1966) ve své práci interpretoval a zdůraznil, že obálky pevnosti jsou pro hrubé diskontinuity zakřiveny. Důvod zakřivení uvedl změny v režimu porušení, které souvisejí s fyzikálními vlastnostmi asperit tj. úhel sklonu asperit, pevnost materiálu či jejich počet na ploše.

(2)

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\varphi_b)$$

Patton (1966) rozdělil nerovnosti na tzv. nerovnosti „prvního řádu“ a „druhého řádu“, viz Obr. 2a. Ve své práci se primárně zabýval hrubými nerovnostmi „prvního řádu“, zatímco nerovnostmi „druhého řádu“ se blíže nezabýval. V povrchové zóně nerovnosti „druhého řádu“ zvětrávají a ničí je pomalé svahové pohyby, v tomto případě nemají na smykovou pevnost velký vliv. Pod zónou povrchového zvětrávání ale začínají mít vliv oba typy nerovností (Patton a Deere, 1970; cit. dle Barton, 1973).

Barton (1971) navazuje na práce předešlých autorů a ve své práci navrhuje obecné kritérium vrcholové pevnosti diskontinuit (rovnice 7), ale i upravené kritérium vrcholové pevnosti pro diskontinuity se známou drsností (rovnice 8). Z úvahy smyku pro idealizovanou šikmou hladkou diskontinuitu, která by mohla reprezentovat pískované nebo řezané povrchy, odvodil vztah (rovnice 3, Obr. 2b) vyrovnáním složek sil horizontálních ( $H$ ) a vertikálních ( $N$ ) pro podmínku mezní rovnováhy (Barton, 1971).

(3)

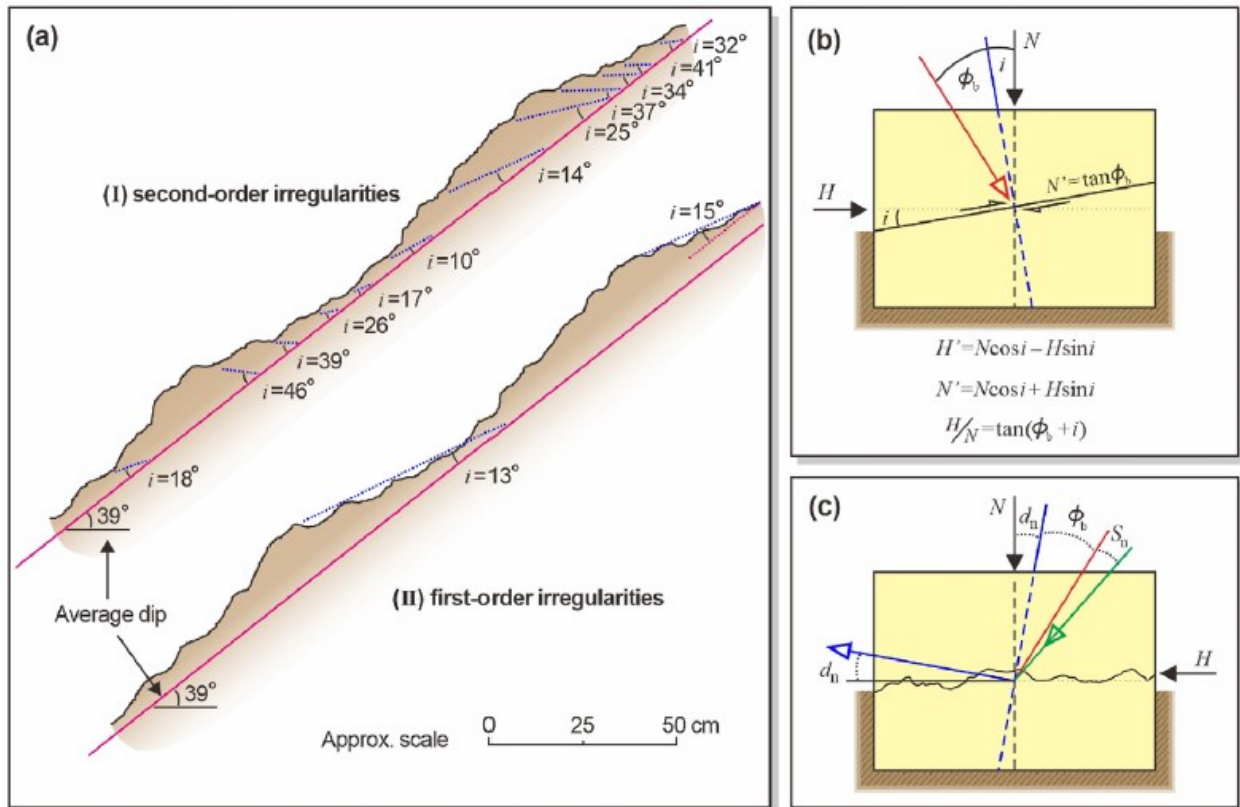
$$\frac{H}{N} = \tan(\varphi_b + i)$$

Ve skutečné situaci smyku přispívá k vrcholové pevnosti celá řada různých hodnot  $i$ , ale masiv nad diskontinuitou se v okamžiku dosažení vrcholové pevnosti pohybuje pod jedním úhlem vzhledem k rovině smykové plochy, a to pod úhlem  $d_n$  (vrcholový úhel dilatace), který představuje efektivní sklon asperit  $i$  (Barton, 1971). Problém smykové složky různorodých nerovností Barton (1971) vyjádřil rovnicí (4, Obr. 2c), která zahrnuje vliv geometrie povrchu, tření a dilatační chování. Podle rovnice (4) je vrcholové pevnosti dosaženo tehdy, když poměr horizontální/smykové a vertikální/normálové síly se rovná tangente celkového úhlu tření.

(4)

$$\frac{H}{N} = \tan(\varphi_b + d_n + s_n)$$

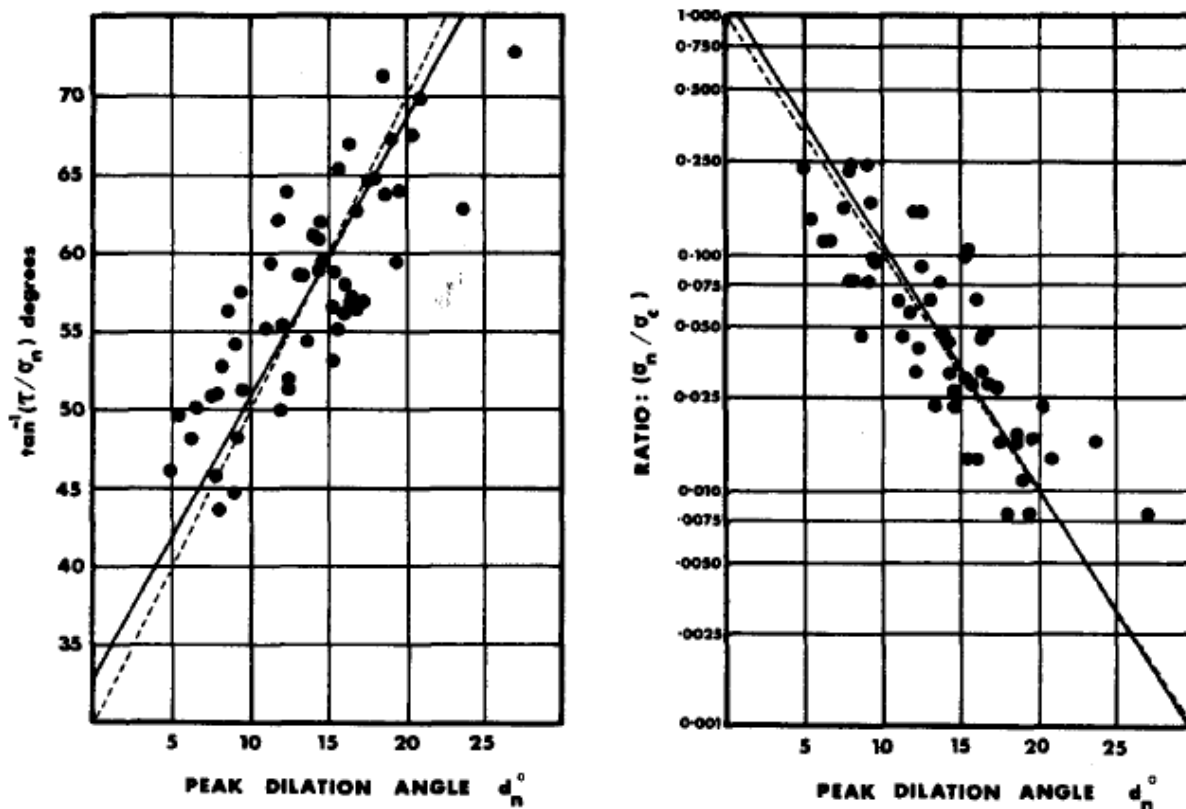
Hodnota  $d_n$  je vrcholový dilatační úhel neboli okamžitý sklon smykové trajektorie v okamžiku dosažení vrcholové pevnosti vzhledem k průměrné rovině. Složka  $s_n$  je smyková složka a zástupce geometrie povrchu odpovídající porušení asperit.



Obr. 2 - (a) nerovnosti prvního řádu (first-order irregularities) a nerovnosti druhého řádu (second-order irregularities), jejich hodnota  $i$  a průměrný sklon roviny diskontinuity (average dip) (podle Patton, 1966); (b) odvození rovnice (3) pomocí mezní rovnováhy mezi horizontální ( $H$ ) a vertikální ( $N$ ) silou na hladké diskontinuitě; (c) znázornění odvození rovnice (4) pro drsné povrchy diskontinuit. Zdroj: Barton et al., 2023 podle Barton, 1971.

Zatímco smyková složka  $s_n$  roste s rostoucím normálovým napětím, vrcholový dilatační úhel  $d_n$  klesá. Jak uvádí Barton (1973), v případech nízkého normálového napětí po dosažení vrcholové pevnosti může s pokračujícím smykovým posunem neplanární diskontinuita nadále dilatovat ve snížených úhlech. V případě vysokého normálového napětí a po dosažení vrcholové pevnosti neplanární diskontinuita přestává dilatovat. Pokud by normálové napětí bylo extrémně vysoké, k dilataci nemusí vůbec dojít kvůli destrukci asperity (Barton, 1973).

Barton (1971) ve své práci vyjádřil dva vztahy pro modelové diskontinuity na základě jejich smykových zkoušek. Formuloval vztah vrcholového smykového napětí  $\tau$  a efektivního normálového napětí  $\sigma_n$  s vrcholovým úhlem dilatace  $d_n$ . Pro první vztah z experimentů zobrazil rozložení dat, viz Obr. 3, kde na vertikální ose jsou hodnoty  $\arctan(\tau/\sigma_n)$  a na vodorovné je zobrazen úhel  $d_n$ .



Obr. 3 - Výsledky smykových testů reprezentované dvěma grafy. Graf vlevo ukazuje lineární závislost mezi úhlem dilatace  $d_n$  a úhlem  $\arctan(\tau/\sigma_n)$  a graf vpravo lineární závislost mezi  $d_n$  a  $(\sigma_n/\sigma_c)$ . Každý bod je průměrem dvou zkoušek za stejného normálového napětí. Zdroj: Barton, 1973 podle Barton, 1971

Z regresní analýzy metodou nejmenších čtverců a po menší úpravě, Barton (1971) získal pro vyjádření odpovídající lineární závislosti mezi  $d_n$  a  $\arctan(\tau/\sigma_n)$  rovnicí (5). Základní úhel tření  $\varphi_b$  testovaných materiálů se pohyboval mezi  $28,5^\circ$  do  $31,5^\circ$ , proto se v rovnici (5) pro pevnou hodnotu  $\varphi_b$  zvolilo  $30^\circ$ .

Ve druhém vztahu z experimentálních dat definoval závislost mezi normálovým napětím a vrcholovým úhlem dilatace  $d_n$ . Protože se vzorky v experimentu zkoušely při různých úrovních normálového napětí kvůli závislosti na relativní jednoosé pevnosti v tlaku  $\sigma_c$  materiálu, muselo být normálové napětí jednoosou pevností v tlaku normalizováno dělením, aby se oba výsledky mohly vzájemně porovnat (Barton, 1971). Jednoosá tlaková pevnost testovaných materiálů se pohybovala od  $0,72$  do  $8,4 \text{ kg/cm}^2$  ( $0,071$ - $0,824 \text{ MPa}$ ). Po vynesení poměru  $(\sigma_n/\sigma_c)$  na vertikální logaritmickou osu vznikl přímý lineární vztah s  $d_n$  (Obr. 3). Na základě regresní analýzy metodou nejmenších čtverců aplikované pro soubor dat definoval Barton (1971) rovnicí (6).

(5)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(2d_n + 30^\circ)$$

(6)

$$d_n = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right)$$

Můžete si všimnout, že pokud normálové napětí bude stejně velké jako jednoosá tlaková pevnost, tak dilatace se zcela potlačí. Z kombinace rovnic (5) a (6) Barton (1971) získal odstraněním  $d_n$  obecné kritérium vrcholové pevnosti pro drsné, zvlněné a nezávětralé diskontinuity (rovnice 7). Toto kritérium nachází uplatnění v případech, kdy detailně neznáme povrch diskontinuity, ale víme, že je dostatečně drsný v porovnání s modelovými diskontinuitami z práce od Bartona (1971).

(7)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(20 \log_{10}(\sigma_c/\sigma_n) + 30^\circ)$$

Barton (1971) prvně navrhnul upravené kritérium vrcholové pevnosti pro diskontinuity se známou drsností, viz rovnice (8). Jak sám zmiňuje, tak rovnice (7) je obecná a nepružná pro zohlednění různých stupňů drsností. Pro pochopitelnost a účelnost této práce pouze přikládám rovnici (8), kterou Barton (1971) definoval upravené kritérium a postupem práce, při níž kritérium definoval, se nebudu dále zabývat.

(8)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ \frac{(90 - d_0)}{d_0} \right] d_n + d_0$$

Hodnota  $d_0$  je „maximální“ úhel dilatace pro extrémně nízké normálové napětí, zatímco  $d_n$  je již definovaná hodnota vrcholového úhlu dilatace.

Barton (1973) navázal na svou práci z roku 1971 tím, že místo hodnoty  $\sigma_c$  navrhnul parametr JCS (*Joint Wall Compressive Strength*) tj. pevnost stěny diskontinuity v tlaku. V případě nezávětralých diskontinuit se JCS rovná  $\sigma_c$ , jinak u závětralých materiálů je JCS nižší než  $\sigma_c$ .

Barton (1973) také poprvé zavedl a definoval koeficient drsnosti diskontinuit, tj. JRC. Analýzou dat z mnoha smykových testů na diskontinuitách s variabilní drsností dospěl k tomu, že smyková pevnost na drsnějších površích výrazně překračuje předpovězenou smykovou pevnost Mohr-Coulombovým lineárním modelem. Dospěl k závěru, že příspěvek drsnosti není lineární, ale logaritmický. Menší úpravou rovnice (7) zavedl empirickou nelineární rovnici (9) vrcholové smykové pevnosti. Zjistil totiž, že hodnotu vrcholového úhlu tření lze vyjádřit pomocí JRC, JCS a  $\varphi_b$  (Barton et al., 2023), kdy JCS odráží míru závětrání povrchu. Do příspěvku drsnosti ke smykové pevnosti také

vstupuje vliv normálového napětí (Barton, 1973). Jak uvádí Barton (1973), při nízkých normálových napětích se projevuje vliv drsnosti povrchů (JRC) na smykovou pevnost nejvíce, kdežto při vysokých normálových napětích je vliv potlačen, protože dochází k lokální destrukci asperit. I tento faktor vystihuje rovnice (9) a (10).

(9)

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ (JRC) \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

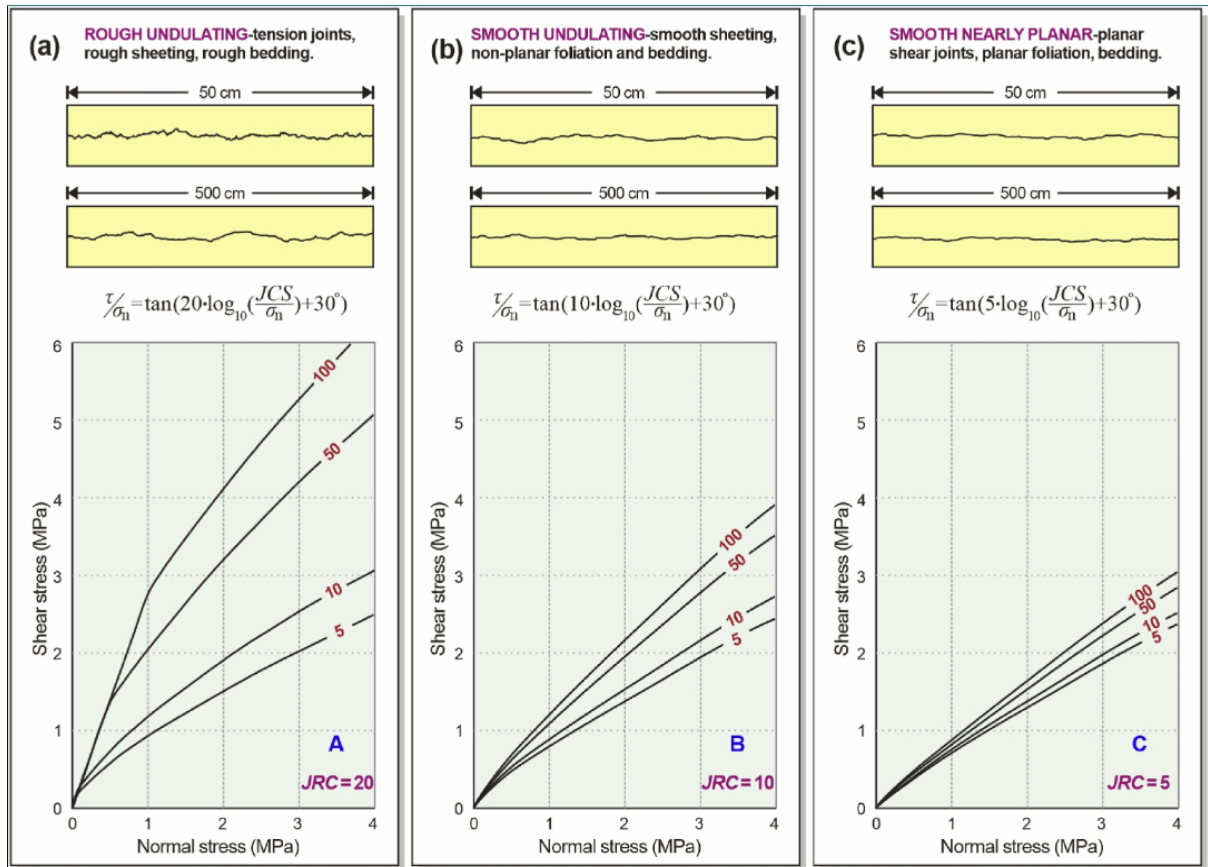
Rovnici (10) pro výpočet JRC Barton (1973) reverzně odvodil z předchozí rovnice (9) pro smykovou pevnost. Ve své práci Barton (1973) uvádí postup stanovení JRC. Nejprve určíme horní obálka maximální smykové pevnosti a dostaneme hodnotu  $\tau/\sigma_n$ , změříme nezvětralé  $\sigma_c$  horniny a tyto hodnoty dosadíme do rovnice (10), ze které dostaneme průměrné JRC odpovídající horní hranici pevnosti. Stanovením dolní obálky smykové pevnosti dostáváme opět hodnoty  $\tau/\sigma_n$ , ale předpokládáme pro zvětralé stěny diskontinuity, že efektivní tlaková pevnost bude odpovídat jedné čtvrtině  $\sigma_c$ . Hodnoty  $\tau/\sigma_n$  pro dolní obálku a  $\sigma_c/4$  opět dosadíme do rovnice (10) a získáme průměrné JRC pro dolní hranici pevnosti. Průměrem těchto dvou hodnot JRC je výsledná hodnota JRC (Barton, 1973).

(10)

$$JRC = \frac{\left[ \tan^{-1} \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \varphi_b \right]}{\log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)}$$

Tyto rovnice platí za podmínky, kdy smykový proces zahrnuje pouze geometrii povrchů a mechanickou pevnost stěn diskontinuit (Barton, 1973).

Barton (1973) odvodil škálu hodnot JRC z rozsáhlé analýzy výsledků smykových testů na velkém množství horninových vzorků s proměnlivou drsností. Hodnoty JRC stanovil v rozsahu 0 až 20. Pro nejhladší povrchy platí hodnota JRC = 0 a předpokládá se u nich snížená smyková pevnost, kdežto pro diskontinuity s nejdřsnější strukturou povrchu dosahuje hodnota JRC = 20 a zde se naopak předpokládá vyšší smyková pevnost. Podle hrubosti povrchu Barton (1973) rozdělil diskontinuity do třech tříd (A, B, C), viz Obr. 4. Třída A je popsána jako drsné vlnité diskontinuity, pro které se hodnoty JRC pohybují okolo 20. Třída B představuje hladké vlnité diskontinuity s hodnotami JRC okolo 10. Poslední třída C jsou hladké téměř planární diskontinuity s JRC pohybujícím se okolo hodnoty 5.



Obr. 4 - Rozdělení neplanárních diskontinuit do třech tříd: (a) JRC = 20 pro drsně zvlněné diskontinuity např. tahové diskontinuity, hrubé odlučné plochy a hrubé vrstevní plochy; (b) JRC = 10 pro hladce zvlněné diskontinuity např. hladké odlučné plochy, nepravidelně vyvinutá foliace a vrstevnatost; (c) JRC = 5 pro hladké téměř planární diskontinuity např. rovinné smykové plochy, rovinné foliace, vrstevnatost. V každém grafu jsou 4 křivky představující rodinu obálek vrcholové pevnosti. Křivky jsou označeny hodnotami 100, 50, 10 a 5 (jednotky v MPa). Tyto hodnoty jsou hodnoty parametru JCS, které byly použity pro výpočet obálek. Obrázky znázorňují empirický zákon pro předpověď smykové pevnosti na dané diskontinuitě. Zdroj: Barton et al., 2023 podle Barton, 1973

Nejnámější a stále velice hojně používanou škálu hodnot JRC však navrhli pro své experimentální výsledky Barton a Choubey (1977). Informace o jejím vzniku jsou podrobněji popsány v kapitole 3.2.4. Barton a Choubey (1977) rozšířili parametry v rovnicích (9) a (10) o reziduální úhel tření  $\varphi_r$ . Ten můžeme odhadnout pomocí rovnice (11), kterou získali na základě provádění reziduálních náklonových testů (*residual tilt tests*, viz kapitolu 3.1.2) na suchých a řezaných horninových površích pod velmi nízkým normálovým napětím.

(11)

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20^\circ) + 20(r/R)$$

Parametr  $r$  je hodnota odrazu Schmidta kladiva na nasyceném zvětralém povrchu diskontinuity a parametr  $R$  je hodnota odrazu Schmidta kladiva na suchém nezvětralém povrchu diskontinuity.

Pokud se základní úhel tření  $\varphi_b$  nahradí v rovnici (9) za reziduální úhel tření  $\varphi_r$ , bude možné určit hodnotu vrcholové smykové pevnosti jak pro zvětralé, tak nezvětralé diskontinuity (Barton a Choubey, 1977). Z rovnice (12) menší úpravou dostaneme rovnici (13) pro výpočet JRC.

(12)

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ (JRC) \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right]$$

(13)

$$JRC = \frac{\left[ \tan^{-1} \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \varphi_r \right]}{\log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)}$$

Barton a Choubey (1977) se ve své práci zaměřili mimo jiné na stanovení parametru JCS. Věnovali pozornost zejména zkouškám pomocí Schmidtova kladiva (Aydin, 2008), jehož použití doporučují zejména v případě hornin se zvětralým povrchem. Schmidtovo kladivo v tomto kontextu označují jako velmi praktický nástroj pro měření JCS v terénních podmínkách.

Z krátkého popisu postupů stanovení hodnot JCS a  $\varphi_b$  nebo  $\varphi_r$  vyplývá, že tyto parametry lze s určitou mírou přesnosti stanovit. Skutečnou neznámou však zůstává parametr JRC, a to především v souvislosti s rychlým odhadem smykové pevnosti v počáteční fázi inženýrskogeologického průzkumu (Barton a Choubey, 1977). Z tohoto důvodu se autoři rozhodli navrhnout – aspoň pro účely své studie – přesnější pomůcku pro odhad hodnot JRC, než jakou navrhl Barton (1973, Obr. 4). Na základě výzkumu reprezentativních profilů pro jednotlivé intervaly drsnosti sestavili Barton a Choubey (1977) tabulku deseti typických profilů odpovídající intervalům hodnot JRC. Podrobnější popis této studie a metodiky sestavení standardních profilů je uveden v kapitole 3.2.4.

Od 70. let 20. století začal nenápadně vznikat Barton-Bandisův model diskontinuit (*Barton-Bandis joint model* nebo BB model) známý pod dalšími názvy jako JRC-JCS model nebo Barton-Bandis kritérium porušení jako prostředek pro popis vrcholové smykové pevnosti (Barton a Bandis, 1990). BB model využívá pro popis vrcholové smykové pevnosti rovnici (12) od Bartona a Choubeyho (1977). Barton a Bandis (1982) se zabývali měřítkovým efektem (*scale effect*) neboli vlivem velikosti vzorku diskontinuity na průběh napěť-o-deformačních křivek smykové pevnosti a s tím souvisejícími změnami hodnot JRC a JCS s velikostí vzorku. Navrhli korekční křivky měřítka pro parametry JRC a JCS (podrobněji viz kapitolu 4.1). Parametry v laboratorním měřítku označili jako  $JRC_0$  a  $JCS_0$ , pro měřítko *in-situ* byly definovány parametry s označením  $JRC_n$  a  $JCS_n$ . Proto se Barton a Bandis (1990) pro konkrétnost zmiňují, že v použité rovnici (12) by se dnes změnilo označení parametrů z JRC

a JCS na  $JRC_0$  a  $JCS_0$ , neboť to byly skutečně parametry v laboratorním měřítku. Barton a Bandis (1990) kritérium vložili do kódu UDEC (*Universal Distinct Element Code*). Tento dvourozměrný numerický program řeší kvazistatickou nebo dynamickou odezvu diskontinuitního horninového prostředí a není omezen na konkrétní typ problému nebo počátečních podmínek. UDEC-BB využívá soubor empirických vztahů BB modelu pro modelování smykového a normálového chování diskontinuit na základě jejich drsnosti a pevnosti stěn. V dnešní době se moduly kódu UDEC používají k simulaci širokého spektra inženýrských a vědeckých analýz, včetně analýzy stability svahů, výrubů, proudění fluid v diskontinuitním horninovém prostředí, využívá se i pro analýzy účinků trhacích prací, zemětřesení a mikroseismicity (Itasca International, 2024).

Parametr JRC, používaný v Barton-Bandisově kritériu porušení, nepředstavuje jediný způsob kvantifikace drsnosti povrchu diskontinuit. Výzkumníci z celého světa navrhli řadu dalších parametrů, pomocí nichž se snažili charakterizovat drsnost povrchu. Mezi další nejznámější parametry patří například: parametr  $Z_2$  poprvé navržen Myersem (1962), součinitel drsnosti profilu SF navržen Saylesem a Thomasem (1977), metrická drsnost ( $\theta_{\max}^* / C+1$ ) od Tatoneho a Grasselliho (2010), fraktální dimenze  $D$  a index drsnosti profilu  $R_p$  (popisuje Alameda-Hernández et al., 2014).

Při snaze o zlepšení numerického vyjádření charakteru povrchové drsnosti pomocí střední kvadratické odchylky RMS od střední linie profilu navrhnul Myers (1962) hned několik nových charakteristik:  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$ . Charakteristiku  $Z_2$  definuje jako první derivaci profilové křivky, tedy RMS,  $Z_3$  jako druhou derivaci RMS a  $Z_4$  jako rozdíl součtů délek úseků profilu s kladným a záporným sklonem dělený celkovou délkou profilu. Tyto navržené charakteristiky povrchové drsnosti experimentálně ověřoval sérií testů s cílem zjistit, jak přesně dokážou předpovědět třecí vlastnosti povrchů. Experiment prováděl na dvanácti vzorcích povrchů připravených za studena z kotoučů z válcové oceli. Každý povrch vzorku byl upraven tak, aby měl jinou drsnost. Byly vyrobeny vzorky s povrchem od nejhladšího až leštěného po hrubší broušené. Součinitele tření povrchu získal pomocí naklápěcího testu z úhlu naklonění a zrychlení pohybu podložky. Myers (1962) naklápěcí test nazývá jako *inclined-plane friction tester*. Zrychlení měřil vysokorychlostní kamerou. Pro každý vzorek provedl čtyři měření. Charakteristiky  $Z_2$ ,  $Z_3$  a RMS měřil pomocí přístroje Talysurf ve směru provedení třecích testů a analogovým počítačem vyhodnotil výsledky charakteristik. Koeficient lineární korelace mezi součinitelem tření a hodnotou  $Z_2$  vyšel jako 0,84, pro  $Z_3$  jako 0,67 a pro RMS 0,56. Tyto výsledky potvrdily, že charakteristika  $Z_2$  poskytovala nejpřesnější predikci tření (Myers, 1962).

Následně Sayles a Thomas (1977) kritizovali nevýhody a problémy autokorelační funkce (ACF), která do té doby byla nejpoužívanějším způsobem popisu povrchů nejenom v oboru strojírenství. To je vedlo k návrhu jiné funkce, tzv. strukturní funkce (SF). Lze spočítat profilové, ale i plošné strukturní funkce, které slouží také k prostorovému zobrazení povrchové drsnosti. Funkci navrhli

především pro zkoumání prostorové asymetrie obráběných a tvářených povrchů (Sayles a Thomas, 1977).

Tatone a Grasselli (2010) později navrhli 2D parametr drsnosti ve tvaru  $\theta_{\max}^*/(C+1)$ , který je založen na kumulativním rozdělení sklonů úseček tvořících 2D profil. Kdy  $\theta_{\max}^*$  je maximální inklinace profilu ve zvoleném směru, C je bezrozměrný parametr charakterizující tvar kumulativního rozložení a je určen nelineární regresní analýzou metodou nejmenších čtverců. Ve své práci odvodili rovnice pro odhad JRC z parametru  $\theta_{\max}^*/(C+1)$  a také z parametru  $Z_2$  při vzorkovacích intervalech 1,0 mm a 0,5 mm (Tatone a Grasselli, 2010).

Dalšími výše zmiňovanými charakteristikami povrchové drsnosti jsou fraktální dimenze D, které kvantifikují míru geometrické složitosti povrchu (KSR TUL, 2025), a nebo parametr  $R_p$  (*Peak Height Ratio*), který vyjadřuje největší výšku výstupku v rozsahu délky profilu.  $R_p$  poskytuje přímou představu o výškové výraznosti nerovností na povrchu diskontinuity (Petřkovská, 2013).

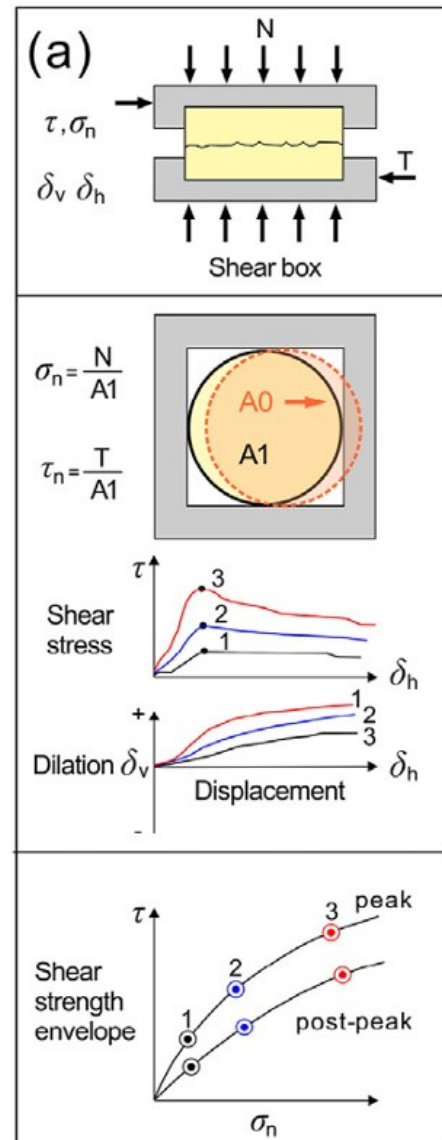
Vedle parametru JRC byly vyvinuty i další způsoby popisu povrchové drsnosti diskontinuit. Byla formulována řada empirických rovnic, které korelují hodnoty JRC se zmíněnými charakteristikami drsnosti. Tyto rovnice však většinou představují složité topologické popisy nebo využívají 3D laserovou profilometrii. Právě proto je jejich praktické využití omezeno požadavky na specializované vybavení a vyššími náklady. Zároveň by analýza povrchu neměla být ovlivněna zvětráváním či předchozím smykovým zatížením. I přes možné nedostatky je JRC nejčastěji používaným parametrem drsnosti v praxi (Barton et al., 2023). Dle našeho názoru by měla být věnována větší pozornost metodám pro jeho stanovení a míře subjektivity při určování JRC, proto se tímto tématem v práci zabýváme blíže.

### 3. Metody určování JRC

Podle Bartona et al. (2023) lze hodnotu JRC získat buď odhadem založeným na měření drsnosti povrchu, nebo přímými zkušebními metodami jako např. smykovými zkouškami. Pro potřeby práce jsem metody určování hodnot JRC rozdělila do tří hlavních skupin. První skupinu tvoří smykové zkoušky (kapitola 3.1), kam jsem zařadila přímé smykové zkoušky, náklonové testy (*tilt tests*) a tažné zkoušky (*push – pull tests*). Ty mají společné, že JRC se nepřímou stanoví z parametru získaného právě smykem obou částí diskontinuity. Do druhé skupiny spadají kontaktní metody měření a vizuálního určení JRC (kapitola 3.2). Tam řadím metodu amplitudy a rovné hrany, odebrání tvaru profilu diskontinuity profilovacím hřebem nebo profilometrem. Třetí skupinou jsou zmíněné bezkontaktní metody (kapitola 3.3), kam řadím optické metody jako je terestrické laserové skenování, laserová profilometrie a fotogrammetrie zahrnující strukturní světelné skenování nebo rekonstrukci povrchu z pohybu

#### 3.1. Smykové zkoušky (*shear tests*)

Jak již bylo uvedeno, smykové zkoušky lze rozdělit na přímé smykové zkoušky, náklonové zkoušky (*tilt tests*) a tažné zkoušky (*push – pull tests*). Hodnota parametru JRC se v těchto případech stanovuje nepřímou z veličiny, která se měří při smykových zkouškách. Tato veličina je následně dosazena do příslušné výpočtové rovnice navržené pro daný způsob testování, čímž se zpětně určí hodnota JRC.



Obr. 5 – Průběh a výsledky zkoušky v přímé smykové krabici. Horní část obrázku znázorňuje umístění vzorku s diskontinuitou (žlutý obdélník) ve smykové krabici (shear box) a působící normálové napětí ( $N$ ) a smykové napětí ( $T$ ). Střední část znázorňuje směr smykového posunu vzorku ( $A0$ ) z původní polohy ( $A1$ ). První křivka od shora znázorňuje křivku smykového napětí ( $\tau$ -shear stress) vůči horizontálnímu posunu ( $\delta_h$  – displacement). Druhá křivka představuje křivku dilatace ( $\delta_v$ -dilation) opět vůči ( $\delta_h$ ) a aplikovanému normálovému napětí ( $\sigma_n$ ). Spodní část obrázku vyobrazuje typické obálky maximální – vrcholové a povrchové smykové pevnosti (Shear strength envelope), které u drsnějších diskontinuit mívají zakřivenější tvar. Zdroj: Barton et al., 2023

### 3.1.1. Přímé smykové zkoušky (*direct shear tests*)

Přímé smykové zkoušky diskontinuit se provádějí v přístroji nazývaném translační smyková krabice (*direct shear box*). Oba bloky diskontinuity se připevní do rámu smykové krabice pomocí silných upevňovacích materiálů (epoxid, hydroston, cylcap) tak, aby povrch diskontinuity byl horizontálně v rovině smyku. Normálové zatížení se může aplikovat pomocí hydraulického lisu, šroubu či vzduchovým polštářem a mělo by se pohybovat souběžně se smýkanou částí vzorku (Goodman, 1976). Na jednu polovinu vzorku se během zkoušky působí známou smykovou silou, zatímco se druhá polovina nehýbe (Obr. 5). Jak shrnují Barton et al. (2023), ze smykových zkoušek získáme křivku smykového napětí ( $\tau$ ) vůči horizontálnímu posunu – deformaci na smykové ploše ( $\delta_h$ ) a křivku dilatace ( $\delta_v$ ) opět vůči ( $\delta_h$ ), viz střední část Obr. 5. Z výsledků smykových zkoušek lze zpětně vypočítat hodnoty JRC podle rovnice (13) (Barton et al., 2023).

Pro smykové zkoušky jsou vhodné buď vzorky s přibližně kruhovým průřezem či eliptickým, vyříznuté z vrtného jádra, nebo čtvercové či obdélníkové vzorky připravené ze sazbových bloků. Vzorek se může testovat smykem pouze jednou (Barton et al., 2023).

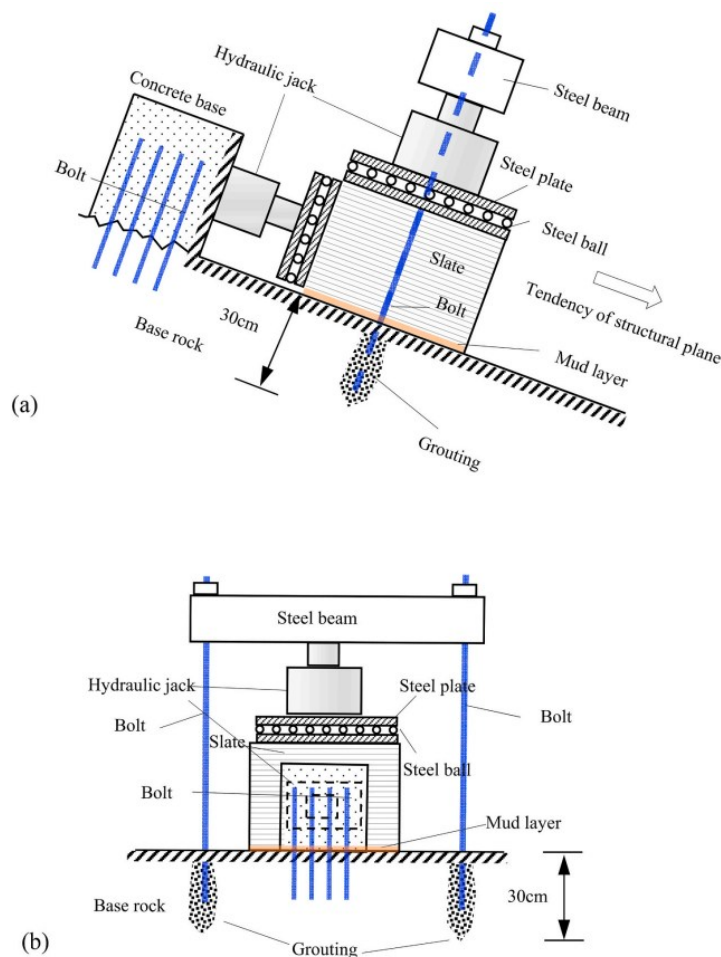
Smykové zkoušky se provádějí nejen v laboratoři, ale i v terénu *in-situ*. Polní smykové zkoušky lze provést na povrchu i v podzemní štole. V obou případech se vzorek musí odčlenit odtěžením okolního materiálu a připravit vyříznutím do správných rozměrů pro testování. Pro provedení zkoušky se ve štole smykové a normálové síly aplikují zapřením hydraulického lisu o stěny a strop komory. V případě druhém se smykové síly aplikují pomocí hydraulických lisů zapřených například o stěnu výkopu. V tomto případě se obvykle normálové síly rovnají vlastní tíze bloku (Goodman, 1976). Vzhledem k náročnosti a zajímavému technickému provedení *in-situ* smykových zkoušek uvádím dále v textu dva příklady z nedávno publikované odborné literatury.

Tan et al. (2021) prováděli *in-situ* přímé smykové zkoušky za účelem zhodnocení stability svahu a jeho smykových vlastností (Obr. 6). Svah byl tvořen epimetamorfovanou břidlicí se silně vyvinutou vrstevnatostí ukloněnou po směru svahu a více či méně vyplněnou jílovitou a prachovitou složkou. Lokalita provádění *in-situ* smykových zkoušek se nacházela na odhaleném svahu podél dálnice G76 v provincii Guizhou na jihozápadě Číny, kde většinu svahových nestabilit lze klasifikovat jako poruchy řízené diskontinuitami s plochým smykem. Pro *in-situ* smykovou zkoušku si Tan et al. (2021) vybrali několik zkušebních těles o rozměrech 50 cm x 50 cm x 25 cm a s rozestupem na svahu větším než 50 cm. Instalace a příprava vzorku je popsána v popisku Obr. 6. Při zkoušce se využil hydraulický systém pro aplikaci a postupné zvyšování horizontálního zatížení, které působilo na plochu 2500 cm<sup>2</sup>. Směr smyku a orientace diskontinuity byly paralelní se směrem vrstevnatosti, viz Obr. 7a. Normálové napětí se pohybovalo od 0 do 600 kPa. Aparatura obsahovala dva hydraulické válce (Obr. 7) s kapacitou 500 kN a max. zdvihem 50 mm, které vyvíjely smykové napětí a normálové



Obr. 6 – Postup přípravy těles v horninovém masivu a znázornění samotné přímé smykové zkoušky *in-situ*. (a) Nejprve se tělesa ve svahu šetrně opracovala kamennou pilou tak, aby nedošlo k porušení horninového masivu. Následně se zbytky okolního masivu odtěžily ručně pomocí pneumatického kladiva a jiných pomůcek. (b) Nerovnosti na boku tělesa se zahladili maltou a byl instalován snímač pro měření posunu. (c) Mimo připravené těleso se do masivu instaloval kotelní prvek pro zajištění normálové reakce. Na kotelní systém instalovali H-průvlak ve vodorovné poloze sloužící jako rám pro zajištění aplikace zpětného napětí. (d) Na kontakt smykové aparatury se zkoušeným tělesem se umístili dvě ocelové desky, mezi kterými bylo rozmístěno několik set ocelových kuliček s průměrem 12 mm. Kuličky měly snížit tření během zkoušky. (e) Následně se nad a za těleso umístili hydraulické válce pro aplikaci zatížení. (f) Po skončení zkoušky a demontáži aparatury byl zaznamenán stav a rozměry smykové plochy. Zdroj: Tan et al., 2021.

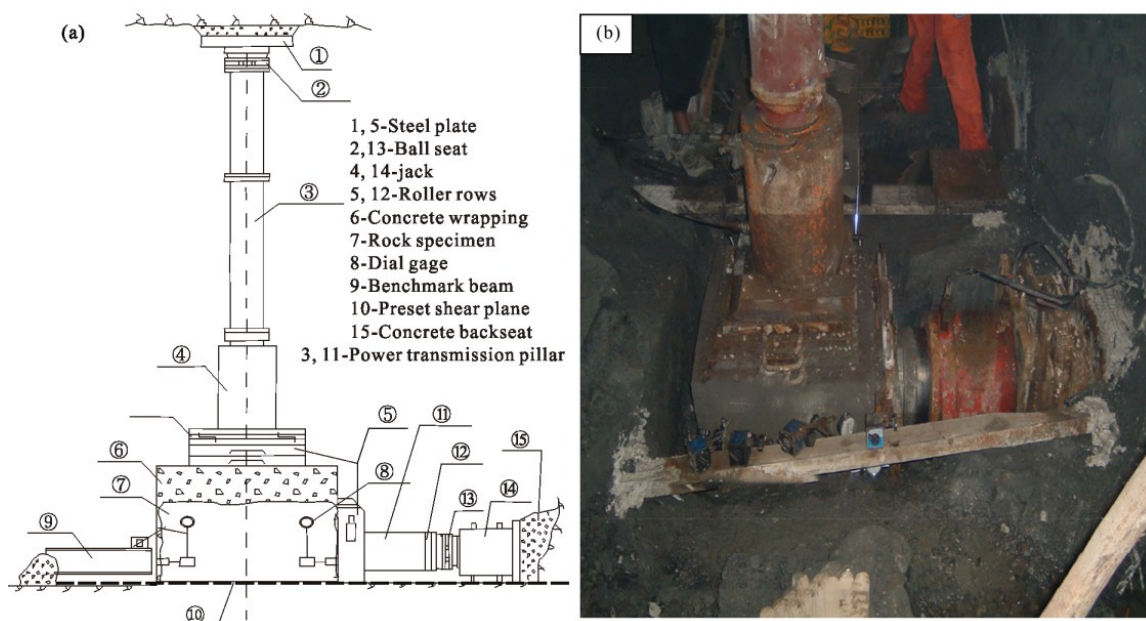
napětí. Hydraulické válce byly před zkouškou kalibrovány. Smykový posun byl měřen úchylkoměry s rozsahem měření 30 mm. Po celou dobu zkoušky bylo normálové napětí konstantní. Podrobnější popis aparatury pro *in-situ* přímou smykovou zkoušku prováděnou na odkrytém svahu je uveden na Obr. 7.



Obr. 7 - Schéma aparatury pro *in-situ* přímou smykovou zkoušku. Jsou znázorněny dva pohledy: (a) boční, (b) zadní. Na pohledu (a) je vidět zapření bočního hydraulického válce (hydraulic jack) o zakotvený betonový blok (concrete base – betonový blok, bolt – kotva). Také na pohledu (a) je znázorněná orientace ocelových ploch (steel plate) s kuličkami (steel ball) paralelně s vrstevnatostí břidlice (slate) a tendencí k porušení (tendency of structural plane). Na pohledu (b) je znázorněné ukotvení H-průvlaku (steel beam) pomocí dvou kotev pro zapření druhého vertikálního hydraulického válce. Tyto kotvy se stabilizovaly do podložního masivu (base rock) pomocí cementové injektáže (grouting) do hloubky 30 cm. Zdroj: Tan et al., 2021

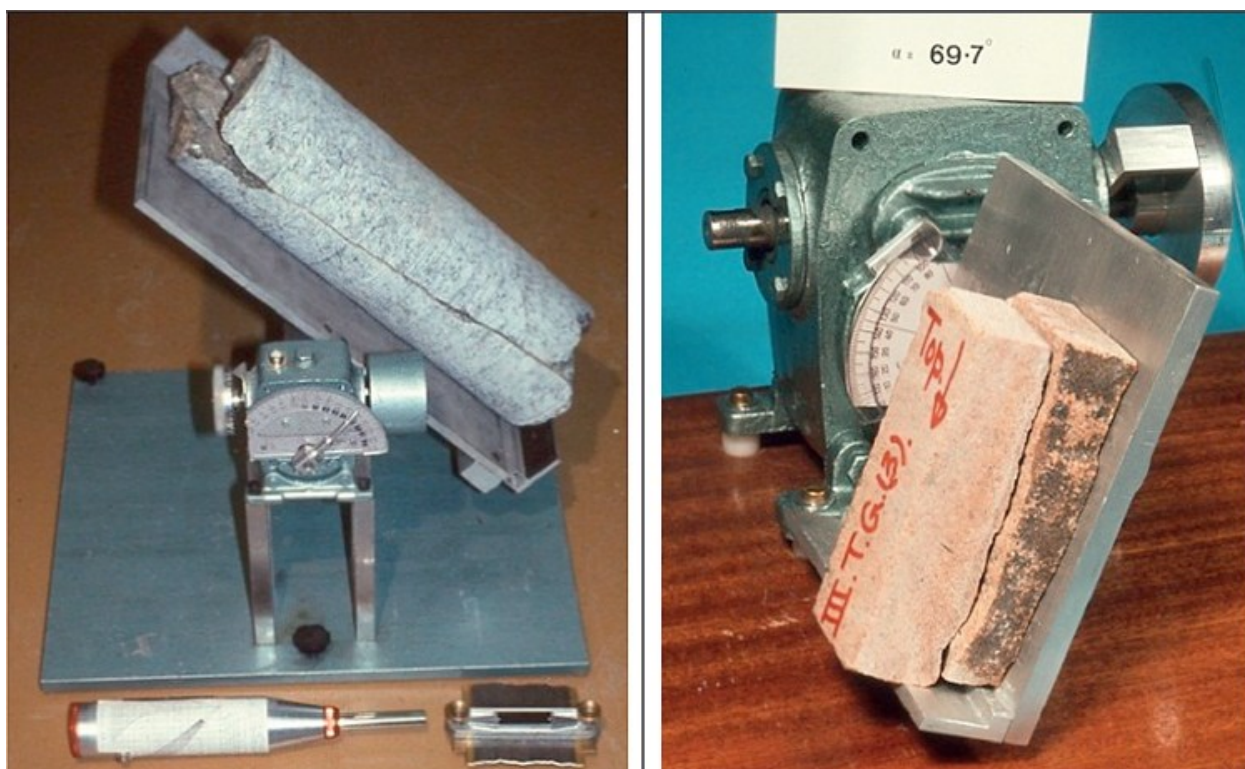
Jak již bylo uvedeno, *in-situ* přímé smykové zkoušky se dají provádět i v podzemních štolách. Jedním z příkladů jejich využití bylo v projektování druhé největší přečerpávací vodní elektrárny na světě – elektrárny Baihetan, která se nachází na řece Jinsha v provincii S'-čchuan v Číně. V rámci projektu se prováděla analýza smykového chování čediče se sloupcovitou odlučností, který se vyskytoval v základové spáře, na náběhovém svahu nádrže a ve vyrovnávací komoře elektrárny. *In-*

*situ* přímé smykové zkoušky sehrály důležitou roli při hodnocení smykových vlastností daného čediče (Xia et al., 2023). Xia et al. (2023) provedli v deseti různých štolách 21 sad *in-situ* přímých smykových zkoušek. Hlavním cílem zkoušek bylo posoudit vliv typu čediče (rozdíl v celistvosti), orientace smykové plochy a velikosti vzorku na smykové parametry pevnosti čediče. Zařízení pro uskutečnění přímých smykových zkoušek ve štolách se skládalo ze zatěžovacího systému a systému měření deformací zahrnující hydraulický zvedák, tlakoměr, rameno přenášející sílu, úchylkoměry a další pomocná vybavení (Obr. 8). Při zkouškách bylo normálové zatížení aplikováno po 5 stupních se stejným přírůstkem. První hodinu se hodnoty odečítaly po 15 minutách, poté každých 30 minut. Smykové zatížení bylo zahájeno, jakmile normálová deformace klesla pod 0,05 mm/h. Smykové zatížení bylo aplikováno po 8 stupních, přičemž každý stupeň se aplikoval po 5 minutách. Měření deformací horizontálních a vertikálních probíhalo do porušení vzorku. Po skončení zkoušky smykové pevnosti (po porušení vzorku) se zařízení uvolnilo a resetovalo a byla následně provedena ještě zkouška tření po vzniklé smykové ploše. Zkouška reziduální pevnosti na vzniklé smykové ploše se prováděla stejným způsobem jako předchozí přímá smyková zkouška (Xia et al., 2023).



Obr. 8– Přístroj pro *in-situ* přímé smykové zkoušky. (a) Schéma a popis částí přístroje: 1,5 – ocelové plochy, 2,13 – kuličkové sedlo, 4,14 – hydraulický válec, 5,12 – řady válečků, 6 – betonové opláštění, 7 – horninový vzorek, 8 – úchylkoměr, 9 – referenční nosník, 10 – stávající smyková plocha, 15 – zadní opěrný betonový prvek, 3, 11 – pilíř přenosu sil. Obrázek vpravo (b) znázorňuje použití smykové aparatury v praxi v jedné ze stol. Zdroj: Xia et al., 2023

### 3.1.2. Náklonové zkoušky (*tilt tests*)



Obr. 9 – Náklonové zkoušky prováděné v laboratorním prostředí s naklápěcím mechanismem a úhloměrem pro odečtení úhlu náklonu. Na levém obrázku je pod naklápěcím mechanismem v levé spodní části vidět Schmidtovo kladivo (měření JCS) a profilovací nebo také Bartonův hřeben v pravé spodní části (kapitola 3.2.2). Zdroj: Barton, 2013

Princip náklonové zkoušky naznačuje Obr. 9 a Obr. 21, kdy se horninový vzorek s diskontinuitou naklápí tak dlouho, dokud nedojde ke klouzání nadložního bloku dolů podél diskontinuity. Úhel, při kterém dojde k pohybu, se při zkoušce zaznamená a je označován jako úhel náklonu  $\alpha$ . Tento úhel bývá zpravidla o  $40^\circ$  až  $50^\circ$  větší než reziduální úhel tření  $\varphi_r$  a to v důsledku výrazného vlivu geometrie povrchu diskontinuity (Baron a Choubey, 1977). Barton a Choubey (1977) definovali  $\alpha$  jako jednoduchý vztah (rovnice 14):

(14)

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tau_0}{\sigma_{n0}}\right)$$

kde  $\tau_0$  je smykové napětí a  $\sigma_{n0}$  je normálové napětí, které působí na diskontinuitu a je generováno silou horní poloviny bloku.

Normálové napětí  $\sigma_{n0}$  vyjádřili jako:

(15)

$$\sigma_{n0} = \gamma b \cos^2 \alpha$$

kde  $\gamma$  je objemová hmotnost horniny ( $\text{kN/m}^3$ ) a  $b$  je tloušťka horní poloviny bloku (m).

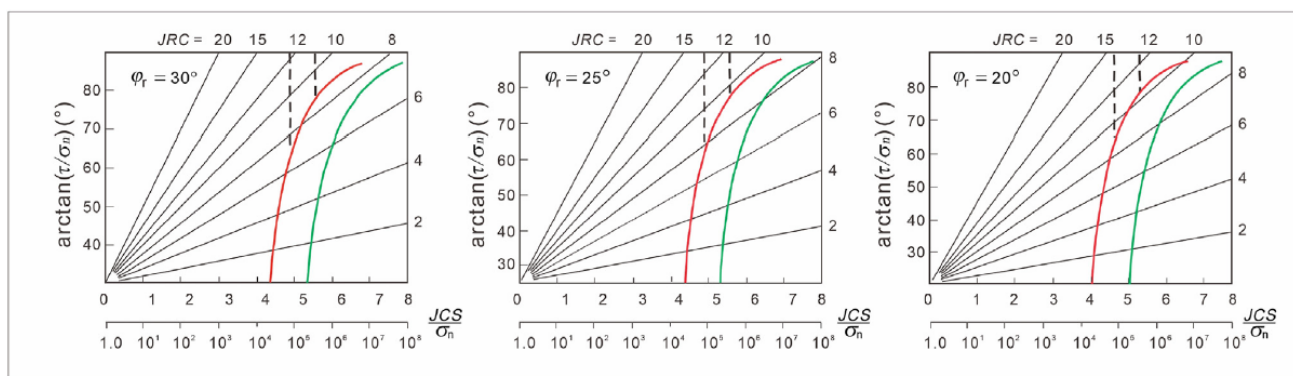
Tato rovnice (15) automaticky omezuje použití náklonového testu na dostatečně hladké diskontinuity, aby nedošlo k porušení vlivem překlopení horního bloku. Zkouška by se měla provádět pouze na suchých diskontinuitách, proto i JCS se měří za sucha.

Hodnota JRC se následně vypočítá dle rovnice (16) s použitím substituce hodnot  $\alpha$  a  $\sigma_{n0}$ :

(16)

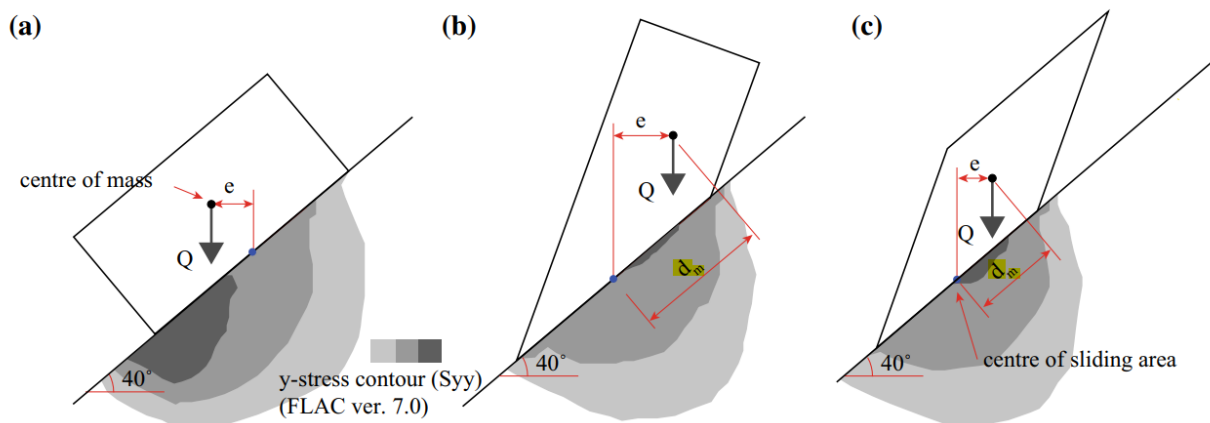
$$JRC = \frac{\alpha - \varphi_r}{\log_{10}(JCS/\sigma_{n0})}$$

Při experimentální studii Barton a Choubey (1977) zkoušku náklonu prováděli na 57 vzorcích diskontinuit. Na každé z nich uskutečnili 3 náklonové zkoušky, ze kterých vypočítali průměrnou hodnotu JRC. Zkouškami odvodili mez použitelnosti náklonových testů v souvislosti s drsností povrchu diskontinuity (Obr. 10). Konkrétně v jejich studii byla maximální hodnota JRC, kterou bylo možné z laboratorních náklonových zkoušek získat, přibližně 8. Ale domnívají se, že v terénu na silně zvětralých diskontinuitách by byla maximální získaná hodnota JRC alespoň 10. Také uvádějí, že omezení náklonových zkoušek nemají ve většině případů velký význam, neboť většina stabilitních problémů je způsobena hladšími diskontinuitami.



Obr. 10 – Meze použitelnosti náklonových zkoušek (tilt tests) a tažných zkoušek (push-pull tests). V případě náklonových zkoušek je červená křivka pro „terénní“ vzorky s tloušťkou horní poloviny vzorku =  $b = 20$  cm a zelená pro „laboratorní“ vzorky s  $b = 2$  cm. Při pohledu na křivky je zřejmé, že z náklonových zkoušek jde uspokojivě získat zhruba hodnotu  $JRC = 8$ . Tečkovanými čarami jsou zobrazeny meze použitelnosti tažných zkoušek. Tečkovaná čára vlevo je pro  $b = 20$  cm a vpravo pro  $b = 2$  cm. Tažnými zkouškami jde uspokojivě vyhodnotit JRC do hodnoty 12. Zdroj: Barton et al., 2023 podle Barton a Choubey, 1977

Výsledky náklonových testů může ovlivnit samotný tvar vzorku, jak zjistil ve své studii Kim et al. (2016). Ti zkoumali vliv tvaru jádrově odvrtaných horninových vzorků na jejich smykové chování během náklonové zkoušky (Obr. 11). Tvary jader byly ve dvourozměrném zobrazení klasifikovány na základě jejich bokorysu do tří kategorií: obdélníkové, rovnoběžníkové a lichoběžníkové. Po zjištění vlivu tvaru vzorků na základní úhel vnitřního tření  $\varphi_b$  a normálové napětí  $\sigma_n$  navrhli korekční funkce, které umožňují zlepšit přesnost jejich odhadu. Navržená funkce pro redukci  $\sigma_n$  umožňuje zlepšit přesnost odhadu hodnot JRC při zohlednění tvaru vzorků. Proto Kim et al. (2016) doporučují zohledňovat tvary použitých vzorků při naklápěcích testech. Kim et al. (2016) také ověřili, že náklonovou zkoušku je možné provádět na vzorcích s hodnotou JRC <8-10. Vzhledem k rozsahu práce zde není studie Kim et al. (2016) detailněji rozebrána, podrobnosti týkající se korekčních funkcí viz Kim et al. (2016, str. 3052-3053).



Obr. 11 – Rozdělení vzorků podle tvaru na tři kategorie: (a) obdélníkové, (b) rovnoběžníkové, (c) lichoběžníkové. Obrázky znázorňují polohu těžiště (centre of mass) černou tečkou v každém ze vzorků a polohu středu smykové plochy (centre of sliding area) modrou tečkou. Vzdálenost  $e$  vyjadřuje excentricitu geometrie bloku a vzdálenost  $dm$  vyjadřuje vodorovnou vzdálenost těžiště od středu smykové plochy a  $Q$  je hmotnost vzorku. Na základě vztahu mezi hodnotou  $dm$  a úhlem náklonu ( $40^\circ$ ) byla navržena regresní křivka sloužící pro korekci hodnot  $\varphi_b$ ,  $\sigma_n$  a následně i JRC na tvar vzorku. Šedé barvy jsou kontury napětí ve směru osy  $y$  v oblasti základny. U obdélníkového bloku (a) se koncentruje napětí v oblasti čelní hrany. Koncentrace napětí u bloků (b) a (c) jsou posunuta směrem k zadní hraně vzorku, kvůli poloze těžiště. Zdroj: Kim et al., 2016

### 3.1.3. Tažné zkoušky (push – pull tests)

V českém jazyce nemáme pro „push – pull“ testy český ekvivalent. Protože princip zkoušky je tažení horního bloku horniny po povrchu diskontinuity pomocí např. tažného aparátu (Obr. 12), jsou v této práci „push – pull“ testy označovány jako tažné zkoušky. Tažné zkoušky jsou obdoba smykových translačních zkoušek, kde normálové napětí je produkováno pouze vrchní částí bloku. Jako u smykových zkoušek je u tažných zkoušek vyvíjena vnější smyková síla, která posunuje horní část vzorku rovnoběžně s diskontinuitou, zatímco spodní část zůstává nehybně ve vodorovné poloze.

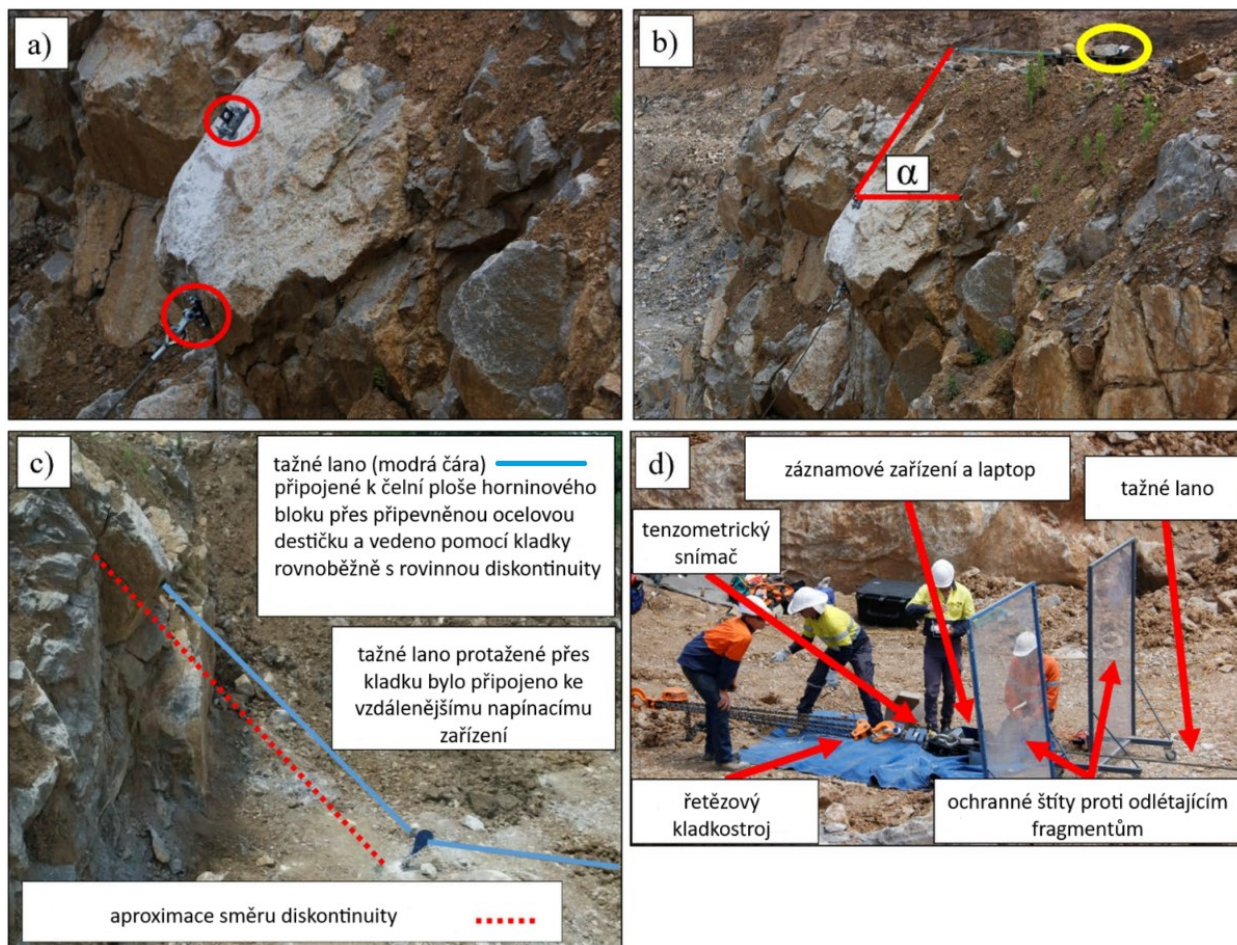
Tažnými zkouškami lze spolehlivě určit hodnoty JRC u hrubších diskontinuit (Barton et al., 2023). Barton a Choubey (1977) ve svém výzkumu prováděli tažné zkoušky na vzorcích s hodnotou JRC mezi 8 a 12. Přibližný rozsah tažných testů je znázorněn tečkovanou čarou na Obr. 10. Jak sami uvedli, v jejich sérii vzorků šlo uspokojivě určit JRC do hodnoty maximálně 12. Zatímco v terénních podmínkách, kde se pracuje s většími bloky či silně zvětralými diskontinuitami, lze díky snížení poměru  $JCS/\sigma_n$  až o dva řády testovat diskontinuity s JRC o velikosti až 20. Kombinací náklonových a tažných zkoušek lze testovat celý rozsah drsnosti.

V experimentu Barton a Choubey (1977) z náklonových testů na 57 vzorcích nejhladších diskontinuit vypočítali průměrnou hodnotu JRC jako 5,4. Zpětná analýza smykových zkoušek ukázala průměrnou hodnotu JRC ve výši 5,5. U tažných zkoušek na 45 hrubších diskontinuitách byla průměrná hodnota JRC stanovena na 9,9, zatímco hodnota získaná z přímé smykové krabice činila 9,3. Autoři dále v rámci analýzy odchylek v predikovaných hodnotách  $\arctan(\tau/\sigma_n)$  poukazují na to, že pro reprezentativní hodnoty nelze testovat diskontinuity pouze jednou na jednom odebraném vzorku. Pokud otestujeme z jedné diskontinuity více jak 5 vzorků, průměrná chyba se radikálně zmenší. Na základě výsledků jejich experimentu vyplývá, že nejlepší je otestovat 10 a více vzorků jedné diskontinuity pro výsledky ovlivněné relativně malou přijatelnou chybou predikce.

Pro představu, jak by se mohla provádět v praxi tažná zkouška *in-situ*, zde zmíním studii od Butcher et al. (2025). Ti ve své studii prováděli velkorozměrovou *in-situ* tažnou zkoušku pro stanovení *in-situ* smykové pevnosti. JRC ve studii stanovili výpočtem z parametru  $Z_2$  (viz konec kapitoly 2), protože jejich práce nebyla zaměřená na parametr JRC ale na předpověď smykové pevnosti. JRC by se dalo zpětně vypočítat jako u přímých smykových zkoušek z rovnice (13). Ve studii byla prováděna velkorozměrová *in-situ* tažná zkouška na šikmé diskontinuitě v lomu na vápenec v Novém Jižním Walesu. Diskontinuita byla způsobena odstřelem na čelbě lomu. Byla ukloněna pod úhlem  $\alpha = 46,5^\circ$  (upraveno podle Butchera et al., 2025).

Při velkorozměrové *in-situ* tažné zkoušce smykali Butcher et al. (2025) horní část vzorku po diskontinuitě pomocí připevněného tažného lana na čelní stranu vzorku (Obr. 12a). Tažné lano vedlo rovnoběžně se směrem diskontinuity pomocí kladky k vzdálenému napínacímu zařízení (Obr. 12c). Vzorek byl osazen drátovými potenciometry měřícími posuny (Obr. 12b). Tah v laně byl měřen pomocí tenzometrického snímače (Obr. 12d). Napínání lana bylo provedeno pomocí řetězového kladkostroje (Obr. 12d) a ukotveného 20tunového bagru, který sloužil jako zátěžové kotvení. Zaznamenané maximální napětí v laně bylo 42,8 kN. V okamžiku dosažení *in-situ* maximální hodnoty smykové pevnosti se lano přestalo napínat a pozoroval se rychle narůstající posun horní části vzorku po diskontinuitě. Napětí v laně ani nemohlo být udrženo kvůli posunu vzorku. Vzorek se při dosažení maximální *in-situ* smykové pevnosti posunul o zhruba 1 mm. Kvůli sklonu diskontinuity se

horní blok převrátil dříve, než byly dosaženy reziduální podmínky. Stanovené *in-situ* smykové napětí bylo 27,1 kPa.



Obr. 12 – Popis rozmístění tažné aparatury pro tažnou zkoušku *in-situ*. Na obrázku (a) jsou v červeném kroužku vyznačeny dvě ocelové destičky s očky připevněné na horní a čelní plochu horní části vzorku, která bude smýkána tažením po diskontinuitě. Destičky jsou připevněné chemickými kotvami Chemset ke vzorku. Obrázek (b) popisuje červenými čarami napojení na vzorek a sklon (a) kabelů propojující potenciometry (ve žluté elipse) se vzorkem. Kabely jsou skloněny přibližně rovnoběžně s rovinou diskontinuity, aby bylo možné zanedbat geometrickou korelaci naměřeného posunu. V části (c) je popsáno, jak se vedlo tažné lano. Na obrázku (d) je znázorněna část napínací aparatury kromě připojení řetězového kladkostroje na ukotvený bagr – zátěžové kotvení. Také můžeme vidět ochranu obsluhy zkoušky a záznamových zařízení v podobě štítů rozmístěných okolo napínacího zařízení 25 m od vzorku horniny. Zdroj: Butcher et al., 2025

### 3.2. Kontaktní metody měření a vizuálního určení JRC

V předchozí kapitole jsme se věnovali způsobům stanovení JRC prostřednictvím smykových zkoušek, nyní se zaměříme na metody založené na měření povrchové drsnosti pro získání parametru JRC. Pro přesné měření drsnosti je nejideálnější měřit na zdravých nezvětralých diskontinuitách *in-situ* nebo vzorcích z jádrového vrtání v laboratorních podmínkách, tedy pokud jsou dostupné (Barton et al., 2023). Kontaktní metody vyžadují přímý kontakt s povrchem horniny pro získání hodnot JRC.

V této kapitole budou rozebrány nejdůležitější a nejčastěji používané kontaktní metody jako je metoda amplitudy a rovné hrany a její modifikace a odebírání profilů pomocí profilovacích hřebenů či profilometrů. Ze získaných profilů se JRC může získat metodou amplitudy a přímé hrany nebo vizuálním porovnáním se standardními profily definovanými Bartonem a Choubeyem (1977). Metoda vizuálního porovnání zde bude blíže rozepsána a navazuje na ni praktická část v kapitole 5.2, která pojednává o subjektivitě této metody.

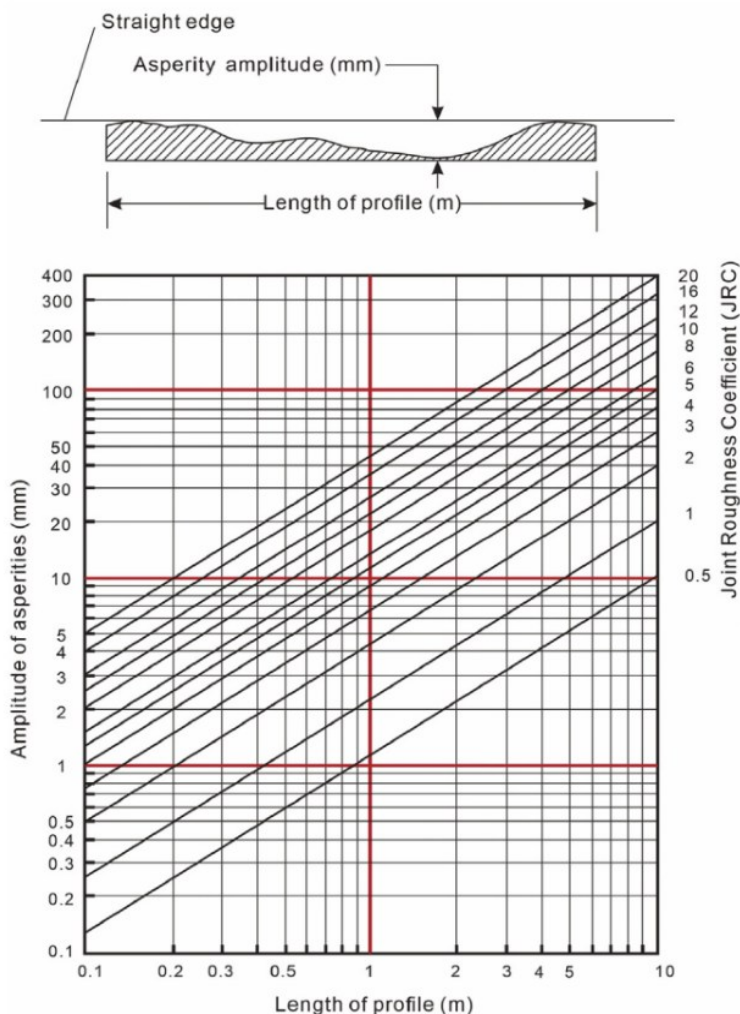
### 3.2.1. Metoda amplitudy a rovné hrany (*Straight edge method*)



Obr. 13 – Příklad měření JRC v terénu na průběžné diskontinuitě v lomu Zdechovice pomocí metody amplitudy a rovné hrany. Rovnou hranu zde reprezentuje rovnoměrně uříznutá lať s délkou hrany 20 cm. Velikost amplitudy se měří pomocí digitální šuplery podél latě a zaznamenává se největší naměřená hodnota. Na základě největší hodnoty amplitudy a známé délky profilu se určí velikost hodnoty JRC.

Barton (1982) v souladu s výzkumem efektu měřítka na smykovou pevnost diskontinuit vyvinul metodu odhadu JRC v odpovídajícím měřítku v terénu. Pomocí rovné hrany se měří největší odchylka neboli amplituda ( $a$ ) drsnosti od této referenční hrany, která má délku ( $L$ ) od 10 cm po několik metrů (Obr. 13). Porovnáním zjištěných hodnot amplitudy za dané délky je možné extrapolovat hodnoty JRC z laboratorních měřítek na velikost diskontinuit v *in-situ* podle Obr. 14. Právě jako vhodná velikost vzorku pro zkoušky se jeví přirozená velikost diskontinuit (Barton a Choubey, 1977; Bandis et al., 1981; Barton, 1982), podrobněji viz kapitolu 4.1. Metodu odhadu JRC z Obr. 14 Barton (1982) vyvinul na základě odvozených vztahů (Tab. 1) z analýz zhruba 200 profilů

drsnosti o délce 10 cm z prací Bartona a Choubeyho (1977) a replikách diskontinuit od Bandise et al., (1981).



Obr. 14 – Obrázkové vysvětlení metody amplitudy a přímé hrany (straight edge), kdy vrchní menší obrázek vysvětluje měření amplitudy zvlnění povrchu od přímé hrany. Diagram vztahu amplitudy nerovností (amplitude of asperities), délky profilu (length of profile) a JRC. JRC se získá odečtením podél čar v diagramu pomocí změřené hodnoty amplitudy a známé délky profilu. Diagram také slouží pro extrapolaci hodnot JRC pro delší profily. Zdroj: Barton et al., 2023 podle Barton, 1982.

$$\text{JRC} = 400a/L \quad \text{pro} \quad L = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{JRC} = 450a/L \quad \text{pro} \quad L = 1 \text{ m}$$

$$\text{JRC} = 500a/L \quad \text{pro} \quad L = 10 \text{ m}$$

Tab. 1 - odvozené vztahy z analýz profilů diskontinuit pro sestavení extrapolací tabulky pro odvození JRC metodou amplitudy/délky profilu; podle Barton, 1982

Při měření v terénu může nastat situace, kdy při přiložení pravítka, tj. hrany, dané velikosti se objeví takzvané mezilehlé body dotyku a nižší amplitudy mezi dvěma nejvyššími body měřeného profilu. Nižší amplitudy mezi body dotyku a vzdálenost bodů dotyku by měly být zaznamenány jako tzv. mrak hodnot, který znázorňuje variabilitu hodnot v různých měřících (Barton et al., 2023).

### 3.2.1.1. Modifikovaná metoda přímé hrany

Du et al. (1996) rozšířili Bartonovu metodu přímé hrany na tzv. modifikovanou metodu přímé hrany. Kritizovali původní Bartonovu metodu z důvodu jejího omezení JRC do hodnoty 20. V praxi některé konkrétní vzorky diskontinuit mohou tuto hodnotu přesáhnout. Přesto však platí, že průměrné JRC celého vzorkovacího prostoru nepřesahuje hodnotu 20.

Upravenou metodu přímé hrany Du et al. (1996) odvodili a rozšířili o vliv měřítka z fyzikálního základu metody přímé hrany. Fyzikálním základem metody je podle Du et al. (1996) přímá úměra JRC k amplitudě nerovností ( $a$ ) a nepřímá úměra k délce vzorku  $L$ . Kdy relativní amplituda  $R_A$  klesá s rostoucí délkou (rovnice 17).

(17)

$$R_A = \frac{a}{L}$$

Du et al. (1996) provedli statistickou analýzu dat a zjistil, že měřítkový efekt  $R_A$  odpovídá měřítkovému efektu JRC. Na tomto základě tvrdí, že parametr  $R_A$  v rovnici (18) může reprezentovat vliv amplitudy asperit na měřítkový efekt hodnot JRC. Vliv amplitudy povrchu není jediný parametr ovlivňující měřítkový efekt JRC, ale tento efekt vzniká kombinací vlivu amplitudy povrchových asperity a měřítkového efektu pevnosti stěn diskontinuit v tlaku JCS. Oba tyto parametry Du et al. (1996) zahrnuli do výsledné rovnice (18) modifikované metody přímé hrany, aby kompletně zohledňovala měřítkový efekt JRC.

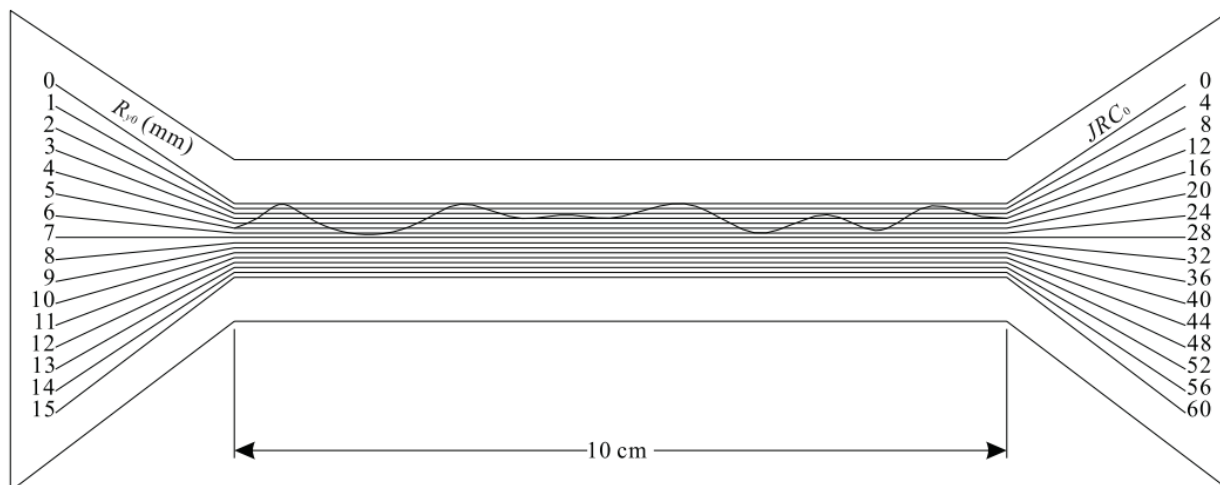
(18)

$$JRC = 49,2114e^{29L_0/450L} \arctan(8a/L)$$

$L_0$  je délka laboratorního vzorku (10 cm). Podle Barton et al. (2023) rovnice (18) s využitím úhlové aproximace  $\tan(i) = i$ , kde úhel  $i = 8a/L$ , poukazuje, že JRC je zhruba 400 až 500násobkem úhlu sklonu asperit prvního řádu, a tedy JRC mu může být úměrné.

Du et al. (2009) se na základě předchozích výzkumů snažili navrhnout ideální metodu měření JRC, která by nebyla časově náročná nebo použitelná pouze v laboratorních podmínkách. Tvrdí, že zásadním předpokladem pro přesnost měření JRC je směrové statistické měření a ideální metody měření by měly být dostatečně přesné s nízkou hmotností přístroje, který se bude jednoduše obsluhovat a bude disponovat rychlostí měření. Metoda by měla být použitelná na statistické měření pro jakýkoliv typ diskontinuity *in-situ*.

Du et al. (2009) vyvinuli jednoduchý profilograf (podrobněji viz kapitolu 3.2.3.), jehož chyba měření amplitudy se pohybuje řádově v 0,1 mm. Tím se snažili omezit chybu, která vzniká při měření amplitudy s rozptylem 1 mm a dokáže zapříčinit chybu ve výsledku v rozsahu až 4 JRC. Spolu s profilografem a na základě principů výše zmiňované modifikované metody přímé hrany vytvořili tzv. základní šablonu drsnosti. Tu lze použít pro určení hodnot  $JRC_0$  z vykreslených profilů o laboratorní délce (10 cm). Šablona se používá stejně jako pravítko, viz Obr. 15.



Obr. 15 – Základní šablona drsnosti vyrobená z organického skla s efektivní délkou 10 cm a šířkou 1,5 cm, tloušťkou 3 mm. Na levé straně šablony jsou hodnoty amplitudy  $R_{y0}$  a na pravé straně odpovídající hodnoty  $JRC_0$ . Šablona je průhledná. Pro určení  $JRC$  se položí na papír s nakresleným profilem tak, aby se nulové měřicí linie dotýkaly dvou a více vrcholů profilu a byly rovnoběžné se středovou osou profilu. Odečte se hodnota největší amplitudy  $R_{y0}$  v levém sloupci podle měřicích linií a ta odpovídá podle pravého sloupce hodnotě  $JRC_0$ . Zde je hodnota  $JRC_0$  26. Měřítka zobrazené šablony zde neodpovídá 10 cm. Zdroj: Du et al., 2009

Pro měření  $JRC_n$  na profilech diskontinuit s libovolnou délkou vzorkování navrhli Du et al. (2009) také vícerozměrovou šablonu (Obr. 16), která je založena na základě rovnice (18). Vícerozměrová šablona je opět vyrobena z organického skla. Funguje na stejném principu s postupem měření jako základní šablona pro deseticentimetrové laboratorní profily. Podrobnější informace viz práce Du et al. (2009) str. 893-894.

Svou metodu stanovení  $JRC$  Du et al. (2009) ověřili podle odchylky hodnot smykové pevnosti stanovených ze smykových zkoušek a z výše popsaného empirického odhadu. Odchylka mezi těmito dvěma způsoby stanovení smykové pevnosti činila 9,67 %. Došli k závěru, že popsaná metoda a použité měřicí zařízení jsou spolehlivé a použitelné v praxi.



### 3.2.2. Profilovací hřeben

Ve studii nového kritéria pevnosti od Bartona a Choubeyho (1977) byly získány ze 136 horninových vzorků profily pomocí pomůcky, která se používá v řemeslech na přenesení profilů pro různé řezání lišt, kobereců apod. Tuto pomůcku lze v řemeslných oborech nazývat jako profilovou měrku či obrysovou šablonu s ocelovými jehlami. V oboru mechaniky hornin tento jednoduchý nástroj známe pod jménem profilovací hřeben či Bartonův hřeben (*Barton Comb*, Obr. 17), právě díky používání této metody odběru profilů diskontinuit od 70. let Bartonem. Avšak tato metoda odběru profilů se používá hojně do dnes. Barton et al. (2023) tvrdí, že rozlišení hřebenu 4 jehlice na 1 mm, tj. 0,25 mm, je dostatečné rozlišení pro měření drsnosti diskontinuit. Je třeba podotknout, že omezení rozlišení vzorkování u profilovacího hřebenu je průměr jeho jehly, neboť body (špičky jehel) nemohou být k sobě blíže, než je průměr jehel. Práce s hřebem je velmi jednoduchá. Jedna strana hřebenu se přitlačí k povrchu podél chtěného profilu, díky působící síle se jehličky zatlačí podle morfologie povrchu a vznikne tak odebraný profil (Obr. 17). Bohužel lze komerčně tento nástroj najít v omezených délkách profilu nejčastěji 15 cm a 30 cm.



Obr. 17 – Profilovací hřeben s délkou 15 cm. Na centrální černé části hřebenu je měřící stupnice v centimetrech, která na obrázku není vidět kvůli světlu. Obrázek znázorňuje použití profilovací hřebenu za účelem získání detailního profilu drsnosti z povrchu diskontinuity.

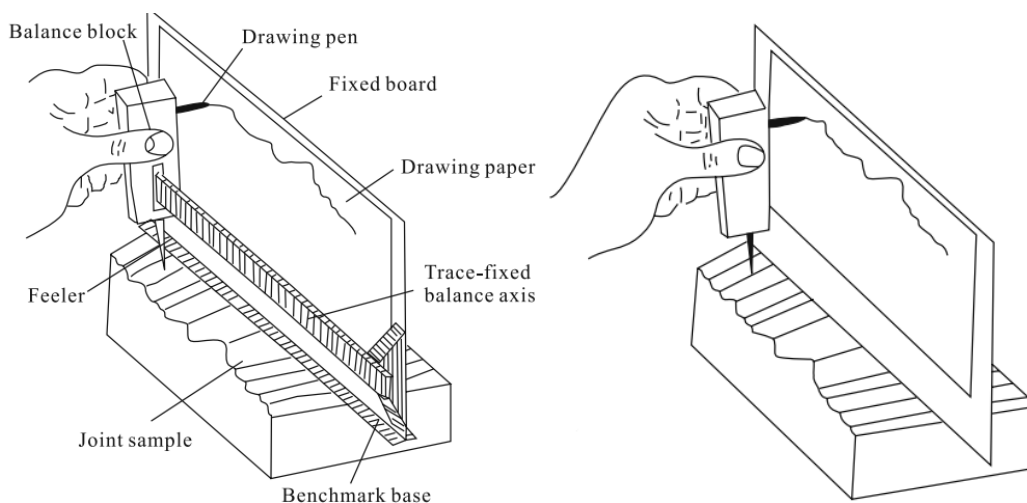
V práci od Alameda – Hernández et al. (2014) představili novou metodu digitalizace profilu založenou na odebrání povrchu profilu právě profilovacím hřebem. V terénu hřebem dlouhým 15 cm s jehlami o průměru 0,8 mm odebrali 117 profilů. Každý profil na hřebeni vyfotografovali tak, že se hřeben přiložil na světlou průsvitnou fólii (stačila krabička od svačiny), která se z druhé strany

nasvítila zdrojem světla např. slunečním svitem. Fotografie poté mimo terén zpracovávali v programu MATLAB, díky kterému vypočítali JRC profilů. Podrobnější informace viz Alameda-Hernández et al. (2014, kapitola 2, *The New Survey Method*)

### 3.2.3. Profilometry

Profilometr je mechanické zařízení, které je v přímém kontaktu s povrchem diskontinuity. Při pohybu profilometru podél měřeného profilu zaznamenává zařízení tvar povrchu např. na papír pomocí válečku či hrotu, který je v přímém kontaktu s diskontinuitou. Přesnost záznamu závisí na průměru válečku nebo hrotu. Při měření se mohou slabší povrchy diskontinuit poškodit. Profilování pomocí mechanických profilometrů se používá běžně především pro odhad drsnosti v malých měřících, tedy pro profily s délkou do pár desítek centimetrů (Barton et al., 2023).

Jeden z prvních profilometrů pro měření v laboratorních i terénních podmínkách byl sestaven na Imperial College Rossem-Brownem a Waltonem (1975) při konstruování přenosné smykové krabice pro testování diskontinuit. Pro správnou interpretaci výsledků smykových zkoušek hodnotili drsnost zkoušených diskontinuit pomocí metody profilování a pozorování posunu vzorku během zkoušek. Zkonstruovaný profilometr zaznamenával kontinuálně profil na papír pomocí kuličky, která se dala obměňovat za menší či větší, a tím bylo možné zaznamenávat různé úrovně drsnosti (Ross-Brown a Walton, 1975). Od té doby se profilometry jakožto jednoduchá mechanická zařízení téměř nezměnily.



Obr. 18 – Profilograf sestrojený Du et al. (2009) s chybou měření amplitudy v rozsahu 0,1 mm; (vlevo) profilograf s osou vedení vyvažovacího bloku pro měření profilů do 10 cm; (vpravo) jednoduchý profilograf použitelný pro zaznamenání profilů větších než 10 cm. Zdroj: Du et al., 2009

Jako další Du et al. (2009) vyvinuli nový profilograf, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.1., který předchází chybě v rozsahu 4 JRC díky přesnosti měření amplitudy řádově 0,1 mm. Podle Du et al. (2009) tato přesnost odpovídá požadavkům na přesnost měření. Profilograf je také lehký, přenosný, malý a snadno ovladatelný a flexibilní pro měření v různých orientacích na diskontinuitě. Skládá se

ze sedmi hlavních částí (Obr. 18 vlevo): hrotu (*feeler*), kreslicího pera, osy vedení pohybu (*trace-fixed balance axis*), vyvažovacího bloku, referenční základny (*benchmark base*), pevně uchycené desky na podepření kreslicího papíru. Referenční základna po přiložení profilometru slouží jako referenční rovina povrchu diskontinuity, ke které se vztahuje amplituda, a také jako podklad pro upevnění desky s papírem. Na papír kreslí pero, které je pevně spjato s hrotem a pohybuje se s ním nahoru a dolů podle povrchu diskontinuity. Hrot a pero propojuje vyvažovací blok, ten zajišťuje kolmost těchto tří komponent k povrchu pevně uchycené desky s papírem. Osa vedení pohybu vede skrz vyvažovací blok, což zajišťuje pohyb bloku pevně po dráze a eliminuje výkyvy pera nahoru a dolů či do stran. Popsaný profilograf má délku 10 cm. Pro měření delších profilů s libovolnou vzorkovací délkou Du et al. (2009) vyvinuli ještě jednoduchý profilograf (Obr. 18 vpravo), který neobsahuje osu vedení bloku.

#### 3.2.4. Vizuální metoda porovnání profilů dle Bartona a Choubeyho (1977)

Barton a Choubey (1977) vytvořili na základě studie tabulku intervalů hodnot JRC a typických profilů pro jednoduché stanovení JRC. Studie zahrnovala 136 vzorků horninových diskontinuit různých drsností i původu, např. 38 vzorků bylo z hrubozrnného granitu, 36 vzorků z jemnozrnného aplitu, ostatní vzorky zahrnovaly různé typy břidlic a rohovců. Každá diskontinuita byla profilována hřebenem ve třech směrech, takže byly na každém vzorku zaznamenány tři profily. Poté se z krabicových smykových zkoušek zpětně vypočítaly hodnoty JRC vzorků. Tyto hodnoty byly rozčleněny do deseti intervalových skupin: 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12, 12-14, 14-16, 16-18 a 18-20. Pro každý interval Barton a Choubey (1977) vybrali nejcharakterističtější profil, ze sady odebraných profilů. Takto dali neúmyslně vzniknout předloze (Obr. 19) pro vizuální stanovení JRC v terénu, která je alespoň v České republice hojně využívána, ale i kritizována odbornou veřejností za vliv subjektivity, která může vést k systematickému zkreslení odhadu JRC (např. Barton et al., 2023). K posouzení hodnot JRC vizuálně porovnáme naměřený profil z terénu s typickými profily a stanovíme přibližnou hodnotu JRC, viz Obr. 20. Tato metoda slouží jako velmi hrubé vodítko ke stanovení intervalu JRC, kdy původně hlavní cíl metodiky studie byl přesný odhad smykové pevnosti (Barton et al., 2023). Vlivem subjektivity se zabývali Beer et al. (2002) a Alameda-Hernandéz et al. (2014), tyto dva články budou podrobněji představeny v kapitole 5.1.





Obr. 20 – Možný způsob stanovení JRC v terénu vizuální metodou podle standardních profilů od Bartona a Choubeyho (1977). Na kontaktu s povrchem diskontinuity a rovnou hranou papírku s měřítkem 10 cm vznikne po přiložení k povrchu diskontinuity prázdný prostor. Díky vizuálnímu zhodnocení velikosti a různorodosti prostoru mezi přímoú hranou papírku a samotným povrchem diskontinuity a porovnáním se standardními profily je terénní pracovník schopen zhruba odhadnout interval hodnot JRC. Terénní měření na fotkách probíhalo v lomu Zdechovice. Foto.: Ing Jan Malík

### 3.3. Bezkontaktní metody

Díky rozšiřování použití výkonnostních výpočetních systémů, umělé inteligence a bezkontaktních měřicích metod v oborech inženýrské geologie a geotechnologie, toto téma přitahuje stále větší pozornost (Barton et al., 2023). Bezkontaktní metody určování JRC jsou charakteristické absencí jakéhokoliv kontaktu s povrchem horniny při měření JRC. Bezkontaktní metody lze blíže specifikovat jako optické metody. Ty jsou prováděny určitými měřicími přístroji (kamery, lasery atd.). Barton et al. (2023) označují optické metody jako jsou fotogrammetrie, zpracování obrazu, skenování strukturním světlem a laserové skenování za efektivní nástroje pro odhad JRC, proto zde budou zmíněny. Tyto metody budou představeny pouze okrajově s ohledem na rozsah této práce. Studie věnující se blíže bezkontaktním optickým metodám určování JRC či obecně povrchové drsnosti by měla vzniknout v příštích letech formou diplomové práce na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky Univerzity Karlovy.

#### 3.3.1. Optické metody

Fotogrammetrie je jednou z bezkontaktních metod pro určování drsnosti povrchů. Umožňuje získávat trojrozměrné informace o povrchu pomocí triangulace z dvou a více dvourozměrných snímků téže scény, pořízených z různých úhlů (Bahaaddini et al., 2022; cit. dle Barton et al., 2023). V této metodě jsou důležité tzv. společné body identifikovatelné na každém snímku, vzdálenost mezi fotografiemi a vzdálenost od fotografovaného objektu. Měření se může realizovat pomocí dronů, fotoaparátů, i mobilním zařízením díky jejich pokročilým fotoaparátům (Greif a Drotár, 2011).

Do oblasti fotogrammetrie spadají dvě metody, které jsou využívány v oblasti měření povrchové drsnosti. Jedna z metod je tzv. SLS (*Structure Light Scanning*) neboli strukturované světelné skenování. Skenery se strukturovaným světlem se skládají ze stereoskopické dvojice kamer a projektoru upevněných na pevné konstrukci. Z SLS metody získáme vysoce kvalitní data s vysokým rozlišením. Metoda je přenosná a lépe využitelná v interiéru na malé až středně velké vzorky. Druhou metodou je rekonstrukce struktury z pohybu (*SfM-Structure from Motion*) v kombinaci s hustým párováním obrazů (*DIM-Dense Image Matching*). Metoda SfM/DIM díky spojování mnoha překrývajících se snímků detekuje a spojuje souřadnice objektu v prostoru. Konkrétně DIM na základě snímků například z běžných uživatelských fotoaparátů generuje 3D mračno bodů (Marsch et al., 2019).

Méně časté využití pro hodnocení drsnosti nachází metoda terestrického laserového skenování TLS. Senzory pro sběr 3D dat se skládají ze tří hlavních součástí, a to vysílací jednotky (laserová dioda), přijímací jednotky a jednotky pro vychylování paprsku (Jutzi a Stilla, 2003, cit. dle Marsch

et al., 2019). Výstupem je mračno bodů nesoucí geometrické i radiometrické informace (Marsch et al., 2019).

Další optickou metodou je laserová profilometrie. Ta využívá odlišnou dobu návratu vyslaných paprsků ke měření výškových rozdílů podél profilu. Laserová profilometrie se neobejde bez vysílací a přijímací jednotky, které jsou při snímání vzorku obvykle upevněny na pohyblivém rámu nad vzorkem a připojené k mechanickému polohovacímu systému. Informace o povrchu vzorku jsou získávány jako příčné řezy povrchu či v předem definovaném rastru (Marsch et al., 2019).

Barton et al. (2023) jako poslední z bezkontaktních/optických metod zmiňuje metodu zpracování obrazu pro kvantifikaci povrchové drsnosti. Tato metoda využívá technologii rozpoznání obrazu a umělé inteligence.

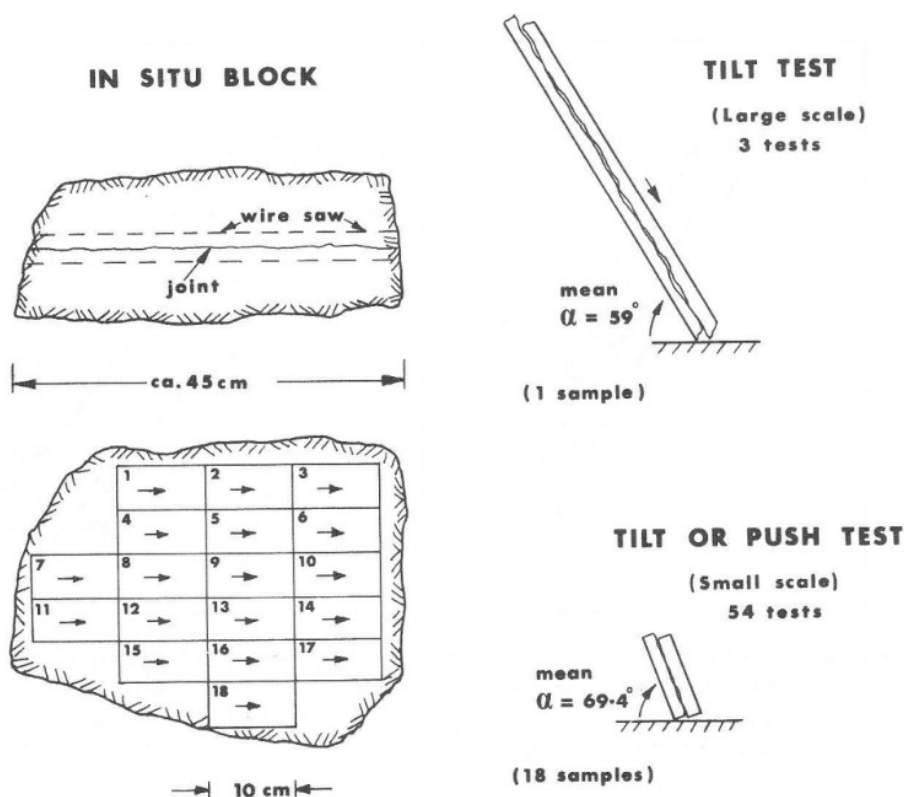
## 4. Vlivy na hodnoty JRC

### 4.1. Vliv měřítka (*scale effect*)

„Scale effect“, překladem do češtiny efekt měřítka, ovlivňuje pevnost a deformovatelnost horninových diskontinuit (Barton a Bandis, 1982; Barton et al., 2023). Při experimentálních testech diskontinuit mohou vycházet různé výsledky pro různé velikosti jedné a té samé diskontinuity.

Již Barton a Choubey (1977) experimentálně potvrdili existenci významného měřítkového efektu na JRC. Pro experiment vybrali diskontinuitu v bloku žuly o rozměrech plochy přibližně 40 x 45 cm. Blok seřezali diamantovým lanovým řezem tak, aby dostali 2,3cm tlusté pláty s oběma plochami diskontinuity, jak je naznačeno na Obr. 21. Diskontinuita byla v této velikosti nejprve testována 3x naklápěcí metodou, kde úhel naklonění ze všech tří pokusů vyšel 59° (viz Obr. 21). Poté si pláty pečlivě označili (např. směr smyku) a nařezali na 18 menších vzorků o rozměrech 4,9 x 9,8 cm, na kterých poté prováděli náklonové testy, tlačné testy a testy ve smykové krabici, a to vše ve stejném směru smyku prvního testování nerozřezané diskontinuity. Výsledky testů prokázaly efekt měřítka. U nerozřezaného vzorku s délkou diskontinuity 45 cm Barton a Choubey (1977) z testů náklonu zpětně vypočítali pomocí rovnice (10) pro tento vzorek hodnotu JRC jako 5,5 a hodnotu  $\arctang(\tau/\sigma_n)$  jako 41,3°. Pro vzorky rozřezané na délky diskontinuity 10 cm vyšly průměrné hodnoty JRC získané zpětnou analýzou ze smykové krabice jako 8,7 a z kombinace náklonového a tlačného testu jako 8,8. Průměrná hodnota  $\arctang(\tau/\sigma_n)$  pro 18 zmenšených vzorků je 48,8° a naměřená 48,5°. Měřítkový efekt velmi výrazně snížil hodnotu JRC z 8,7 (nebo 8,8) pro 10 cm dlouhý profil na 5,5 pro 45 cm dlouhý profil. Také naměřená průměrná hodnota  $\arctang(\tau/\sigma_n)$  klesla ze 48,5° na 41,3°.  $\arctang(\tau/\sigma_n)$  pro kratší vzorky je tedy o 7,2° větší. Ukázalo se, že malé vzorky lépe reagují na menší strmější asperity díky větší volnosti pohybu. Tímto experimentem Barton a Choubey (1977) potvrdili hypotézu, že s rostoucí délkou testované diskontinuity dochází ke snižování hodnot JRC, a tím i ke

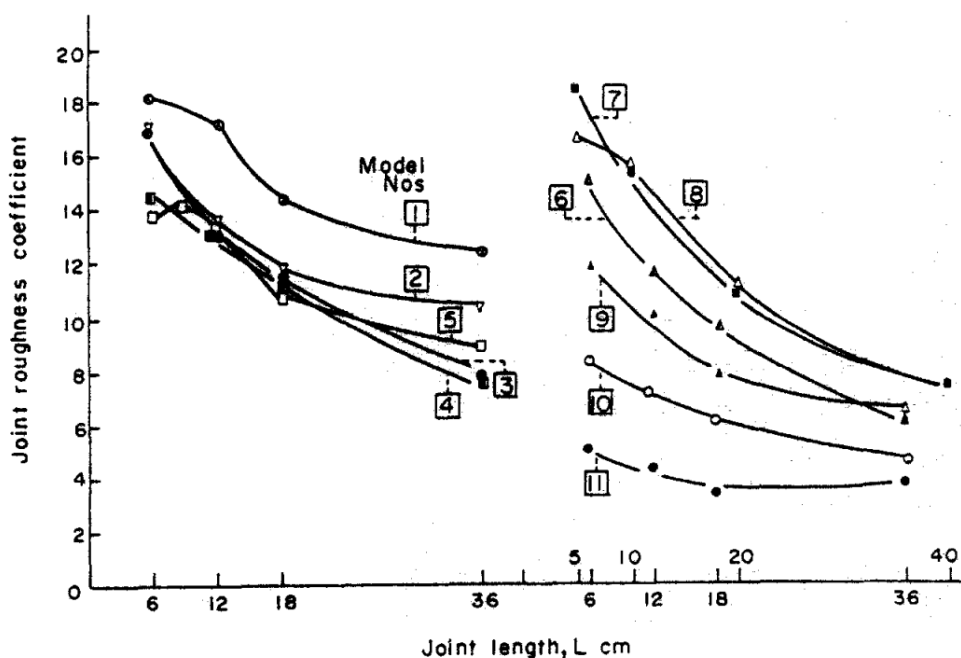
snížení smykové pevnosti. Tento efekt má za následek nadhodnocování smykové pevnosti diskontinuity na vzorcích v laboratorním měřítku.



Obr. 21 - Systém provedení náklonového testu (tilt test) z práce Bartona a Choubeyho (1977) s výsledky pro velký (45 cm) a malý (10 cm) rozměr testovaného vzorku horninové diskontinuity. Daný vzorek (in-situ block) seřízli na požadovaný rozměr diamantovou pilou (wire saw) a nejdříve velkorozměrový vzorek zkoušeli náklonovým testem (tilt test), kdy průměrný (mean) úhel náklonu vyšel  $59^\circ$ . Velkorozměrový vzorek poté nařezali na 18 menších (10 cm) vzorků, které zkoušeli náklonovými i tlačnými zkouškami (tilt or push test). Z těchto zkoušek byl stanoven průměrný úhel náklonu zhruba  $69^\circ$ . Zdroj: Barton a Choubey, 1977

Velký experimentální výzkum měřítkového efektu na smykové chování diskontinuit provedl Bandis et al. (1981) pomocí velmi přesných replik jedenácti přírodních diskontinuit. Repliky byly zhotovené z vícesložkového křehkého materiálu odlitého do pryžových forem s vysokým rozlišením. Zhotovily se odlitím obě strany diskontinuity. Pro odlévání modelových diskontinuit se použila směs stříbrného písku (efektivní průměr zrn =  $d_{50} = 0,25$  mm), kalcinovaný oxid hlinitý ( $d_{50} = 0,062$  mm), baryt, sádra (typu paris) a voda. Hmotnostní poměry složek byly: (baryt + oxid hlinitý) : písek = 1 : 2, oxid hlinitý : baryt = 1 : 3, voda : (baryt + oxid hlinitý + písek) = 1 : 4. Po odlití se repliky daly vysušit na  $50-55^\circ\text{C}$  na dobu 2-4 dní. Modelové diskontinuity zahrnovaly od drsných zvlněných až po téměř hladké až rovinné povrchy. Bandis et al. (1981) zkoumali měřítkový efekt nejenom na JRC, ale i na JCS, vrcholový smykový posun (*peak shear displacement,  $d_{hp}$* ), vrcholovou dilataci, komponentu selhání nerovností, mezní pevnost a další (Obr. 24). Přímé smykové zkoušky se provedly na modelech

diskontinuit v plné délce 36-40 cm. Pak se tyto modely rozdělily do sad menších vzorků o délkách 5-6 cm, 10-12 cm, 18-20 cm. Menší repliky vzorků byly testované ve smykové krabici pro zeminy typu Wykeham Farrance WF 25300 a větší vzorky ve speciálně zkonstruovaném přímém smykovém přístroji. Při testování kladli důraz na zachování stejné horizontální základny a stejného zatížení normálovým napětím ( $\sigma_n$ ) o hodnotě přibližně 1,0 MPa (tj.  $JCS/\sigma_n \approx 80$ ). Ze smykových zkoušek hodnoty JRC zpětně vypočítali dle rovnice (10). Experimentem opět potvrdili, že hodnoty JRC se snižují s délkou diskontinuity (Obr. 22) a zjistili že pro rovinné diskontinuity se hodnoty JRC snížily maximálně o 1,3 a pro drsné diskontinuity maximálně o 11,2. Bandis et al. (1981) dospěli k závěru, že velikost efektu měřítka závisí na typu drsnosti. Maximální vlivy měřítka jsou spojeny s diskontinuitami s drsným a vlnitým povrchem, a naopak nejmenší vliv má měřítka na téměř hladké diskontinuity. Pro nejexaktnější experimentální výsledky doporučují testovat či analyzovat vzorky o velikostech přirozených bloků *in-situ*, které jsou definovány rozestupem příčných diskontinuit. To ale v mnoha případech není možné kvůli velkým nákladům na technicky složité velkorozměrové zkoušky bloků *in-situ*. Podle Bandise et al. (1981), jak vyplývá z Obr. 23, je možné přibližně odhadnout velikost vlivu měřítka, jakmile je známa hodnota  $JRC_0$  (z laboratorních vzorků).



Obr. 22 - Vliv měřítka na hodnoty JRC pro 11 typů diskontinuit při různých délkách. JRC zpětně vypočítáno dle rovnice (10) s použitím hodnot JCS opravených o vliv měřítka. Hodnoty JRC se pro rovinné diskontinuity snížily maximálně o 1,3 a maximálně o 11,2 pro drsné diskontinuity. Zdroj: Bandis et al., 1981

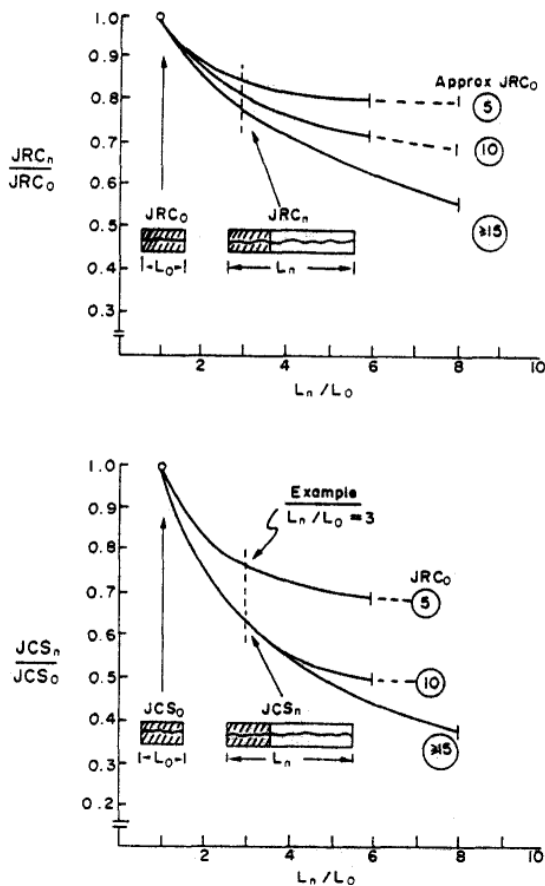
Později Barton a Bandis (1982) navázali na práci Bandise et al. (1981) a odvodili rovnice (19) a (20) pro extrapolaci hodnot JRC a JCS na různých délkách diskontinuit, především pro měřítka vzorků z *in-situ*. Rovnice získali ze smykových testů na blocích s rozsahy velikostí od 10 cm po 1 m, přičemž předpokládali lineární přizpůsobení efektivního normálového napětí.

(19)

$$JRC_n \cong JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02JRC_0}$$

(20)

$$JCS_n \cong JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03JCS_0}$$



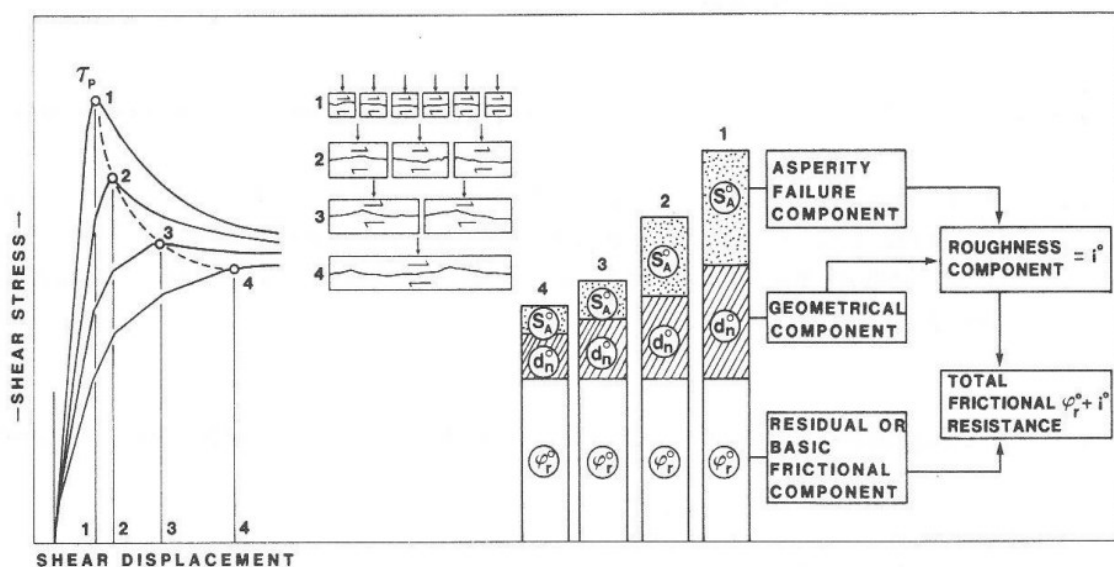
Obr. 23 - Shrnutí vlivu měřítka na JRC a JCS v bezdimenzionální formě. Z grafů je vidět klesání hodnot poměrů  $JRC_n/JRC_0$  a  $JCS_n/JCS_0$  se zvětšující se délkou vzorku ( $L_n/L_0$ ) až do predikovaného ustálení (čárkovaná čára). Hodnoty v kroužku jsou aproximované hodnoty JRC (5, 10 a  $\geq 15$ ). Pro příklad (example) je v grafu vyznačena čárkovanou svislou čarou oblast na křivkách, která odpovídá  $L_n/L_0 = 3$ . Zdroj: Bandis et al., 1981

Parametry  $JRC_0$  a  $JCS_0$  jsou parametry JRC a JCS změřené v laboratoři na vzorcích při laboratorní délce  $L_0 = 10$  cm. Zatím co parametry  $JRC_n$  a  $JCS_n$  jsou hodnoty extrapolované na požadovanou délku  $L_n$ , u které se očekává, že bude odpovídat velikosti bloků *in-situ*. Jak jde vidět z rovnice (20), tak měřítkový efekt nepostihuje jenom parametr JRC (rovnice 19), ale i další parametry smykové pevnosti jako je například JCS, které se také s velikostí bloku snižuje. Zato velikost posunu potřebná k mobilizaci vrcholové smykové pevnosti se s rostoucí velikostí vzorku snižuje (Barton a Bandis, 1982)

Další rovnici (21) definující velikost změny JRC s měřítkem vyvinul Du (1992, cit. dle Barton et al., 2023) na základě statistické analýzy JRC na 1157 profilech diskontinuit, kde hodnota  $D_n$  je fraktální dimenze efektu měřítka JRC.

(21)

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-D_n}$$



Obr. 24 – Vyobrazení efektu měřítka na různé komponenty drsnosti. Podle Bandise et al. (1981) je pro větší diskontinuity (délka 18-40 cm) běžný výskyt inflexního bodu (bod 1, 2, 3, 4) následovaného zřetelným poklesem sklonu křivky smykového napětí a posunu (shear stress and displacement). Tvrdí, že pokles je výsledek progresivního selhání asperity podél delších diskontinuit. Obrázek shrnuje vliv měřítka na chování křivky po dosažení vrcholu u různě velkých vzorků diskontinuity. Nejvyšší pevnosti (označována Bandisem et al. (1981) jako ultimate strength) dosahují malé vzorky (bod 1) než větší vzorky těže diskontinuity (bod 2, 3, 4 – největší). V pravé části obrázku najdeme souhrn vlivů měřítka na různé komponenty smykové pevnosti (komponenta asperity, geometrická a reziduální nebo základní třecí komponenta). Zdroj: Bandis et al., 1981

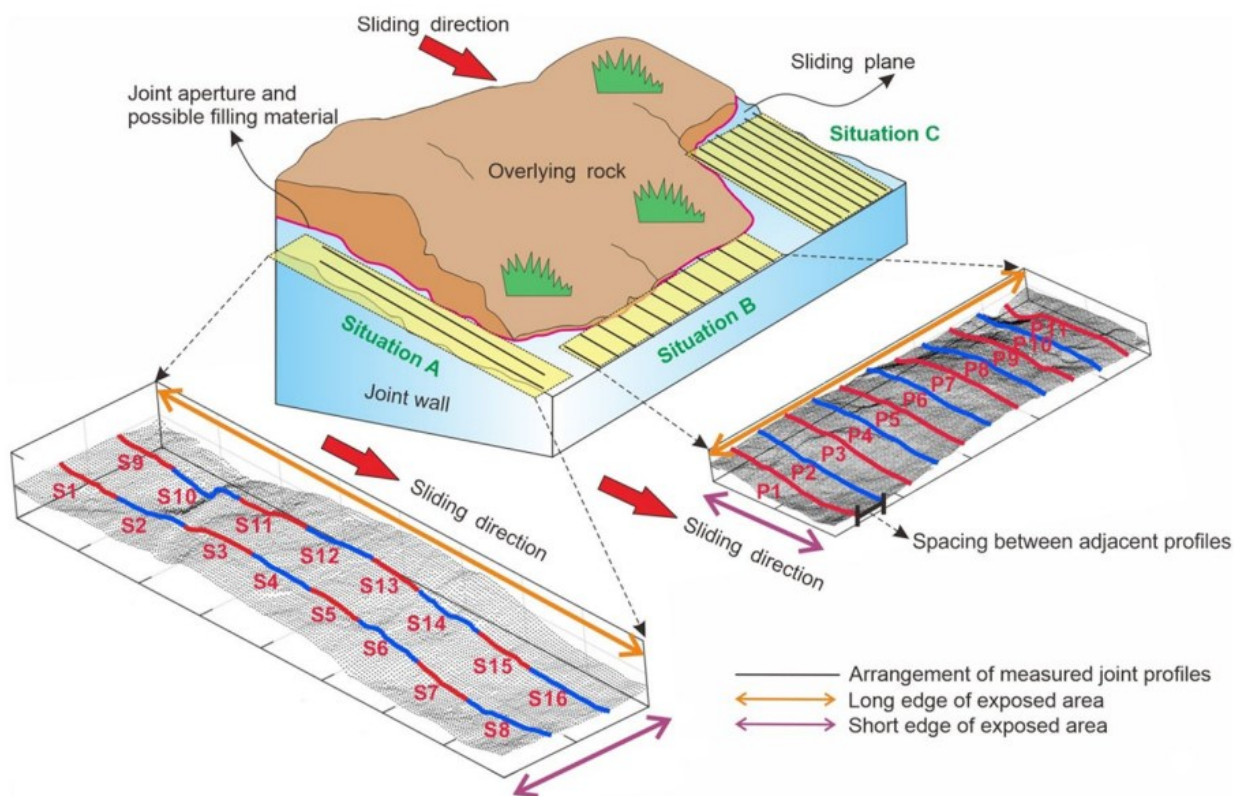
#### 4.1.1. Interval vzorkování

Interval vzorkování označuje rozestup odběru jednotlivých vzorků, nikoli počet odebraných vzorků. To znamená, že interval vzorkování je vzdálenost či krok mezi odběry profilů drsnosti (Du et al., 2022).

Jak shrnují Yong et al. (2018), parametry drsnosti jsou významně citlivé na intervaly vzorkování. Volba těchto intervalů je obzvláště důležitá při řešení problémů spojených s měřítkovým efektem. Dále tvrdí, že parametry drsnosti jsou citlivější na intervaly vzorkování než na velikosti samotného vzorku. Díky těmto zjištěním považují Yong et al. (2018) za nezbytně nutné stanovit metodiku určení vhodného intervalu vzorkování pro studium měřítkového efektu drsnosti diskontinuit. Navrhli tedy metodu určení vzorkovacího intervalu pomocí Fourierových řad na základě svého výzkumu na vzorku fylitu z lomu u města Qingshi v čínské provincii Zhejiang. Odebrali profily se vzorkovacími intervaly 0,02 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 5,0 mm. Došli k závěru, že maximální vzorkovací interval lze určit na základě nalezeného optimálního řádu Fourierovy řady. Tento optimální řád Fourierovy řady představuje počet harmonických členů v řadě, což odpovídá počtu odebraných profilů drsnosti na vzorku. Čím je harmonických členů víc, tím jsou menší odebírané profily i intervaly vzorkování a tím více jsou zachyceny jemnější detaily povrchu diskontinuity. Yong et al. (2018) určili pro měřené

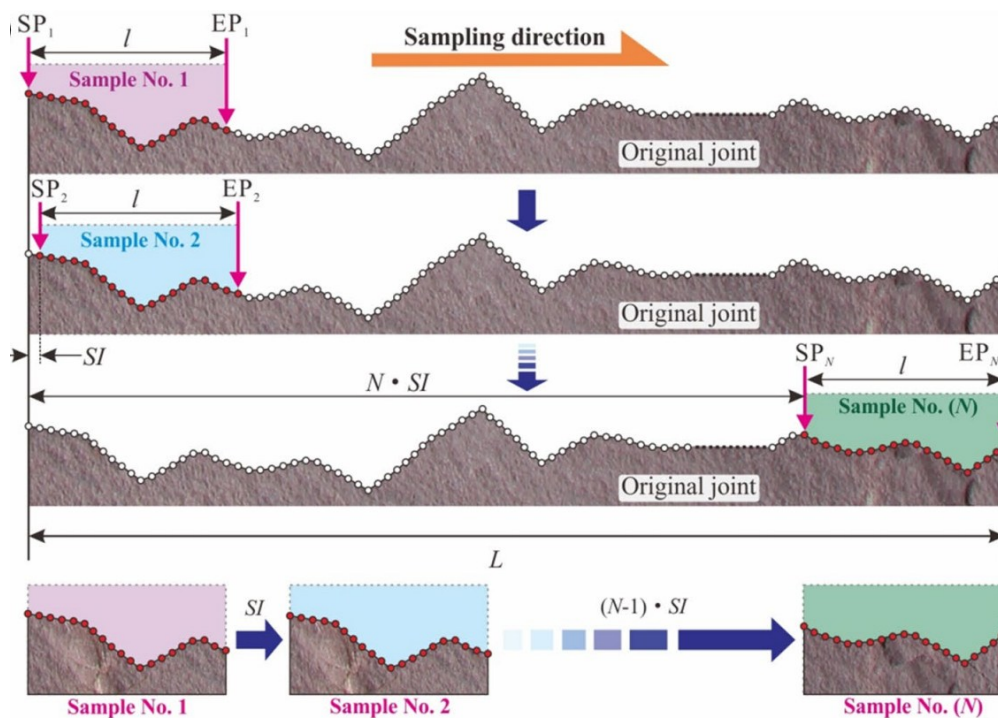
vzorky s délkou od 10 cm do 100 cm optimální řády s hodnotou od 30 do 108 a pro profily používané k odhadu JRC (10 cm, 20 cm, 30 cm dle Yong et al., 2018) optimální řády jako 16–67.

Další výzkum od Du et al. (2022) přispěl jinou metodou, která také slouží k určení reprezentativních vzorků a zkoumá heterogenitu drsnosti diskontinuit. Metoda byla nazvána jako Metoda globálního vyhledávání. Du et al. (2022) správně podotýkají, že metody odběru vzorků z různých míst diskontinuity a v různých měřítcích vedou k průměrným hodnotám. Ty dobře charakterizují drsnost povrchu, a také zohledňují vliv heterogenity povrchu. Jsou sice reprezentativní pro získávání hodnot smykové pevnosti, ale ne vždy je odkryv plochy diskontinuit v terénu dostatečně velký. Výzkumníci tudíž musí hodnotit drsnost na základě nedostatečného počtu vzorků. V tomto případě je zapotřebí vědět, kolik prvků (jednotlivých vzorků) je potřeba analyzovat, aby se mohly vyvodit závěry o celé populaci.



Obr. 25 - Tři základní situace A, B a C odkrytí potenciální smykové plochy v terénu, Situace A je charakteristická odkrytím malé plochy, kdy směr delší hrany odpovídá směru potenciálního smyku. Zde je možné měřit malé množství dlouhých profilů. Situace B je také charakteristická odkrytím malé plochy diskontinuity, ale naopak výrazně kratší hrana je ve směru eventuálního smykového posunu. V tomto případě dokážeme získat dostatečný počet profilů, které jsou ale příliš krátké na to, aby bylo možné charakterizovat vliv měřítka na drsnost povrchu. Průměr drsnosti získané z profilů se používá jako reprezentativní hodnota celkové drsnosti povrchu dané diskontinuity. V situaci C najdeme odkrytou dostatečně velkou plochu pro charakterizaci heterogenity a případně i vlivu měřítka. Zdroj: Du et al., 2022

Podle Du et al. (2022) existují tři základní situace odkrytí potenciálních smykových ploch *in-situ*, tyto situace jsou vyobrazeny na Obr. 25. Liší se především rozměry odkrytých ploch a jejich orientací vůči potenciálnímu smyku. Díky tomu lze měřit v závislosti na typu situace pouze určitý počet profilů s omezenou délkou. Každá z navržených situací má jinou možnost zachycení heterogenity nebo vlivu měřítká drsnosti. Podrobnější popis viz Obr. 25. Du et al. (2022) se konkrétně zabývali situací A, na jejíž základě navrhnul zmiňovanou metodu umožňující odběr dostatečného množství vzorků.



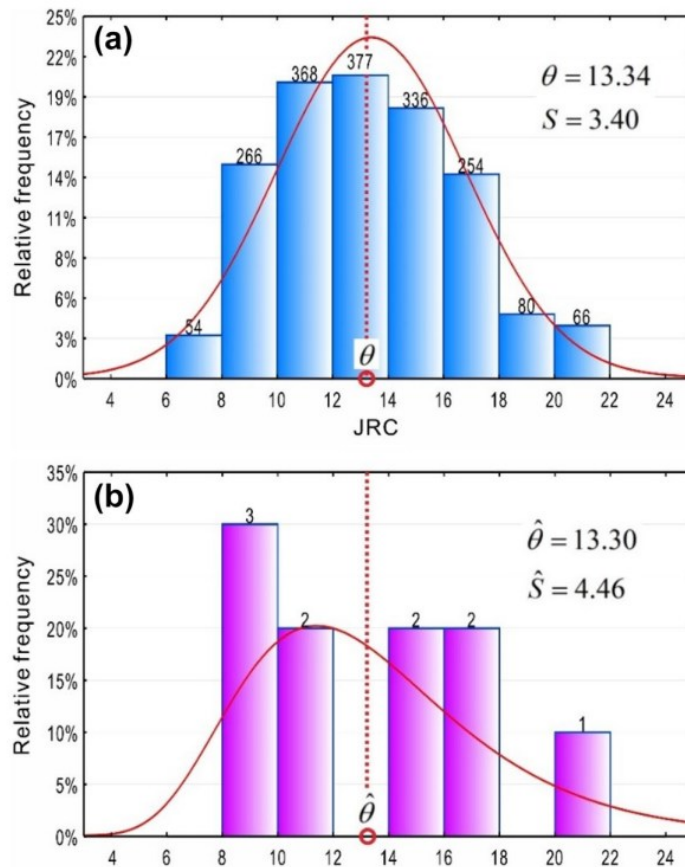
Obr. 26 - Schématický diagram odebírání vzorků pomocí metody globálního vyhledávání, kde  $L$  je celková délka profilu,  $l$  je délka vzorků odebíraných z profilu ( $l \leq L$ ),  $SI$  je interval vzorkování,  $N$  je celkový počet jednotlivých vzorků,  $SP$  je počáteční a  $EP$  je koncový bod odebíraného vzorku. Právě změna  $SP$  a  $EP$  zajišťuje nezávislost vzorků na ostatních vzorcích. Stejný výsledek odběru získáme v obou směrech odebírání na profilu. Na obrázku by to znamenalo jak ve směru zleva doprava, tak ve směru zprava doleva. Zdroj: Du et al., 2022

Metodou globálního vyhledávání dokážeme z jednoho profilu teoreticky získat nekonečně mnoho vzorků drsnosti. Celkový počet získaných vzorků  $N$  je závislý na zvoleném intervalu vzorkování  $SI$  (rozestup odběru jednotlivých vzorků). Počet vzorků se dá vypočítat podle rovnice (22):

(22)

$$N = \frac{L - l}{SI} + 1$$

kde  $L$  je celková délka profilu a  $l$  je délka vzorků odebraných z profilu ( $l \leq L$ ). V rovnici (22) přičítáme jedničku, aby se počítal i první vzorek do celkového počtu vzorků, protože první vzorek je na nulté pozici ( $SI = 0$ ).



Obr. 27 – Grafy četnosti hodnot JRC získaných pomocí metody globálního vyhledávání (a) a pomocí dělení vzorků (b) na identickém profilu. Na vodorovné ose jsou hodnoty JRC a na svislé je v procentech relativní frekvence. Histogram (a) získaný metodou globálního vyhledávání vykazuje normální rozdělení se střední hodnotou  $\theta = 13,34$  a směrodatnou odchylkou  $S = 3,40$ . Zatímco hodnoty získané metodou normálního rozdělení nejsou normálně rozdělené. Sice se střední hodnota  $\hat{\theta} = 13,30$  blíží populačnímu parametru  $\theta$  z histogramu (a), ale směrodatná odchylka  $\hat{S} = 4,46$  je výrazně jiná. Také v populačním grafu (b) chybí hodnoty JRC v intervalech 12-14 a 18-20. Zdroj: Du et al., 2022

Již bylo řečeno, že pomocí této metody můžeme odebrat větší počet nezávislých vzorků i z omezených délek profilů (Obr. 26) a vyhodnocení JRC se stává reprezentativnější než u ostatních metod, jako jsou metoda rovnoměrného dělení, jednoduchého náhodného výběru a metoda postupného zvětšování. Du et al. (2022) odebrali vzorek břidlice o velikosti 1100 mm x 1100 mm opět z lomu Heshangnong u města Qingshi v čínské provincii Zhejiang. Použili 3D laserový skenovací systém MetraScan 750 s přesností 0,030 mm na měření geometrie povrchu. V potenciálním směru smykového pohybu určili 51 profilů délky 1000 mm, které byly digitalizovány s intervalem vzorkování 0,5 mm. Každý profil rozdělili metodou globálního vyhledávání na 1801 vzorků o velikosti 100 mm. Na každém vzorku bylo určeno JRC metodou amplitudy a rovné hrany. Hodnoty JRC získané ze vzorku byly zaneseny do histogramu pro každý profil zvlášť. Pro příklad Du et al. (2022) použili výsledky hodnot JRC pro profil diskontinuity P01, které vykazují v histogramu normální rozdělení se střední hodnotou 13,34 a směrodatnou odchylkou 3,40 (Obr. 27a). V případě analýzy profilu P01 metodou dělení vzorků, mohli profil analyzovat pouze pomocí 10 vzorků a

rozložení hodnot JRC nevykazující normální rozdělení. Ostatní zmiňované metody poskytly ještě méně vzorků pro analýzu. Na základě zpětně vypočtených chyb výběru vyšlo 15,75 % pro metodu dělení vzorků a 49,9 % pro metodu náhodného výběru a postupného zvětšování, proto Du et al. (2022) došli k závěru, že JRC z těchto metod není reprezentativní pro celkovou drsnost.

Pro nalezení reprezentativního zkušební vzorku z celé série vzorků Du et al. (2022) zavedli rovnici (23), ve které je reprezentativní vzorek určen na základě pravděpodobnostních rozdělení drsnosti vzorků o stejné délce.

(23)

$$\eta_i = \frac{|JRC_i - \theta|}{\theta} * 100\%$$

$\theta$  je střední hodnota drsnosti všech vzorků odebraných z různých pozic pomocí metody globálního vyhledávání,  $JRC_i$  je hodnota JRC konkrétního vzorku diskontinuity  $i$ ,  $\eta_i$  označuje koeficient reprezentativnosti vzorku  $i$ . Vzorek s nejmenší hodnotou  $\eta_i$  je zároveň nejreprezentativnější, neboť se jeho hodnota JRC nejvíce přibližuje střední hodnotě drsnosti.

## 4.2. Anizotropie

Anizotropie neboli změna fyzikálních vlastností v závislosti na změně směru, ve kterém je měříme či pozorujeme, je v horninových masivech velmi běžná, zatímco izotropie je ojedinělá až vzácná. Horninové masivy vykazují velký stupeň anizotropie, což souvisí s jejich geologickým původem. Anizotropii horninových masivů způsobuje ve velké míře vrstevnatost v sedimentárních horninách, různé typy foliace a lineace v metamorfovaných horninách nebo kontakty lávových proudů v horninách vyvřelých. Nesmíme opomenout jedny z dalších příčin anizotropie také samotné diskontinuity, zlomy a další různé nehomogenity vyskytující se v horninovém masivu jako jsou magmatické žíly, zvětralé horizonty, příkrovy atd. (Barton a Quadros, 2015).

Podle slov Bartona a Quadrose (2015) je zajímavým rysem historické anizotropie napětí jeho vliv na vývoj soustav diskontinuit, a to především vliv anizotropie napětí na samotnou drsnost povrchu jednotlivých soustav. V období vysoké anizotropie napětí vznikaly soustavy nejhladších diskontinuit s nejnižšími hodnotami JRC, tedy s výjimkou vrstevnatosti. Zatímco v období s nízkou anizotropií napětí vznikaly výrazně drsnější diskontinuity. Pro představu Barton a Quadros (2015) uvádí Obr. 28, kde ve směru od shora dolů je vidět soustava hladkých rovinných diskontinuit, které v jiných směrech protínají mladší drsnější diskontinuity vzniklé za nižší anizotropie napětí. Nejenom drsnost

diskontinuit ale i jejich rozestupy, četnost a šířka souvisí s anizotropií napětí (Barton a Quadros, 2015).



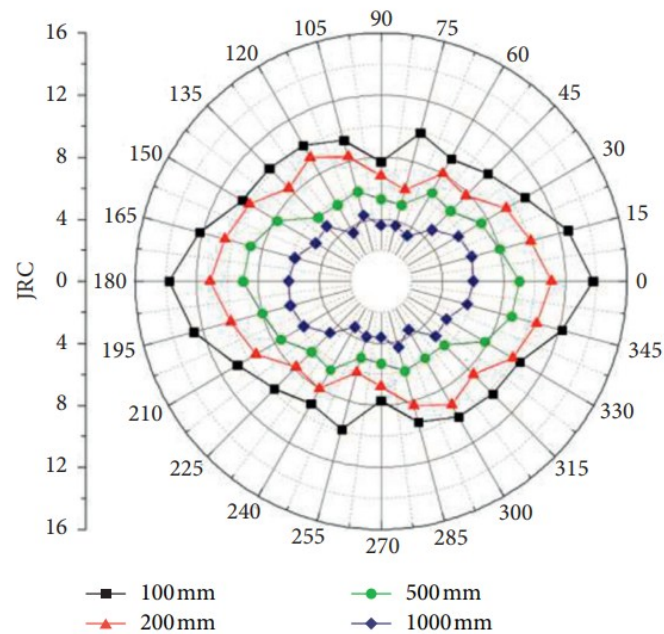
Obr. 28 - „Vlnami obroušené vrstvy dolomitu v Kimmeridge Bay břidlicích, vykazující výrazné známky předchozí anizotropie napětí “ (Barton a Quadros, 2015). Ve směru od shora dolů probíhá soustava hladkých rovinných diskontinuit, které v jiných směrech protínají mladší drsnější diskontinuity vzniklé za nižší anizotropie napětí. Zdroj: Barton a Quadros, 2015

V kontextu této práce je zásadní anizotropie drsnosti povrchu diskontinuit. Tedy skutečnost, že hodnota parametru JRC se mění v závislosti na směru měření JRC na vzorku diskontinuity. Jak tvrdí Yong et al. (2020), diskontinuity vznikají různorodými a složitými mechanismy porušení, což je jeden z důvodů, který vede k anizotropii drsnosti jejich povrchů. Také tvrdí, že drsnost povrchu se mění náhodně s měnící se orientací měření. Přesto se ve své práci snažil vytvořit metodu, která by geometrické nepravidelnosti parametrů drsnosti transformovala tak, že by se dala anizotropie drsnosti popsat přijatelnou eliptickou funkcí.

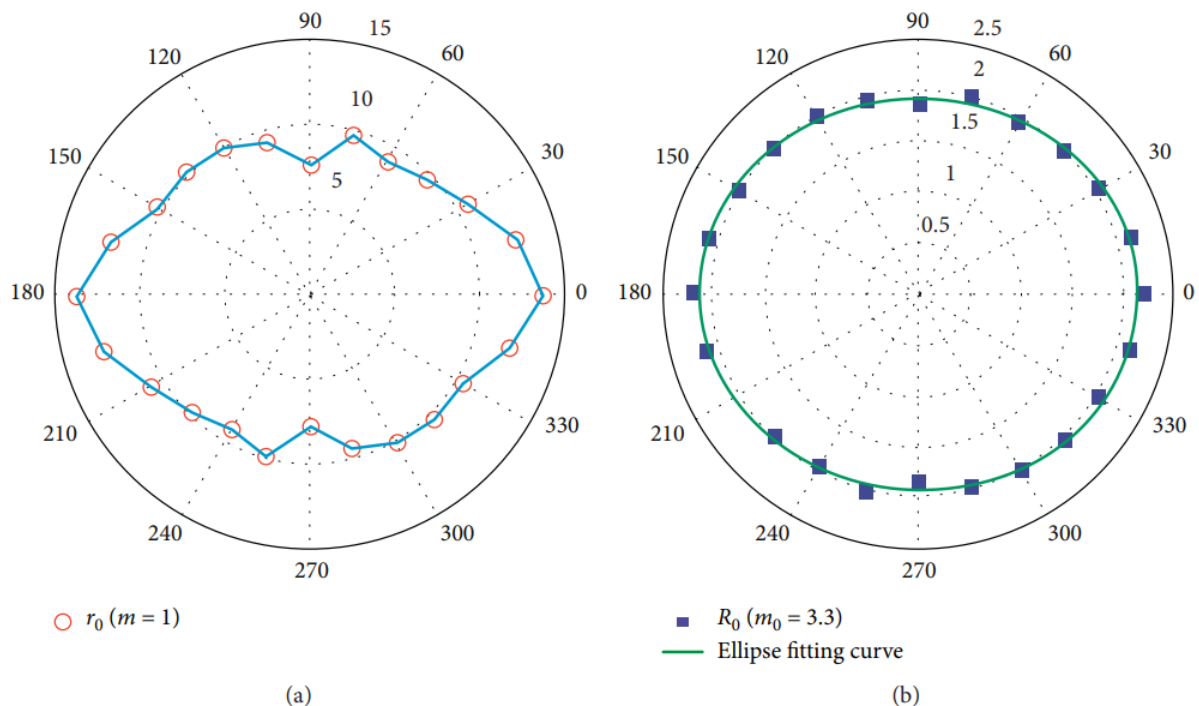
Ve výzkumu Yong et al. (2020) použili vzorky pocházející z diskontinuity z oblasti přehrady Xiaolangdi v Číně. Na této diskontinuitě byla čitelná změna drsnosti v různých směrech i hmatem. Ze vzorků pomocí profilografu od Du et al. (2009) určili profily drsnosti měřené v úhlových intervalech po  $15^\circ$  (Obr. 29). Z profilů dlouhých 100 mm, 200 mm, 500 mm a 1000 mm získali JRC pomocí metody amplitudy a rovné hrany, konkrétně diagramem od Bartona (1982, Obr. 14). Vzorky s délkou 100 mm vykazovaly nejvyšší JRC ve směru  $0^\circ$  a nejmenší ve směru  $90^\circ$  (Obr. 29). Vzorky s délkou 200 mm a 500 mm mají stejný směr nejvyšších hodnot JRC jako vzorky dlouhé 100 mm, ale vykazují nejnižší hodnoty ve směru zhruba  $75^\circ$  a s délkou vzorku také klesá hodnota JRC. Nejnižší hodnoty JRC jsou zjištěné obecně v rozsahu  $75^\circ - 135^\circ$ . Pro vzorky s délkou 1000 mm jsou nejnižší hodnoty JRC zjištěny ve směru  $60^\circ$ , zatímco nejvyšší JRC se neměnně pohybuje ve směru  $0^\circ$ , lze vidět na Obr. 29.

Zjištěné hodnoty měření JRC se vynesly do polárních grafů. Vyhladily se do eliptické funkce pomocí transformace poměrů tříd s využitím koeficientu vyhlazení drsnosti  $m_0$  (Obr. 30), který dokáže kvantifikovat míru nepravidelnosti hodnot JRC (obecně parametrů drsnosti) v polárních grafech. Koeficient vyhlazení drsnosti pro vzorky dlouhé 100 mm byl 3,3 (Obr. 30); pro 200 mm 3,6;

pro 500 mm 3,9 a pro 1000 mm byl 4,3. Lze si všimnout, že  $m_0$  roste s délkou vzorku, to značí, že anizotropie drsnosti je výraznější u větších diskontinuit. Pokud měříme v menších azimutálních intervalech vede to ke zřetelnější anizotropii drsnosti a k menším  $m_0$ , kdy tyto rozdíly se více projevují u větších diskontinuit (Yong et al., 2020).



Obr. 29 – Polární grafy naměřených hodnot JRC v úhlových intervalech po 15°. JRC se měřilo na jedné diskontinuitě, ale na profilech s rozdílnými délkami (100 mm, 200 mm, 500 mm a 1000 mm). Nejvyšší hodnoty JRC se nachází ve směru 0° a nejnižší ve směru 90°. JRC určili pomocí metody amplitudy a rovné hrany. Zdroj: Yong et al., 2020



Obr. 30 – (a) Polární graf hodnot JRC profilu s délkou 100 mm, kde je přirozený koeficient vyhlazení drsnosti ( $m=1$ ), tudíž není graf vyhlazený. Obrázek napravo (b) reprezentuje ten samý polární graf, ale hodnoty JRC jsou vyhlazené koeficientem vyhlazení ( $m_0=3.3$ ). Upravené hodnoty JRC spojuje eliptická křivka vyhlazení (ellipse fitting curve). Zdroj: Yong et al., 2020

## 5. Studie subjektivity určení JRC v praxi

Nejpoužívanější metodou určování JRC v inženýrskogeologické praxi při terénních průzkumech v České republice je jedna z nejjednodušších a nejstarších metod a tou je vizuální porovnání profilů se standardními profily od Bartona a Choubeyho (1977), viz kapitolu 3.2.4. I přes své výhody, mezi které patří jednoduchost a rychlost, nese tato metoda značnou míru subjektivity (Beer et al., 2002; Alameda-Hernández et al., 2014; Barton et al., 2023). V předchozích letech Beer et al. (2002) a Alameda-Hernández et al. (2014) se snažili kvantifikovat míru subjektivity určení JRC prostřednictvím internetového dotazníku, který obsahoval vykreslené profily pro hodnocení JRC. Studie se tudíž zaměřovaly čistě na metodu vizuálního porovnání se standardními profily, aniž by účastníci studie měli možnost fyzicky zhodnotit původní horninové vzorky. V reálné situaci v praxi se drsnost diskontinuity necharakterizuje čistě podle odebraného vykresleného profilu pomocí vizuální metody, ale také hmatem a celkovým vizuálním a hmatovým zhodnocením dané diskontinuity, jak tvrdilo mnoho účastníků v dále popsané vlastní studii. Proto za účelem větší autentičnosti jsme spolu s vedoucím této práce zrealizovali studii, kde se hodnoty JRC určovaly na samotných horninových vzorcích.

## 5.1. Předchozí studie

Beer et al. (2002) jako jedni z prvních provedli rozsáhlejší studii zaměřenou na kvantifikaci subjektivity určování hodnot JRC vizuálním porovnáním. Svoji studii zaměřili čistě na přesnost vizuální metody odhadu JRC využitím systému internetového průzkumu. Přesnost metody neporovnávali s ostatními metodami určování JRC (kapitola 3). Svůj průzkum provedli mezi lidmi zabývajícími se geotechnickým inženýrstvím. V internetovém dotazníku měli účastníci odhadnout hodnoty JRC u tří vzorových profilů délky 10 cm. Ty byly vyobrazeny v dotazníku ve stejném deseticentimetrovém měřítku jako standardní profily od Bartona a Choubeyho (1977), čímž se eliminoval vliv měřítku při vizuálním hodnocení. Profily byly získány pomocí profilovacího hřebenu z bloku žuly. Profily byly pouze tři, kvůli riziku odmítnutí účasti respondentů na rozsáhleším průzkumu z hlediska časové náročnosti. Beer et al. (2002) považovali za důležitější získat co největší množství odhadů než pokrýt velké množství profilů. V průzkumu účastníci vybírali podle svého názoru nejvhodnější interval JRC pro každý z profilů. Uváděli také svou úroveň zkušeností s geotechnickou či inženýrskou praxí a se stanovováním JRC. Během průzkumu si Beer et al. (2002) všimli, že směrodatná odchylka a průměr se ustálily už při získání 50 odhadů z celkového počtu 125 - 122 odhadů na profil A - C. Proto se domnívají, že dosáhnutím hranice 50 odhadů je obecně získán dostatečný počet k odhalení trendů v datech. Profily A, B vykazovaly asymetrické normální rozložení, zatímco profil C vykazoval bimodální rozložení kvůli hladké levé polovině a drsné pravé polovině profilu (viz Beer et al., 2002, str. 68). Při zhodnocení vlivu úrovně zkušeností respondentů Beer et al. (2002) dospěli k závěru, že s vyšší zkušeností se zužuje rozptyl odhadů, ale zkušenější respondenti mají větší tendence uvádět vyšší hodnoty JRC. Díky snižování směrodatné odchylky rozložení odhadů JRC s rostoucími zkušenostmi lze podle Beer et al. (2002) tvrdit, že více zkušeností vede k přesnějšímu odhadu JRC vizuálním porovnáním.

Také Alameda-Hernández et al. (2014) provedli internetový průzkum subjektivity s 90 účastníky, který zahrnoval vizuální porovnání 12 drsnostních profilů se standardními profily. Účastníci se dělili na tři skupiny: experti v oblasti mechaniky hornin (6 účastníků), postgraduální studenti stavebního inženýrství se zaměřením na inženýrskou geologii (9 účastníků) a ostatních 75 respondentů byli studenti z posledního pátého ročníku stavebního inženýrství na Univerzitě v Granadě ve Španělsku. Alameda-Hernández et al. (2014) ověřili nepřesnost a variabilitu hodnot JRC vizuálním odhadem. Kromě variability rozpoznali také systematické odchylky při vizuálním hodnocení stupňovitých profilů a profilů, které se podobaly jednomu ze standardních profilů podle Bartona a Choubeyho (1977), ale lišily se amplitudami. Respondenti mohli hodnotit JRC jedním číslem nebo typickým intervalem hodnot. Většina respondentů hodnotila intervalem, jehož střední hodnota – liché číslo – se počítala do hodnocení. Pokud někdo odpověděl sudým číslem, tak to bylo rozděleno mezi dvě nejbližší lichá čísla. Výjimkou byly odpovědi 0 a 20, které byly přiřazeny k 1 nebo 19. Dále ve své

studii navrhli novou metodu hodnocení JRC pomocí vykreslení profilu a jeho digitalizací. Pomocí MATLAB algoritmu pak vypočítali hodnotu JRC.

## 5.2. Vlastní studie subjektivity vizuálního určování JRC

Na základě dlouhodobé otázky, jak moc subjektivita hodnotitele ovlivňuje výsledky hodnot JRC určených vizuální metodou, jsme navrhli vlastní průzkum. Průzkum měl zjistit, jestli jsou výsledky vizuální metody ovlivněné subjektivitou a do jaké míry. Účastníci určovali nejenom JRC, ale uváděli zároveň jak dlouho působí v praxi a jakou metodu používají v praxi pro hodnocení JRC. Informací na zpracování se získalo poměrně velké množství, jenže kvůli omezenému rozsahu bakalářské práce se ve výsledku velmi jednoduše zpracovaly v souvislostech se subjektivitou pouze získané hodnoty JRC.

### 5.2.1. Metodika

Na rozdíl od předchozích studií Beer et al. (2002) a Alameda-Hernández et al. (2014) jsme nezvolili internetový dotazník s vykreslenými profily vzorků. Naším cílem bylo přiblížit se co nejvíce inženýrskogeologické praxi, tedy určování JRC v terénních podmínkách, které je častější než určování nesubjektivními metodami v laboratoři. Proto jsme se rozhodli, že hodnoty JRC budou respondenti určovat přímo na horninových vzorcích podél vyznačeného profilu (Obr. 31), 15 cm



*Obr. 31 – Situace určování JRC pro tento průzkum na 13. ročníku konference Svahové deformace a pseudokras 2025. Jsou vidět vzorky, přiložené protokoly, papír s vytištěnými profily od Bartona a Choubeyho (1977) a krabice na vzhazování vyplněných protokolů. Také je vidět jeden z nejběžnějších způsobů určování JRC, kdy respondent hodnotí povrch také hmatem. Foto.: Mgr. Jakub Roháč, Ph.D.*

dlouhého. Vzorků bylo celkem 5 (viz kapitolu 5.2.2). Tento počet jsme zvolili s ohledem na přijatelnou časovou náročnost úkolu, přibližně 10 minut, která by nemusela oslovené odradit. Pro získání vypovídajících výsledků studie jsme usilovali o dosažení minimálně 50 respondentů. Od tohoto počtu hlasů se rozložení odhadů, tudíž průměr a směrodatná odchylka, mění pouze minimálně (Beer et al., 2002). Na začátku bakalářské práce jsem odeslala žádost o spolupráci na průzkumu subjektivity formou emailu, kde byla prosba o účast na vyhodnocování JRC. Email jsem odeslala do 15 pražských inženýrskogeologických a hydrogeologických firem a institucí. Firmy a instituce, které účast přijaly, byly SG Geotechnika a.s., státní instituce Česká geologická služba, PUDIS a.s., INSET s.r.o., GeoTec-GS a.s., 3G Consulting Engineers s.r.o. Jako další se průzkumu účastnili studenti a zaměstnanci Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (Přf UK) z Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užitě geofyziky. Celkový počet účastníků průzkumu byl 85 (včetně vlastního stanovení). Zaměstnanců Přf UK se zúčastnilo 7, studentů 9. Z firem se celkem získalo 34 ohodnocení JRC. Vzorky vedoucí práce donesl na 13. ročník konference Svahové deformace a pseudokras 2025, která byla pořádána Českou asociací inženýrských geologů. Z konference se získalo 34 ohodnocení. Na konferenci byli potenciální účastníci studie upozorněni, že pokud se již jednou účastnili hodnocení těchto horninových vzorků (např. v rámci své firmy), nemohou se účastnit podruhé, aby se předešlo případné duplikaci dat. Vzorky se do firem a institucí osobně předávaly společně s nevyplněnými protokoly, papírem s vytištěnými standardními profily od Bartona a Choubeyho (1977, Obr. 19) ve



Obr. 32 – Komplet vzorků, protokolů, pomocných standardních profilů Bartona a Choubeyho (1977) a krabice na vzhazování vyplněných protokolů.

správném měřítku a krabicí na vhození protokolů (Obr. 32). Krabice měla zabránit opisování hodnot od předešlých respondentů, nicméně diskusi mezi účastníky při určování nebylo možné zcela zamezit. Ve firmách a institucích vzorky s protokoly zůstávaly podle domluvy zhruba 1–3 týdny.

Úkolem respondenta bylo ohodnotit JRC podél 15 cm dlouhého vyznačeného profilu na povrchu horninových vzorků (viz Obr. 34, Obr. 35, Obr. 37, Obr. 36, Obr. 38) a napsat hodnoty do protokolu (Obr. 33). Ke vzorkům byl přiložen papír s vytištěnými standardními profily od Bartona a Choubeyho (1977, Obr. 19) ve správném měřítku. Všichni respondenti určovali JRC vizuální metodou pomocí standardních profilů. Doplňující otázka v protokolu byla, jakou metodu určení JRC respondent používá v praxi (pokud používá). Většina účastníků uvedla vizuální metodu, kde správný interval JRC určují bez vykreslení profilů pomocí pomůcek (např. hřeben, profilometry), ale pouze pohledem a hmatovým zhodnocením drsnosti povrchu diskontinuity. Další informací, kterou účastníci měli uvést bylo, zda působí v praxi (geotechnické, inženýrskogeologické, hydrogeologické atd.) méně nebo více než 10 let. Nakonec se tento časový údaj s ohledem na rozsah práce nijak nehodnotil v souvislosti s výsledky hodnot JRC, ale nevyvrací to skutečnost, že se bude v budoucnu vyhodnocovat formou diplomové práce.

číslo vzorku	JRC vzorku	zakroužkujte				
1		délka praxe		frekvence určování JRC v praxi		
2		méně než 10 let	více než 10 let	nikdy *	málokdy**	často
3						
4		*nikdy = určoval/a jsem při studiu, v praxi jsem se s tím nesetkala				
5		**málokdy = alespoň jednou jsem se s tím v praxi setkal/a				
Jakou metodu jste použili pro určení JRC těchto pěti vzorků?						
Jaké metody používáte <b>v praxi</b> pro stanovení JRC?						
Vaše poznámky k této studii:						

Obr. 33 – Protokol, který měli účastníci studie vyplňovat.

Ke každému vzorku jsem ke konci průzkumu provedla také vlastní měření, které jsem zahrnula do studie. Nejprve jsem hodnoty JRC určila vizuálním odhadem bez vykreslení profilu tak, jak to dělala většina účastníků. Snažila jsem se subjektivně hodnotit JRC bez ovlivnění již zpracovanými výsledky respondentů. Pro další přesnější vyhodnocení JRC jsem využila základní šablonu drsnosti od Du et

al. (2009, Obr. 15). Tu jsem vytiskla v daném měřítku 10 cm na kancelářský papír. Pomocí 15 cm dlouhého hřebenu jsem odebrala profily na všech vzorcích a obkreslila je ostrou tužkou na papír. Protože šablona má 10 cm a profily 15 cm, zvolila jsem vzorkovací interval 1 cm a získala z jednoho profilu 6 naměřených hodnot JRC posouváním šablony po profilu. Nápad vícenásobného měření vznikl díky studii od Du et al. (2022) více popsané v kapitole 4.1.1. Pro další vyhodnocování JRC, jsem změřila nejvyšší amplitudu profilu odečtením od přímé hrany. Nejvyšší amplitudou jsem hodnoty JRC odvodila buď z diagramu (Obr. 14) nebo výpočtem z rovnice (18).

### 5.2.2. Vzorky

Všechny vzorky mají na sobě vyznačený přímý profil dlouhý 15 cm, podél kterého respondenti měřili JRC. Také je na každé fotce lísteček s měřítkem 10 cm a každý vzorek je řádně označen číslem. Pokud byly pořízeny i fotografie lokalit, odkud vzorek pochází, jsou rovněž přiloženy.

Volně ležící vzorek č. 1 (Obr. 34) byl odebrán v aktivním kamenolomu Zdechovice při provádění odborné činnosti společně s Českou geologickou službou. Odborná činnost mimo jiné zahrnovala i měření JRC na důležitých diskontinuitách (Obr. 34). Jedná se o středně zrnitý dvouslídý granit proterozoického stáří patřící do regionální jednotky chvaletického masivu. Kamenolom Zdechovice se nachází ve středočeské oblasti (Bohemikum) zhruba 20 km západním směrem od Pardubic (ČGS, 2025).

Vzorek č. 2 (Obr. 35) pochází z bývalého kamenolomu zhruba 4 km jihovýchodně od Jílového u Prahy. Dnes je možno bývalý lom najít na mapách pod názvem Sekaná skála. Vzorek byl také odebrán jako volně ležící při inženýrskogeologické exkurzi. Jedná se o granodiorit požárského typu. Patří do oblasti moldanubika v regionální jednotce středočeského plutonu, sázavské skupiny. Vzorek granodioritu je stáří paleozoika (karbon-perm) (ČGS, 2025).

Vzorek č. 3 (Obr. 37) byl odebrán na turistické pěšině zhruba 3 km vzdušnou čarou východně od městečka Seefeld u jezera Attersse v Rakousku. Vzorek se může označit za slítný vápenec pocházející z maastrichtského stupně druhohorního období (GeoSphere Maps, 2023).

Vzorek č. 4 (Obr. 36) byl získán na břehu malého občasného toku přitékajícího do říčky Štiavnička, která protéká obcí Mýto pod Ďumbierom na Slovensku. Občasný tok se objevuje asi 200 m severozápadně od autobusové zastávky „Mýto pod Ďumbierom, Pohanské kapln.“, která se nachází východně nad zmíněnou obcí. Vzorek byl odebrán zhruba 550 m od dané silnice podél toku. Jedná se o šedě zbarvenou slítnou břidlici z Mrázického souvrství, Zliechovské jednotky. Pochází z éry mezozoika ze starší křídly (ŠGÚDŠ, 2024).

Vzorek č. 5 (Obr. 38) pochází z nejvyššího vrcholu Českého středohoří, intruzivního tělesa Milešovky a patří k postvariským magmatitům. Vzorek je trachyt až sodalitický trachyt z regionální

jednotky Českého středohoří. Je terciárního stáří. V hornině jde makroskopicky rozlišit plagioklas a K-živec (ČGS, 2025).



Obr. 34 – Vzorek č. 1 je dvouslidý granit (vrchní obrázek) a zobrazená lokalita nálezů vzorků v lomu Zdechovice (spodní obrázek, foto.: Ing. Jan Malik).



*Obr. 35 - Vzorek č. 2 je granodiorit požárského typu (vrchní obrázek) a zobrazená lokalita nálezů (spodní obrázek).*



*Obr. 37 - Vzorek č. 3 je slinitý vápenec.*



*Obr. 36 - Vzorek č. 4 je slinitá břidlice.*



Obr. 38 - Vzorek č. 5 je sodalitický trachyt.

### 5.2.3. Výsledky studie

V doplňkových otázkách pouze 5 účastníků uvedlo, že v praxi k vybrání správného intervalu JRC ze standardních profilů používají hřeben nebo profilometr. Jen 3 respondenti uvedli, že v praxi získávají hodnoty JRC pomocí metody amplitudy a přímé hrany. Všichni ostatní používají v praxi vizuální metodu dle Bartona a Choubeyho (1977) bez jakýchkoliv pomůcek (např. hřeben, profilometr).

Respondenti mohli hodnoty JRC určit buď pomocí intervalů podle Bartona a Choubeyho (1977) nebo celých čísel. Takto různorodé hodnoty se následně zpracovaly podle Alameda-Hernández et al. (2014) do lichých čísel. V případě, že JRC někdo hodnotil intervalem, počítala se z něj jeho střední hodnota, která je vždy liché číslo. Například z intervalu 14-16 se do výsledku počítalo číslo 15. Pokud někdo hodnotil celými čísly, tak se sudé číslo rozpočítalo mezi nejbližší dvě lichá čísla. To znamená, že pokud někdo uvedl hodnotu 6, tak  $\frac{1}{2}$  hlasu získala hodnota 5 a  $\frac{1}{2}$  hlasu získala hodnota 7. Z toho důvodu jsou některé četnosti uvedené jako zlomky. Následně se hodnoty JRC jednoduše zpracovaly do sloupcových grafů, kde osa y je četnost odpovědí a osa x jsou liché hodnoty JRC. Pod sloupcovými grafy vždy naleznete hodnoty aritmetického průměru, mediánu, modální hodnoty a směrodatné odchylky.

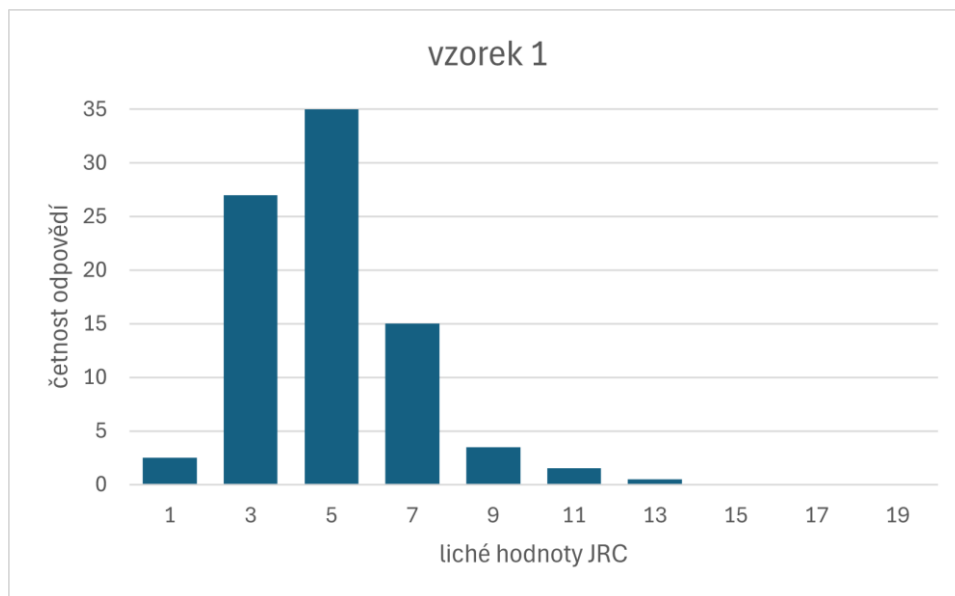
U vzorku č. 1 (Obr. 39) nejvíce respondentů určilo hodnotu JRC jako 5, přičemž druhou nejčastější odpovědí byla hodnota 3 (Obr. 40). Ostatních respondentů spíše odhadovali vyšší hodnoty, například 7. U vzorku č. 2 (Obr. 41) nejvíce respondentů uvedlo hodnotu 9, druhou nejčastější hodnotou byla

hodnota 11 (Obr. 42). Histogram vzorku č. 3 (Obr. 44) vykazuje bimodální rozložení, s největší četností odpovědí v hodnotě 17 a druhou nejčastější odpovědí byla hodnota 11, viz Obr. 43. U vzorku č. 4 (Obr. 46) hodnoty JRC rovněž vykazují bimodální rozložení. Nejčastěji se vyskytují hodnoty  $JRC = 15$  a druhé nejčastější odpovědi jsou hodnoty 17. Druhý vrchol bimodálního rozložení tvoří hodnota 3 (Obr. 45). Vzorek č. 5 (Obr. 48) vykazuje normální rozložení s větším rozptylem (směrodatná odchylka je 3) a modální hodnotou v  $JRC = 9$ . Vyskytují se i odlehlé hodnoty,  $JRC = 19$  (Obr. 47).



1.

Obr. 39 - Detailnější fotografie drsnosti povrchu vzorku č. 1. Pod papírovým měřítkem je rozpoznatelná černá čára vyznačeného profilu, podél kterého respondenti určovali JRC (vrchní obrázek). Spodní obrázek je překreslený profil vzorku č. 1 odebraný pomocí hřebenu. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.



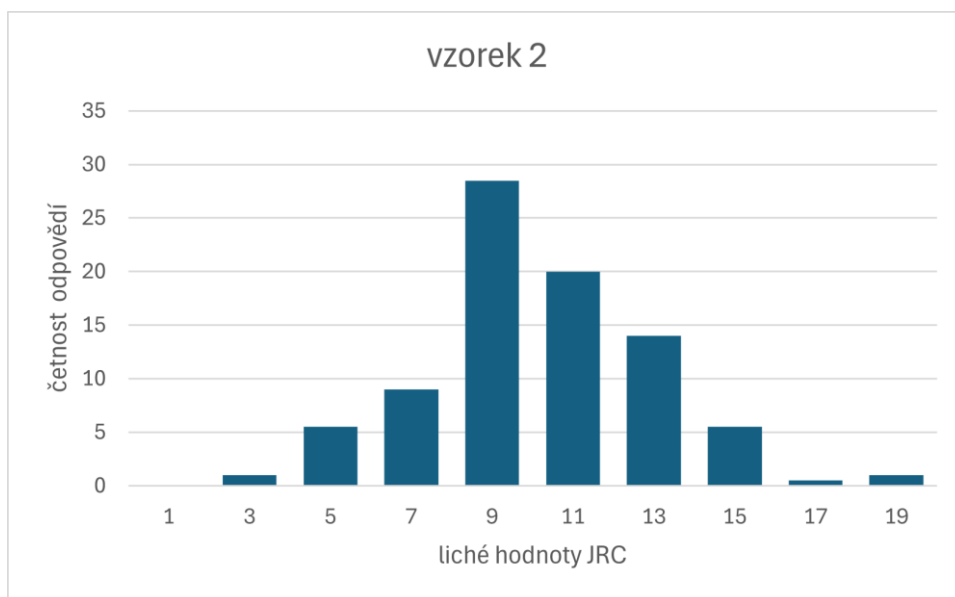
Obr. 40 – a. průměr = 4,9; modus = 5; medián = 5; směrodatná odchylka = 2,0



2.



Obr. 41 - Detailnější fotografie povrchu vzorku č. 2 a viditelného zakřivení jeho povrchu (vrchní obrázek). Spodní obrázek je překreslený profil odebraný hřebenem ze vzorku č. 2. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.



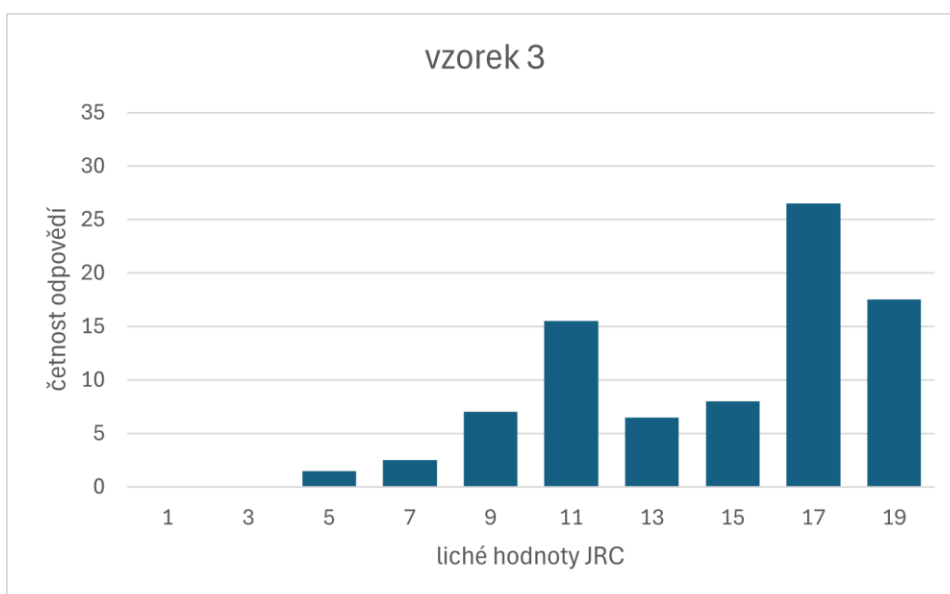
Obr. 42 - a. průměr = 10,2; modus = 9; medián = 10; směrodatná odchylka = 2,8



3.



Obr. 44 - Detail drsnosti povrchu vzorku č. 3 podél určeného profilu (vrchní obrázek). Spodní obrázek je překreslený profil odebraný pomocí hřebenu ze vzorku č. 3. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.



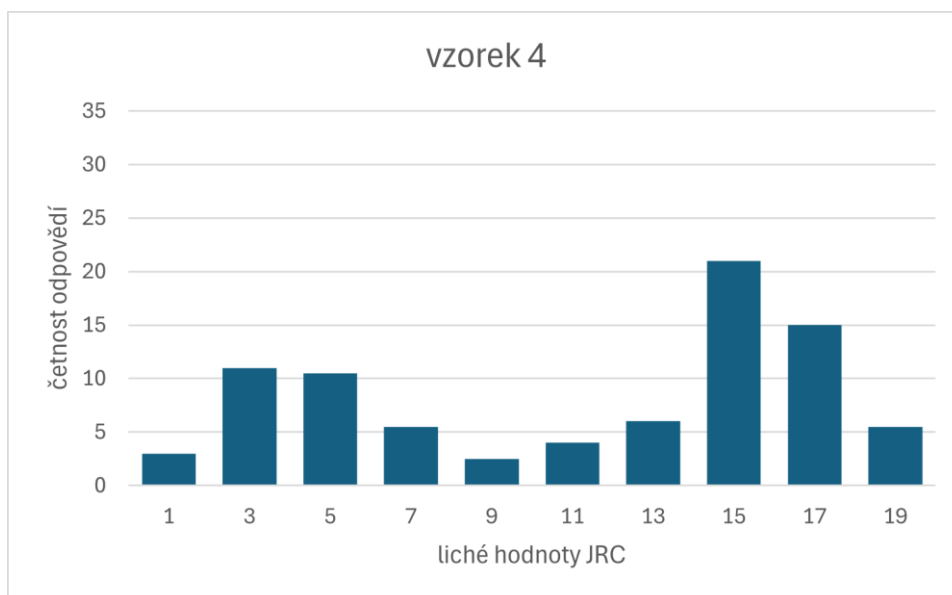
Obr. 43 - Bimodální rozložení pro vzorek č. 3. Nejvyšší vrchol se nachází v intervalu hodnot 13-19. Histogram normálního rozložení hodnot okolo nejvyššího vrcholu má modální hodnotu a medián v hodnotě 17, průměr = 16,9 a směrodatnou odchylku = 1,8. Druhý vrchol je v intervalu hodnot 1-15. Modus a medián je v hodnotě 11, průměr = 11,2 a směrodatná odchylka = 2,5.



4



Obr. 46 – Detail vzorku č. 4. Na vrchním obrázku je plnou červenou čarou zvýrazněn průběh „schodu“, který protíná měřený profil. Spodní obrázek je vykreslený profil odebraný pomocí hřebenu. V profilu je vyznačen čárkovanou čarou nejpravděpodobnější průběh diskontinuity částečně odkryté nalevo od „schodu“ ve vykresleném profilu. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.



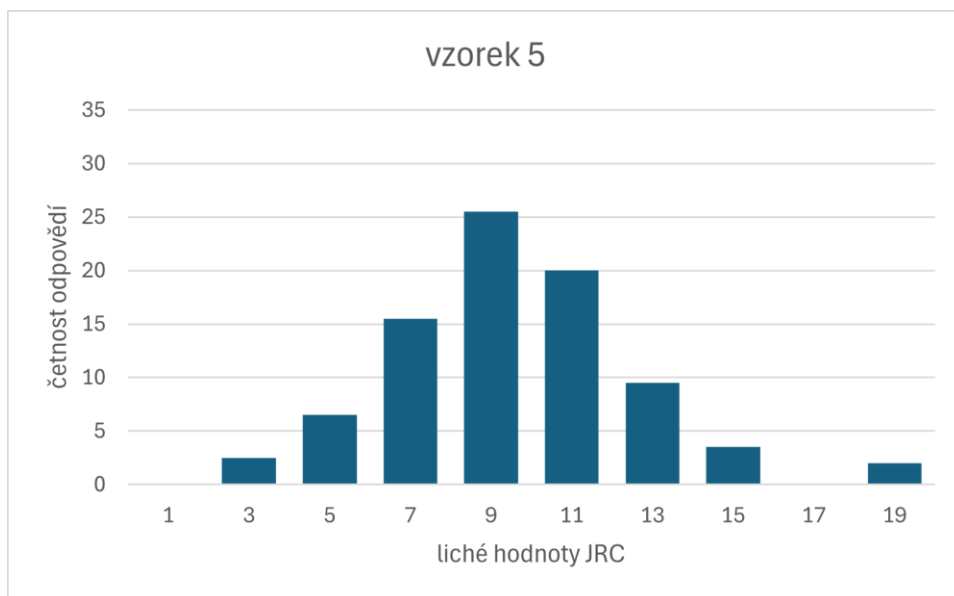
Obr. 45 - Bimodální rozložení hodnot JRC vzorku č. 4. Nejvyšší vrchol se je v intervalu hodnot 9-19. V tomto intervalu je modální hodnota a medián v hodnotě 15, průměr = 15,4 a směrodatná odchylka 2,2. Druhý vrchol je v intervalu 1-11. V tomto intervalu je modální hodnota 3 a medián 5, průměr = 4,7 a směrodatná odchylka = 2,2.



5.



Obr. 48 - Detail povrchu vzorku č. 5 podél měřeného profilu (vrchní obrázek). Spodní obrázek je vykreslený profil vzorku č. 5 pomocí hřebenu. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.



Obr. 47 - Aritmetický průměr = 9,6; modální hodnota a medián = 9; směrodatná odchylka = 3 u vzorku č. 5

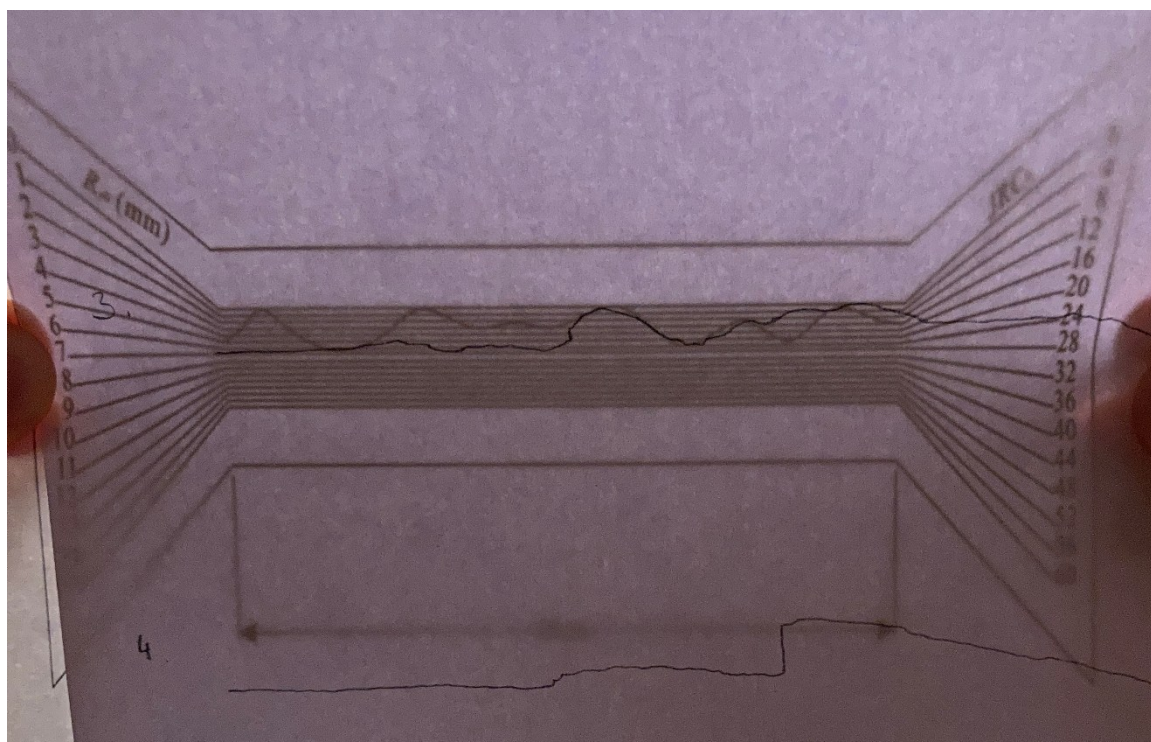
#### 5.2.4. Vlastní měření a výsledky

Jako první jsem intervaly hodnot JRC určila hmatem a vizuálním porovnáním se standardními profily od Bartona a Choubeyho (1977, Obr. 19). Výsledky jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 - Výsledky vlastního měření: určování JRC vizuální metodou porovnáním se standardními profily od Bartona a Choubeyho (1977).

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
Interval JRC	6-8	12-14	18-20	2-4	10-12

Hodnoty JRC jsem dále určovala modifikovanou metodou přímé hrany (viz kapitolu 3.2.1.1). V tomto případě jsem potřebovala na kancelářském papíře vytištěnou základní šablonu od Du et al. (2009). Ta musela být vytištěna v přesném měřítku. V práci Du et al. (2009) je šablona o 0,54 cm převýšena, proto jsem musela pro tisk rozměry upravovat. Z profilovacího hřebenu jsem obkreslila tvary profilů tenkou tužkou na kancelářský A4 papír. Základní šablona je dlouhá 10 cm a profil vzorků 15 cm. Kvůli 5cm rozdílu jsem šablonou měřila JRC na každém profilu 6krát s intervalem vzorkování 1 cm (kap. 4.1.1). Měření probíhalo přiložením obou papírů k sobě a jejich prosvícením, viz Obr. 49. Výsledky měření jsou shrnuty v Tab. 3.



Obr. 49 – Měření JRC na profilu vzorku č. 3 pomocí základní šablony Du et al. (2009). Měření probíhalo u všech vzorků stejně pomocí prosvícení přiložené šablony pod papírem s vykreslenými profily. Horní hrana šablony se musí dotýkat dvou nejvyšších vrcholů profilu, potom se může měřit nejvyšší amplituda a JRC. Podrobnosti viz kapitolu 3.2.1.1. Zde má profil JRC = 28.

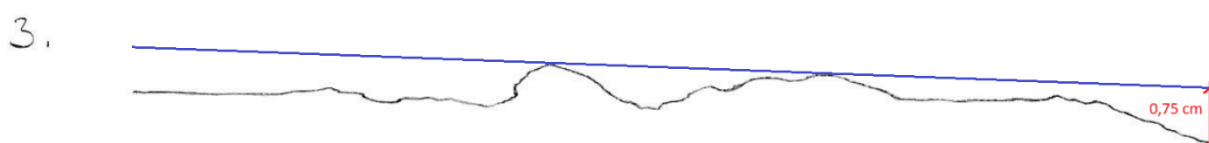
Tab. 3 - Výsledky vlastního měření JRC podle základní šablony od Du et al. (2009).

číslo měření	JRC vzorku 1	JRC vzorku 2	JRC vzorku 3	JRC vzorku 4	JRC vzorku 5
1	10	48	24	32	32
2	10	32	22	32	44
3	8	36	26	38	52
4	8	50	26	48	28
5	8	56	26	60	24
6	6	50	32	54	12
průměr:	8,3	45,3	26	44	32

Dále jsem JRC určovala podle Obr. 14 metodou amplitudy a rovné hrany. Na vykreslených profilech vzorků jsem spojila přímkou dva nejvyšší vrcholy profilu, následně změřila hodnotu největší amplitudy mezi profilem a přímkou (Obr. 50). Z diagramu (Obr. 14) jsem pomocí známé délky profilu (15 cm) a změřené největší amplitudy odvodila hodnoty JRC. Některé amplitudy byly větší než rozsah JRC v diagramu, proto uvádím v Tab. 4 hodnoty  $JRC > 20$ .

Tab. 4 - Výsledky vlastního měření JRC metodou amplitudy a přímé hrany. Hodnoty JRC určené z diagramu od Barton (1982, Obr. 14).

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
amplituda [cm]	0,2	1,8	0,75	1,6	1,8
hodnoty JRC	6	>20	20	>20	>20



Obr. 50 – Metoda amplitudy a rovné hrany pro určení JRC. Na vykresleném profilu se přímkou spojí 2 nejvyšší body a změří se největší amplituda. Zde je zobrazen profil vzorku č. 3 s největší změřenou amplitudou 0,75 cm. Profil je dlouhý 15 cm, na obrázku není v měřítku.

Změřené největší amplitudy jsem také použila do rovnice (18) k výpočtu hodnot JRC, kde  $L_0=10$  cm,  $L=15$  cm a hodnoty amplitud jsou uvedeny v Tab. 4. Vypočtené hodnoty JRC viz Tab. 5.

Tab. 5 - Vlastní měření metodou amplitudy a rovné hrany. Výsledky JRC získané z rovnice (18) od Du et al. (1996).

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
JRC	5,5	39,3	19,6	36,3	39,3

Na základě nekonzistentnosti výsledků u vzorků č. 2, 4 a 5, jsem se rozhodla upravit měření amplitudy dle vlastního úsudku (Obr. 51, zelené linie). Na profilu vzorku č. 2 jsem měření amplitudy provedla na zkosených hranách, viz Obr. 51. Výsledná hodnota JRC je průměrem hodnot JRC získaných z amplitud odečtených od těchto dvou zkosených hran. U profilu č. 4 jsem měřila amplitudu pouze na té části diskontinuity, která vybíhá zpod „schodu“, viz Obr. 51. Přímou hranu u vzorku č. 5 jsem umístila na spodní – opačnou – stranu profilu a od ní jsem odečetla amplitudu, viz Obr. 51. Hodnoty JRC vzorků č. 2, 4 a 5 v Tab. 6 jsem vypočítala podle rovnice (18). Hodnoty JRC vzorků č. 1 a 3 v Tab. 6 jsou převzaté z předchozího měření, kde jsem pro výpočet JRC také využila rovnici (18).

Tab. 6 - Výsledky měření z vlastního přístupu ke stanovení amplitudy a přímé hrany, vypočtené dle rovnice (18). Hodnoty JRC vzorku č. 1 a 3 jsou převzaté z předchozí Tab. 5

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
JRC	5,5	14,7	19,6	14,6	20,7

Nesoulad výsledků studie a vlastního měření a také jiného přístupu k měření amplitudy bude diskutován dále.

## 6. Diskuse

Výsledky studie ukázaly, že vizuální metoda stanovení JRC podle standardních profilů Bartona a Choubeyho (1977) je ovlivněna subjektivitou. U vzorků č. 1, 3 a 5 se očekávalo, že stanovení JRC bude pro respondenty lehké. Tyto vzorky nevykazují žádné neobvyklosti v tvaru profilu, na rozdíl od vzorku č. 2, jehož profil je příliš oblý a vzorku č. 4, v jehož hladkém profilu se nachází „schod“. I přesto nás překvapilo rozložení hodnot především u vzorku č. 3 (Obr. 44, Obr. 43). Jeho profil i povrch se zdá být dostatečně drsný na určení těch nejvyšších hodnot/intervalů JRC. Dvě nejčtenější hodnoty 17 a 19 tvořící nejvyšší vrchol bimodálního rozložení by této teorii odpovídaly, ale druhý vrchol – třetí nejčtenější hodnota – je v hodnotě 11. Může to být způsobeno tím, že na omak je vzorek relativně hladký (zhruba přirovnatelné k masku). Tato skutečnost mohla zapříčinit, že respondenti zhodnotili JRC nižšími hodnotami, neboť dali větší váhu mikrodrsnosti, která se dá zhodnotit

hmatem. Tento přístup však u vzorku č. 3 není správný. S ohledem na měřítko a reálnou amplitudu profilu je povrch vzorku velmi drsný.

Sloupcové grafy vzorků č. 1, 2 a 5 mají normální rozložení, ale různé rozptyly. Rozložení hodnot u vzorku č. 1 vykazuje nejmenší rozptyl. Nejspíš proto, že povrch a profil vzorku se nejvíce podobá standardnímu profilu Bartona a Choubeyho (1977) s intervalem hodnot (4-6). Zatímco u vzorku č. 5 je subjektivita vizuální metody nejvíce patrná, kvůli většímu rozptylu hodnot.

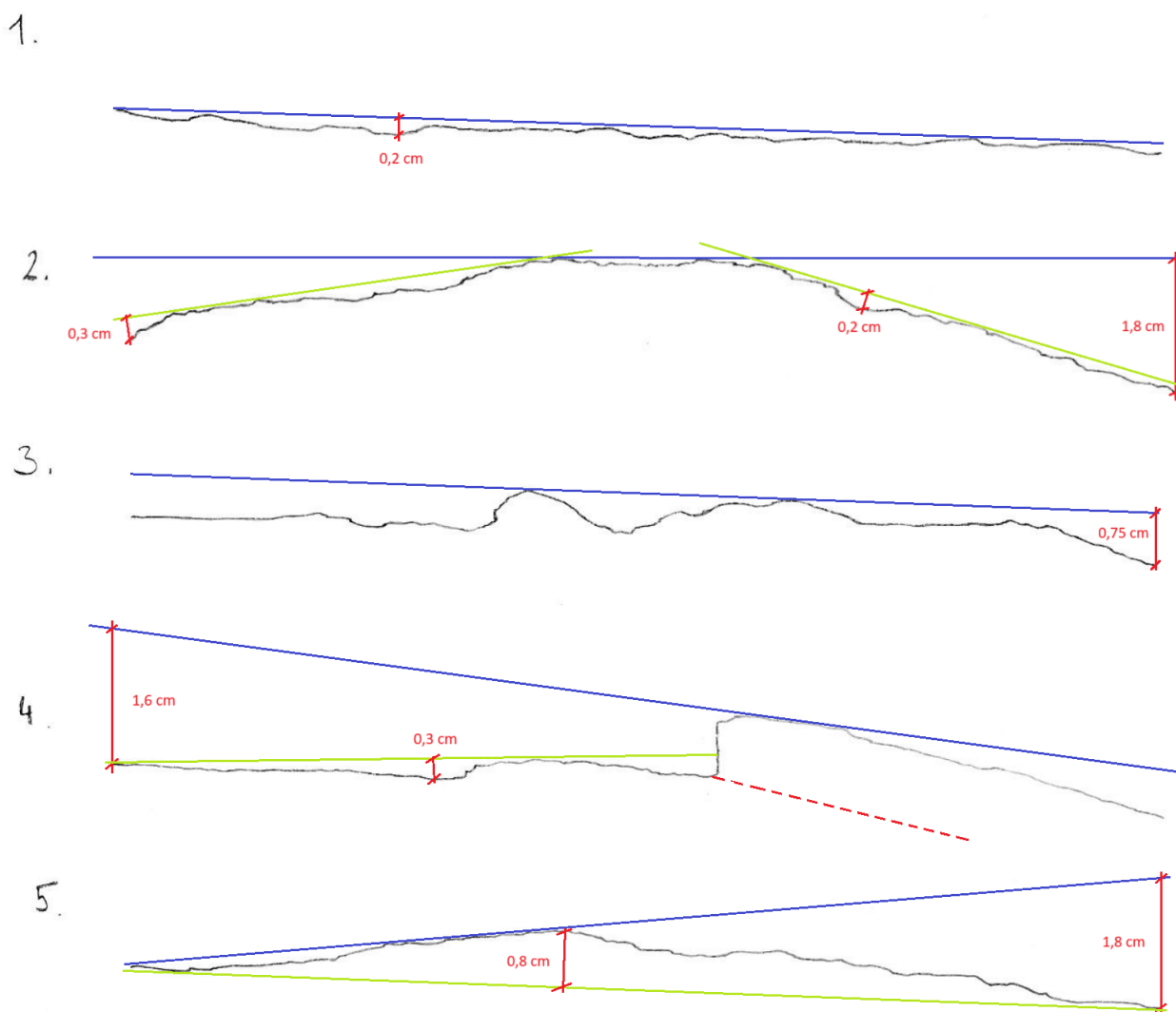
Speciálním případem je vzorek č. 4, který je povrchem hladký, ale uprostřed profilu se nachází „schod“ (Obr. 46). Při bližším ohledání vzorku je patrné, že se jedná o 2 diskontinuity. Tudíž měřený profil není na jedné průběžné diskontinuitě, ale na dvou (viz Obr. 46), které odděluje zmíněný „schod“. Z tohoto důvodu nejednoznačnosti jsme vzorek začlenili do průzkumu. Zajímalo nás hodnocení respondentů a jejich případné reakce. Respondenti se rozdělili na dvě skupiny. První nejpočetnější skupina počítala „schod“ do hodnocení drsnosti povrchu – nejčtenější hodnota ve skupině: JRC = 15. Tato skupina respektovala vyhodnocování JRC přesně podél profilu. Odskočení by se ale v tomto případě nemělo brát v úvahu při hodnocení drsnosti. Hodnota JRC by se měla stanovit mimo „chod“ na hladkém povrchu diskontinuity. Nevíme totiž, jak diskontinuita vypadá v terénu. Nejpravděpodobněji bude povrch této průběžné diskontinuity stejně hladký jako povrch vzorku bez „schodu“. Pravděpodobně se touto teorií řídila druhá nejpočetnější skupina respondentů, která určila JRC = 3 (interval 2-4). U vzorku č. 4 byl vyznačený profil matoucí a diskutabilní. Bylo by vhodnější, kdyby tento vzorek tvořil výjimku ve studii a profil na něm nebyl vyznačen – pouze by byla určena strana pro stanovení JRC. Účastníci by tak mohli více zapojit vlastní úsudek, což by nám umožnilo získat jiné rozložení hodnot JRC.

V Tab. 7 najdete přehled výsledků studie a vlastního měření.

Tab. 7 - Přehled výsledků studie a vlastního měření.

	vzorek 1 (JRC)	vzorek 2 (JRC)	vzorek 3 (JRC)	vzorek 4 (JRC)	vzorek 5 (JRC)
nejčtenější hodnoty studie	5 (4-6)	9 (8-10)	17 (16-18)	15 (14-16)	9 (8-10)
vlastní vizuál. hodnocení	6-8	12-14	18-20	2-4	10-12
modifikovaná metoda amplitudy	8,3	45,3	26	44	32
metoda amplitudy pomocí přímé hrany	6	>20	20	>20	>20
metoda amplitudy vypočtená rovnicí	5,5	39,3	19,6	36,3	39,3
vlastní stanovení amplitudy a přímé hrany, JRC vypočteno dle rovnice	5,5	14,7	19,6	14,6	20,7

Hodnoty JRC získané pomocí modifikované metody amplitudy a vypočtené z rovnice (18) jsou u vzorků č. 2, 4 a 5 vysoké. Odebrané profily vzorků č. 2 a 5 jsou obloukového tvaru. Jak již bylo zmíněno, profil vzorku č. 4 je specifický „schodem“ v profilu, který zapříčinil vysoké hodnoty amplitudy – lze vidět na Obr. 51 – a návazně JRC, které bylo získané výpočtem z rovnice (18) či odvozením ze šablony od Du et al. (2009). Amplituda by se podle teorie měla odečítat od referenční přímky, která se dotýká dvou nejvyšších vrcholů profilu. Jak lze vidět na Obr. 51, kvůli tomuto pravidlu na obloukových profilech a vzorku č. 4 vycházejí vysoké amplitudy a hodnoty koeficientu drsnosti diskontinuit.



Obr. 51 – Na vykreslených profilech je modrou čarou vykreslena přímá hrana, která respektuje teoretické pravidlo dotyku dvou nejvyšších bodů na profilu. Zelené čáry jsou polohy přímých hran, které navrhuji u komplikovaných profilů č. 2, 4 a 5 pro dosažení lepších výsledků měření JRC. Červenými čarami jsou zobrazeny místa odečtení nejvyšších amplitud profilu od přímých hran. Červená čárkovaná linie u profilu č. 4 znázorňuje pravděpodobné pokračování diskontinuity v hornině.

Dle vlastního názoru by se k měření amplitudy na zmíněných profilech v této studii mělo přistupovat jiným způsobem. Na profilu vzorku č. 2 jsem měření amplitudy provedla na zkosených hranách podle Obr. 51 (zelené linie). Tím jsem dosáhla menších hodnot amplitud a dle vlastního názoru reálnější hodnoty JRC vzorku č. 2., neboť v tomto případě chceme charakterizovat drsnost povrchu diskontinuity, a ne její vlnitost. V profilu č. 4 vykreslený „schod“ odděluje dvě různé diskontinuity (Obr. 51). Z toho důvodu jsem zvolila měření amplitudy na části jedné diskontinuity vybíhající ze spodní části „schodu“. Tím by se mělo přesněji zastihnout JRC dané diskontinuity v hornině. U vzorku č. 5 jsem aplikovala teorii, že amplituda změřená na profilu shora či zespoda (Obr. 51) by měla být identická. Tuto skutečnost jsem si ověřila na profilech vzorků č. 1 a 3, kde amplitudy měřené shora a zespoda identické jsou. Vzorky č. 1 a 3 byly pro měření amplitudy nejvhodnější. Jejich profily nejsou nijak zakřivené, proto vypočtené hodnoty JRC dobře charakterizují drsnost povrchu, viz Obr. 51. Pro srovnání hodnot JRC z upraveného vlastního měření metodou amplitudy s hodnotami z předchozích měření viz Tab. 7.

Na základě porovnání výsledků ze studie a vlastního měření, usuzuji, že vypočítání hodnot JRC pomocí rovnice (18) je z použitých metod ta nejpřesnější. Na základě rovnice (18) byla vytvořena základní šablona (Du et al., 2009), kterou jsem také vyhodnocovala JRC. Bohužel Du et al. (2009) přímo neuvádí, proč jsou hodnoty získané pomocí základní šablony tak vysoké. Ale uvádí, že šablona počítá s měřítkovým efektem, tedy že s rostoucí velikostí vzorku klesá hodnota JRC. Šablonou se získává koeficient drsnosti diskontinuit pro laboratorní velikost vzorku (10 cm), tudíž jsou hodnoty JRC vyšší. Dalo by se předpokládat, že pokud byla šablona vytvořena na základě rovnice (18), měly by obě metody vyhodnotit JRC profilů stejně. Z výsledků je patrné, že tomu tak není. V práci Du et al. (2009) se tento rozdíl nediskutuje. Šablonu jsem sice vytiskla v přesném měřítku – uvedeném v kapitole 3.2.1.1 – ale problém mohl nastat i někde jinde. Pro přesné měření JRC pomocí základní šablony od Du et al. (2009), bych dle vlastního názoru potřebovala podrobnější informace o způsobu provedení měření než ty, které poskytuje v práci Du et al. (2009). Z hodnot JRC získaných odečtením z diagramu (Obr. 14) lze vyvodit, že pro profily s větší amplitudou je tato metoda velmi orientační (>20). Z výše uvedených důvodů považuji hodnoty JRC vypočtené podle rovnice (18) za nejpřesnější výsledky vlastního měření.

Hodnoty koeficientu drsnosti diskontinuit vypočítané dle rovnice (18) a jeho nejčtenější hodnoty se u profilů č. 1 a 3 shodují nejvíce. U profilu č. 1 (JRC = 5,5) nejpřesnější hodnotu JRC (5) nebo interval (4-6) uvedlo 35 účastníků a u profilu č. 3 (JRC = 19,6) uvedlo 17 účastníků hodnotu JRC = 19 nebo interval (18-20). Z toho vyplývá, že 41 % respondentů úspěšně stanovilo JRC na profilu č. 1 a na profilu č. 3 stanovilo úspěšně JRC 20 % respondentů. Přesnost hodnot JRC získané studií u ostatních profilů bohužel v této práci zatím nelze ověřit. V budoucnu bude nutné ověřit výsledky pomocí objektivních technik. V rámci plánované diplomové práce, budou využity různé

metody přesného skenování povrchu např. již zmíněné bezkontaktní metody jako 3D laserová profilometrie nebo optická fotogrammetrie. Výsledky v diplomové práci budou následně porovnány s hodnotami JRC určenými v rámci této studie.

Na základě rozložení hodnot JRC získaných studií, lze tvrdit, že metoda vizuálního určení koeficientu drsnosti diskontinuit je subjektivní a tím nepřesná. Ke stejnému výsledku dospěli i Beer et al. (2002) a Alameda-Hernández et al. (2014). Alameda-Hernández et al. (2014) také zjistili, že vizuální odhady mají tendenci JRC podhodnocovat. Ze studie ale také vyplývá, že pokud vizuální metodou vyhodnocuje JRC více odborníků, je větší pravděpodobnost, že průměrná hodnota JRC bude přesnější. Díky tomu, bych mohla doporučit vyhodnocovat JRC ve více lidech.

Přesněji se však JRC stanoví výpočtem z rovnice (18), ve které figuruje změřená hodnota nejvyšší amplitudy a délka měřeného profilu, proto je ve výpočtu zohledněn i vliv měřítka. Měřením amplitudy na delších profilech se zvyšuje přesnost získaných hodnot JRC, neboť se snižuje vliv měřítka. Kvůli tomu je vždy lepší využít možnost měření amplitudy v terénu podél co nejdelších profilů a přímých hran – ideálně ve stejných rozměrech jako samotná diskontinuita. Možnosti měření však bývají často omezené. Ale i na laboratorních profilech je metoda amplitudy a přímé hrany přesnější než vizuální metoda. Je také praktická v nenáročnosti na vybavení, rychlosti stanovení amplitudy a jednoduchosti výpočtu JRC, proto je dobře použitelná v terénu s přístupnou diskontinuitou ale i v laboratoři. Ostatní metody určení JRC např. smykové zkoušky jsou přesnější než kontaktní metody, ale není vždy možnost získat obě části diskontinuity, navíc v nezvětralém či mechanicky neporušeném stavu. To je jedna z velkých nevýhod těchto přesných laboratorních zkoušek. Další nevýhodou by se mohly považovat vyšší náklady na tento typ zkoušek. Konkrétně přímými smykovými zkouškami ověřovali přesnost získaných výsledků JRC ve svých studiích např. Barton a Choubey (1977).

Na základě poznatků ze studie metodou měření amplitudy od referenční přímé hrany a následným výpočtem JRC z rovnice (18) získáme v praxi přesnější výsledky než stanovení vizuální metodou. Na druhou stranu se v praxi spíše uplatňuje určování JRC intervalem hodnot, neboť dle povahy projektu bereme v úvahu míru rizika subjektivního stanovení. Měli bychom také zohledňovat charakter diskontinuity, brát v úvahu velikost a kvalitu hodnoceného vzorku a posoudit možnou proměnlivost v rozsahu zájmového území. Koeficient drsnosti diskontinuit je důležitý v Barton-Bandisově kritériu porušení, a tím přesnost jeho stanovení ovlivňuje výsledky numerických analýz stability skalních stěn. Z těchto důvodů bychom se měli snažit s ohledem na dostupné možnosti, vždy JRC stanovit dle povahy projektu s co největší mírou přesnosti.

## 7. Závěr

Práce shrnula veškeré zásadní poznatky týkající se určování hodnot JRC s důrazem na metody stanovení JRC. Součástí práce byl průzkumu subjektivity vizuální metody stanovení JRC dle standardních profilů Bartona a Choubeyho (1977). V průzkumu jsme zatím jako jediní využili k hodnocení koeficientu drsnosti diskontinuit reálné horninové vzorky.

Z výsledků získaných od 85 respondentů, kteří hodnotili koeficient drsnosti diskontinuit na pěti horninových vzorcích, bylo zjištěno, že vizuální metoda stanovení JRC je značně subjektivní a nepřesná. Tento závěr byl porovnán se závěry obdobných studií Beer et al. (2002) a Alameda-Hernández et al. (2014), přičemž bylo zjištěno, že se shodují v názoru na subjektivitu a nepřesnosti vizuálního hodnocení. Dalším přínosem práce jsou doporučení pro praxi, jejichž účelem je zvýšit přesnost určování koeficientu drsnosti diskontinuit.

Na základě provedené studie lze doporučit jako přesnější praktickou metodu stanovení JRC tzv. modifikovanou metodu amplitudy a přímé hrany, ve které se JRC vypočítá dle stanovené rovnice. Dále se doporučuje stanovovat JRC na největších možných délkách profilů ve směru potenciálního smykového pohybu nadložního bloku horniny. Pro získání uceleného přehledu o drsnosti je vhodné měřit JRC na více místech jedné diskontinuity, pokud to charakter terénu a další okolnosti umožňují. Jestliže diskontinuita není *in-situ* v makroměřítku vlnitá, tak ani vzorek a jeho profil pocházející z této diskontinuity by neměly být zakřiveny.

Do budoucna by bylo vhodné na tuto práci navázat diplomovou prací zaměřenou na bezkontaktní metody měření JRC a jejich využití v praxi. Diplomová práce by zároveň mohla dále rozvinout a zpřesnit poznatky získané v rámci této studie.

## Použitá literatura

Alameda-Hernández, P., Jiménez-Perálvarez, J., Palenzuela, J. A., El Hamdouni, R., Irigaray, C., Cabrerizo, M. A., & Chacón, J. (2014). Improvement of the JRC calculation using different parameters obtained through a new survey method applied to rock discontinuities. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(6), 2047-2060. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0532-2>.

Aydin, A. (2008). ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. In: Ulusay, R. (eds) *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer, Cham. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-07713-0\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-07713-0_2).

Bandis, S., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1981). Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 18, No. 1, pp. 1-21). Pergamon. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90262-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90262-X).

Barton, N. (1971). A relationship between joint roughness and joint shear strength. *Proc. Int. Symp. On Rock Mech., Nancy* (pp. Paper1-8). Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/296798762>.

Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering geology*, 7(4), 287-332. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6).

Barton, N. R., & Bandis, S. C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In N. Barton & O. Stephansson (Eds.), *Rock joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints* (pp. 603–610). A. A. Balkema. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/302172581\\_Review\\_of\\_predictive\\_capabilities\\_of\\_JRC-JCS\\_model\\_in\\_engineering\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/302172581_Review_of_predictive_capabilities_of_JRC-JCS_model_in_engineering_practice).

Barton, N. (1982). Shear strength investigations for surface mining. *Proceedings of the 23rd US Rock Mechanics Symposium* (pp. 178-180).

Barton, N. (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4), 249-261. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513000449>.

Barton, N., & Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-82). ARMA. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/280021212>.

Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1), 1-54. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF01261801>.

Barton, N., & Quadros, E. (2015). Anisotropy is everywhere, to see, to measure, and to model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1323-1339. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0632-7>.

Barton, N., Wang, C., & Yong, R. (2023). Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(12), 3352-3379. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.002>.

Beer, A. J., Stead, D., & Coggan, J. S. (2002). Technical note estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s006030200009>.

Butcher, C., Buzzi, O., Giacomini, A., Bertuzzi, R., Griffiths, D. V., & Fityus, S. (2025). Shear Strength of a Large Limestone Discontinuity: In Situ Pull Test and Prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(2), 2203-2222. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04270-1>.

Du, S. G., Lin, H., Yong, R., & Liu, G. J. (2022). Characterization of joint roughness heterogeneity and its application in representative sample investigations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(6), 3253-3277. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02837-4>.

Du, S., Hu, Y., & Hu, X. (2009). Measurement of joint roughness coefficient by using profilograph and roughness ruler. *Journal of Earth Science*, 20(5), 890-896. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12583-009-0075-3>.

GeoSphere Austria. (2023). *GeoSphere Maps* [Online mapa]. Dostupné z: [https://maps.geosphere.at/de?basemap=default&scale=36111.909643&x=1514178.2439943117&y=6086361.764417914&layers=https%3A%2F%2Fgis.geosphere.at%2Fmaps%2Frest%2Fservices%2Fgrenzen%2Fadmin\\_grenzen\\_oesterreich%2FMapServer%2Chttps%3A%2F%2Fgis.geosphere.at%2Fimages%2Frest%2Fservices%2Fgeologie%2Fkarte\\_50%2FImageServer&visibilities=true%2Ctrue&opacities=1%2C1](https://maps.geosphere.at/de?basemap=default&scale=36111.909643&x=1514178.2439943117&y=6086361.764417914&layers=https%3A%2F%2Fgis.geosphere.at%2Fmaps%2Frest%2Fservices%2Fgrenzen%2Fadmin_grenzen_oesterreich%2FMapServer%2Chttps%3A%2F%2Fgis.geosphere.at%2Fimages%2Frest%2Fservices%2Fgeologie%2Fkarte_50%2FImageServer&visibilities=true%2Ctrue&opacities=1%2C1)

Goodman, R. E. (1976). Methods of geological engineering in discontinuous rocks.

Greif, V., & Drotár, T. (2011). Stanovenie koeficienta drsnosti puklín (JRC) metódou blízkej digitálnej fotogrametrie. Dostupné z: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://geopaleo.fns.uniba.sk/ageos/archive/2011\\_02/greif\\_drotar\\_2011.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://geopaleo.fns.uniba.sk/ageos/archive/2011_02/greif_drotar_2011.pdf).

Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). The Mohr-Coulomb criterion. *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles* (pp. 107–108). Elsevier Science.

Itasca International Inc. (2025). *UDEC. Itasca Software*. Dostupné z: <https://www.itscainternational.com/software/udec>

KSR TUL (2025). Katedra sklářských strojů a robotiky. (n.d.). *Fraktály – definice*. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://www.ksr.tul.cz/fraktaly/definice.html>

Kim, D. H., Gratchev, I., Hein, M., & Balasubramaniam, A. (2016). The application of normal stress reduction function in tilt tests for different block shapes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8), 3041-3054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0989-x>.

MacDonald, N. R., Packulak, T. R., & Day, J. J. (2023). A critical review of current states of practice in direct shear testing of unfilled rock fractures focused on multi-stage and boundary conditions. *Geosciences*, 13(6), 172. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/geosciences13060172>.

Marsch, K., Wujanz, D., & Fernandez-Steeger, T. M. (2019). On the usability of different optical measuring techniques for joint roughness evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(2), 811-830. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01606-y>.

Myers, N. O. (1962). Characterization of surface roughness. *Wear*, 5(3), 182-189. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90002-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90002-9).

Newland, P. L., & Allely, B. H. (1957). Volume changes during undrained triaxial tests on saturated dilatant granular materials. *Geotechnique*, 9(4), 174-182. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/geot.1959.9.4.174>.

Patton, F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. *ISRM Congress* (pp. ISRM-1CONGRESS). ISRM, 509-513

Petřkovská, L. (2013). Technická měření a metrologie, teoretický základ, přednáška 11: Kontrola obrobené plochy – drsnost povrchu [Přednáška]. Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Dostupné z: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad\\_11.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_11.pdf).

Ross-Brown, D. M., & Walton, G. (1975). A portable shear box for testing rock joints. *Rock mechanics*, 7(3), 129-153. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF01246721>.

Sayles, R. S., & Thomas, T. R. (1977). The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: a practical alternative to correlation. *Wear*, 42(2), 263-276. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90057-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90057-6).

Du, S. U., Yu, C. H. E. N., & Liangben, F. A. N. (1996). Mathematical expression of JRC modified straight edge. *Journal of Engineering Geology*, 4(2), 36-43. Dostupné z: <http://www.gcdz.org/en/article/id/9834?viewType=HTML>.

ČGS (2025), *mapa 1:50 000 (Lite)* [Online mapa]. Česká geologická služba. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geo/#>

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (2024). *Geologická mapa Slovenska M 1:50 000* [Online mapa]. Dostupné z: <https://app.geology.sk/gm50/>

Tan, X., Ren, Y. K., Li, T. L., Zhou, S. H., Zhang, J. C., & Zhou, S. K. (2021). In-situ direct shear test and numerical simulation of slate structural planes with thick muddy interlayer along bedding slope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 143, 104791. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104791>.

Tatone, B. S., & Grasselli, G. (2010). A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(8), 1391-1400. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.006>.

Xia, P., Hu, X., Wu, S., Ying, C., Xu, C., Wang, X., & Chen, H. (2023). Study on shear strength characteristics of columnar jointed basalt based on in-situ direct shear test at Baihetan hydropower station. *Journal of Earth Science*, 34(4), 1280-1294. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1669-2>.

Yong, R., Huang, L., Hou, Q., & Du, S. (2020). Class ratio transform with an application to describing the roughness anisotropy of natural rock joints. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 5069627. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2020/5069627>.

Yong, R., Ye, J., Li, B., & Du, S. G. (2018). Determining the maximum sampling interval in rock joint roughness measurements using Fourier series. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 101, 78-88. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.008>.