

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geotechnologie



Jonáš Racek

Využití klasifikací horninových masivů pro
hodnocení náchylnosti skalních svahů k řízení
v podmínkách Českého masivu

Use of rock mass classifications for rock fall susceptibility
analysis in the conditions of the Bohemian Massif

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D.
Konzultant: Ing. Josef Rott, Ph.D.

Praha 2020

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

V dne

Podpis autora

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Mgr. Janu Blahůtovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce a konzultantovi Ing. Josefu Rottovi, Ph.D. za odborný názor. Dále svému bratru Mgr. O. Rackovi za modely skal a motivaci ke studiu a A.S. za všeobecnou péči.

Název práce: Využití klasifikací horninových masivů pro hodnocení náchylnosti skalních svahů k řízení v podmínkách Českého masivu

Autor: Jonáš Racek

ústav: Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D. Konzultant: Ing. Josef Rott, Ph.D.

Abstrakt: Tato práce se zabývá klasifikačními systémy horninových masivů. Cílem práce je vybrané systémy popsat, porovnat a posoudit jejich možné využití v podmínkách Českého masivu pro hodnocení náchylnosti skalních svahů ke skalnímu řízení. Část práce se věnuje skalnímu řízení a základním mechanickým vlastnostem horninového masivu. Další část popisuje vybrané klasifikační systémy, konkrétně pak RQD, RSR, RMR, SMR, Q-system, Q-slope, GSI, RSR-PR a QTS. Tyto systémy byly následně využity pro vyhodnocení stability skalních svahů na třech geologicky odlišných lokalitách Českého masivu. Poznatky z měření v terénu a zpracování dat byly následně použity pro posouzení možného využití jednotlivých klasifikačních systémů.

Klíčová slova: stabilita; klasifikace; skalní řízení; Český masiv; skalní horniny; SMR; RMR; Q-system; Q-slope; RQD; GSI; RSR; RSR-PR; QTS

Title: Use of rock mass classifications for rock fall susceptibility analysis in the conditions of the Bohemian Massif

Author: Jonáš Racek

institute: Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics

Supervisor: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D.,

Co-supervisor: Ing. Josef Rott, Ph.D.

Abstract: This thesis deals with rock mass classification systems. The aim of the thesis is to describe and compare selected systems and evaluate their possible use in the Bohemian Massif for assessing the stability of the rock slopes in relation to their susceptibility to rock falls. A part of the thesis deals with rock falls and basic mechanical characteristics of a rock mass. Further on, the thesis describes selected classification systems, specifically RQD, RSR, RMR, SMR, Q-system, Q-slope, GSI, RSR-PR and QTS. These systems were then used for evaluation of stability of rock slopes on three geologically different locations of the Bohemian Massif. information from measurement in field and processing of measured data was used for assessing for possible use of each classification system.

Keywords: stability; classification; rock fall; Bohemian Massif; SMR; RMR; Q-system; Q-slope; RQD; GSI; RSR; RSR-PR; QTS

Obsah

Seznam použitých zkratk	3
Úvod	4
1 Řízení	5
1.1 Klasifikace	5
1.2 Příčiny řízení	6
1.2.1 Podmínky řízení	6
1.2.2 Faktory řízení	7
2 Mechanické vlastnosti masivu	8
2.1 Klasifikace hornin podle pevnosti v prostém tlaku	8
2.2 Vlastnosti diskontinuit	8
2.2.1 Hrubost puklinové stěny	9
2.2.2 Geometrie diskontinuit	9
2.2.3 Výplň diskontinuit	9
3 Klasifikační systémy horninových masivů	11
3.1 Definice a použití klasifikačních systémů	11
3.2 Výhody klasifikačních systémů	11
3.3 Omezení a nevýhody klasifikačních systémů	12
3.4 Rozdělení klasifikačních systémů	12
3.5 Vybrané klasifikační systémy	12
3.5.1 Rock quality designation	12
3.5.2 Rock Structure Rating (RSR)	14
3.5.3 Rock Slope Rating	16
3.5.4 Q-system a Q-slope	17
3.5.5 Rock mass rating a Slope mass rating	24
3.5.6 Geological Strength Index	32
3.5.7 Kvalita textura struktura QTS	35
4 Hodnocení skalních svahů	38
4.1 Metodika hodnocení	38
4.2 Hodnocené svahy	40
4.2.1 Pastýřská stěna	40
4.2.2 Hradiště Starý loket	44
4.2.3 Branická skála	47
4.2.4 Diskuze	51
5 Závěr	52
Literatura	53
Seznam obrázků	56
Seznam tabulek	57

A Přílohy	59
A.1 Dokumentační body a výpočet hodnot	59
A.1.1 Pastýřská stěna	59
A.1.2 Hradiště starý loket	59
A.1.3 Branická skála	59

Seznam použitých zkratek

- D.B. - Dokumentační bod
- GSI - Geological Strenght Index
- Hr - Hammer rebound
- Q - výsledná hodnota Q-systému
- RMR - Rock Mass Rating
- RQD - Rock Quality Designation
- RSR - Rock Structure Rating
- RSR-PR - Rock Slope Rating - Point Rating
- RSR-RC - Rock slope Rating - Risk classification
- *SRF* - Stress Reduction Factor
- *SRF_{slope}* - Strength Reduction Factor
- UCS - Uniaxial Compressive strength

Úvod

Existuje velké množství různých klasifikačních systémů horninových masivů, které jsou v průběhu času vylepšovány a modifikovány. Současně s tím vznikají systémy nové. Většina starších systémů vznikla pro využití při výstavbě podzemních staveb ve specifických horninách. Systémy samotné a později jejich modifikace začaly být používány pro navrhování a posuzování stability skalních svahů.

Cílem této práce bylo porovnat tyto klasifikační systémy a určit jejich využitelnost pro hodnocení stability svahů v složitých geologických podmínkách Českého masivu, kde se vyskytují různé horninové typy a inženýrskogeologické podmínky, se zaměřením na náchylnost ke skalnímu řícení.

Na základě rešerše byly zvoleny klasifikační systémy, které jsou často používané v praxi. Konkrétně se jedná o Rock Quality Designation, Geological Strength Index (GSI), Q-system a Rock Mass Rating (RMR) s jejich modifikacemi pro hodnocení svahů Q-slope a Slope mass Rating (SMR). Dále byly vybrány klasifikace Kvalita Struktura a Textura (QTS) O. Tesaře (1984) a rychlé bodové vyhodnocení RSR-PR, které byly vyvinuty pro využití v tuzemských podmínkách. Klasifikace Rock Structure Rating (RSR) byla zahrnuta spíše jako zástupce starších, jednodušších metod.

Pomocí zvolených systémů podrobněji popsanych v podkapitole 3.5 Vybrané klasifikační systémy, byly hodnoceny tři skalní svahy na geologicky odlišných lokalitách. V závěru práce jsou shrnuty poznatky z výsledných posouzení a samotného sběru dat v terénu.

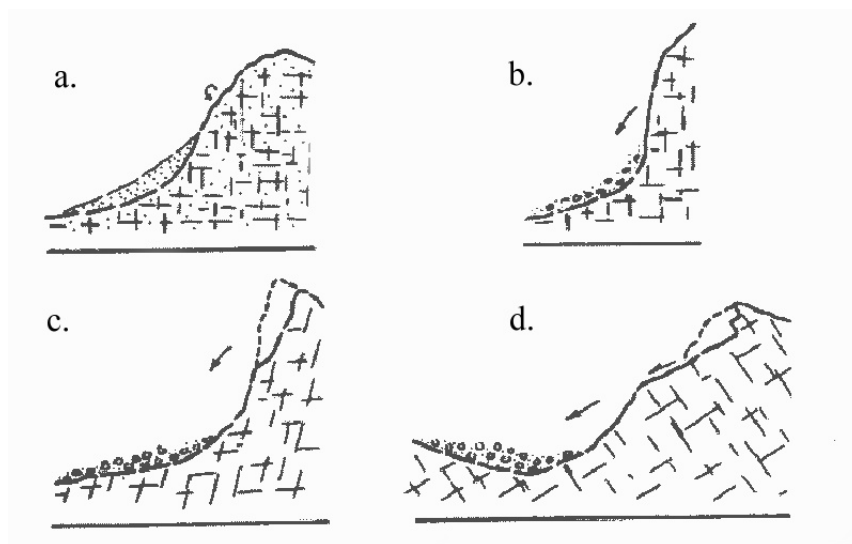
1. Řízení

Skalní řízení je náhlý krátkodobý pohyb horninových hmot po strmých svazích řízený gravitací, při kterém se postihnuté hmoty rozvolňují a krátkodobě ztrácejí kontakt s podložím. Rychlost přemísťovaných hmot může být až 100 km/h. Samotnému řízení mohou předcházet plouživé, nebo sesuvné pohyby. Stejně tak se zříčené hmoty mohou po dopadu pohybovat formou stékání a sesouvání (Ondrášik a Rybář, 1991).

1.1 Klasifikace

R.Ondrášik a J.Rybář (1991) uvádějí tyto vzorové příklady řízení (viz obr. 1.1)

:

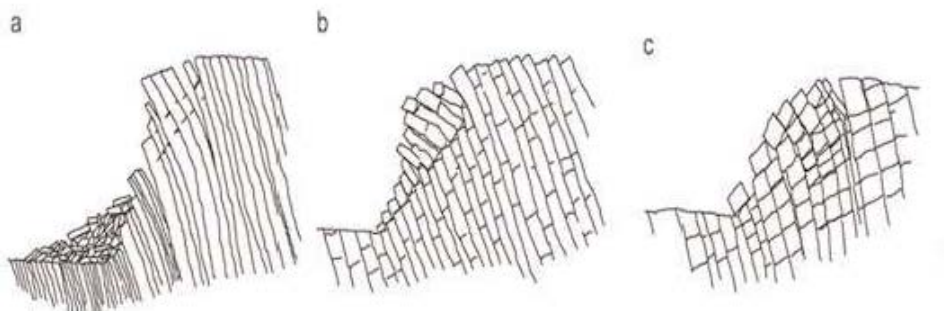


Obrázek 1.1: příklady svahových pohybů typu řízení, převzato z Ondrášik a Rybář (1991)

- drobení** - Náhlé přemístění drobných úlomků poloskalní horniny až zeminy. Úlomky se přemísťují kutálením a během pohybu se rozdrobují. Úlomky tvoří na úpatí svahu nestabilní haldy, které mohou být postiženy jinými svahovými pohyby už při malém zatížení.
- osypávání** - Náhlé přemístění úlomků skalních hornin volným pádem, po kterém následuje valení nebo posouvání po svahu. Úlomky tvoří na úpatí svahu osypové kužele a haldy.
- odvalové řízení** - Náhlé přemístění skalních stěn, převážně volným pádem. Řízení předchází pozvolné separování skalních bloků, nebo částí masivu, které následovně uvolněním a volným pádem. Po dopadu se zříčená skalní hmota dále valí do vzdálenosti mnohokrát převyšující délku volného pádu. Odvalové řízení lze pozorovat převážně v horských a vysokohorských oblastech, ale menší

řícení tohoto typu se odehrávají i na okrajích plošin české křídové pánve, například v labské soutěsce mezi Děčínem a Hřenskem. Řícení může předcházet plouživé překlápění bloků (toppling viz obr. 1.2)

- d. **planární řícení** náhlé přemístění skalních hmot kombinací pohybu po planární kluzné ploše a volného pádu. Pokud pohyb probíhá po dvou plochách, jedná se o klínové porušení.



Obrázek 1.2: Mechanismus překlápění bloků: a, ohybové b, blokové c, ohybově-blokové, převzato z Goodman (1976)

1.2 Příčiny řícení

Příčiny svahových pohybů, tedy i řícení, mohou být rozděleny na podmínky a faktory. Podmínky jsou přírodní poměry, ve kterých se svahové pohyby odehrávají. Jedná se o geologické, geomorfologické, hydrogeologické, hydrologické a klimatické podmínky. Antropogenní nebo přírodní faktory pak tyto podmínky mění, a tím vyvolávají svahový pohyb (Ondrášik a Rybář, 1991).

1.2.1 Podmínky řícení

Geologické poměry, především geologická struktura masivu (orientace diskontinuit), mají zásadní vliv na pravděpodobnost vzniku řícení (Ondrášik a Rybář, 1991). Každá hornina má svojí typickou strukturu a vývoj puklinového systému. Proto jsou pro různé horniny typické i různé mechanismy porušení.

Pro sedimentární skalní masivy jsou to planární porušení podél ploch vrstevnatosti, po kterých se vyvíjí i puklinový systém. Původně vodorovné plochy bývají často zvrásněny, nebo ukloněny. Při malé rozteči jednotlivých vrstev či puklin v kombinaci s tektonickými puklinami může docházet i k topplingu. Hlavní vliv na stabilitu daného svahu má tedy hustota, orientace, zvrásnění, nebo hrubost vrstev a puklin.

Mechanismy porušení masivů z vyvěřelých hornin mohou být velmi rozdílné v závislosti na topografii, napjatostních podmínkách a zvětrání. Puklinový systém, tvořící kvádrotité nebo deskovité bloky, vzniká nejčastěji podél exfoliačních ploch. Stabilitu svahu tedy určuje četnost a orientace puklin a výskyt zlomových zón.

Stabilita svahu tvořeného metamorfovanými horninami je silně ovlivňována foliací a kliváží. Planární nebo překlápěcí mechanismus porušení závisí na orientaci anizotropie (Stead a kol., 2011).

Hydrogeologické poměry jsou vázané na puklinové systémy. Proudící voda podporuje degradaci puklinové stěny, zvyšuje pórový tlak a zhoršuje mechanické vlastnosti výplně.

Klimatické poměry ovlivňují vznik řízení převážně cyklickými změnami teplot v přípovrchové změně teplot. Při těchto změnách vznikají vratné a nevratné deformace rozvolňující masiv. Značný vliv mají také teploty pod bodem mrazu. Kromě mrazového zvětrávání může promrzlá povrchová zóna skalní stěny znemožnit drenáž podzemní vody. Vzduť hladina pak může hydrostatickým tlakem narušit stabilitu stěny (Ondrášík a Rybář, 1991).

1.2.2 Faktory řízení

Periodické faktory způsobují střídavé snížení a zvýšení stupně stability svahu. Jedná se například o působení mrazu nebo stupně nasycení. Neperiodické faktory působí jednorázově nezvratné změny ve stabilitě.

Záruba a Mencl (1987) uvádějí tyto faktory vedoucí k nestabilitě svahu: Změna sklonu svahu, změna výšky svahu, přitěžování násypy, přirozené i uměle vyvolané otřesy, vibrace, změna obsahu vody, působení proudění podzemní vody, činnost mrazu, zvětrávání, změna vegetačního pokryvu.

Při posuzování stability svahu je nutné určit faktor, který nejvíce přispívá ke vzniku svahového pohybu (Ondrášík a Rybář, 1991)

2. Mechanické vlastnosti masivu

V kapitole budou popsány základní mechanické vlastnosti masivů, které mají zásadní vliv na jejich celkovou stabilitu. Mnoho klasifikačních systémů tyto vlastnosti, ač upravené, používá jako vstupní parametry.

2.1 Klasifikace hornin podle pevnosti v prostém tlaku

Pevnost v prostém tlaku (UCS) má pro stabilitu masivu mnohem větší význam než obsah minerálů (Singh a Goel, 2011). Norma ČSN EN ISO 14689-1 klasifikuje horniny do 7 tříd dle jejich pevnosti (viz tabulka 2.1). Některé extrémně měkké horniny mohou být popsány jako zeminy.

Název	Pevnost v prostém tlaku [Mpa]
Extrémně měkká	menší než 1
Velmi měkká	1 až 5
Měkká	5 až 25
Středně pevná	25 až 50
Pevná	50 až 100
Velmi pevná	100 až 250
Extrémně pevná	více než 250

Tabulka 2.1: Klasifikace horniny podle ČSN EN ISO 14689-1

Hodnotu UCS lze, mimo jiných metod, získat z povrchové tvrdosti horniny, odvozením z odrazového čísla (H_r) Schmidtova kladiva pomocí empirických vztahů jako je například rovnice

$$UCS = 4,52927^{(0,05609RL)} \quad (2.1)$$

kde RL je odrazové číslo (Wang a kol., 2017).

Oproti přesnějším laboratorním zkouškám s vysokými nároky na kvalitu a kvantitu reprezentativních vzorků, má tento způsob měření in-situ na skalním masivu či vrtném jádru výhodu v rychlosti a ceně (Singh a Goel, 2011).

Díky tomu bylo vyvinuto mnoho korelačních vzorců pro převod H_r na UCS pro různé horninové typy. Takto získané hodnoty lze využít například v klasifikační metodě RMR (Wang a kol., 2017).

2.2 Vlastnosti diskontinuit

Diskontinuity a jejich parametry mají zásadní negativní vliv na mechanické vlastnosti skalního masivu, ať už se jedná o mikropukliny ve vzorku při určování pevnosti v prostém tlaku, nebo o hlavní puklinové systémy skalního svahu. Hranaté bloky s čistými a hrubými spárami tvoří mnohem pevnější masiv než oblé bloky se zvětralými stěnami spár (Hoek, 2007).

Pro určování stability je proto zásadní tyto parametry co nejpřesněji popsat. Jednou ze základních vlastností je schopnost diskontinuity přenášet střížné napětí. Za účelem získání kvantitativního popisu bylo proto zavedeno několik koeficientů, které jsou užívány v klasifikačních systémech (Singh a Goel, 2011). Popis těchto vlastností je i součástí normy ČSN EN ISO 14689-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – pojmenování, popis a klasifikace hornin (ČSN EN ISO 14689-1).

2.2.1 Hrubost puklinové stěny

Hrubost stěny je velmi důležitým faktorem v celkové střížné pevnosti. Nejvýznamnější je v případě, že se jedná o puklinu s do sebe zapadajícími nerovnostmi. Význam hrubosti klesá se zvyšující se otevřeností a posunem pukliny (Singh a Goel, 2011). Hrubost a alterace stěny pukliny proto bývá vstupním parametrem ve většině klasifikačních systémů skalních masivů (např J_r v Q-systému).

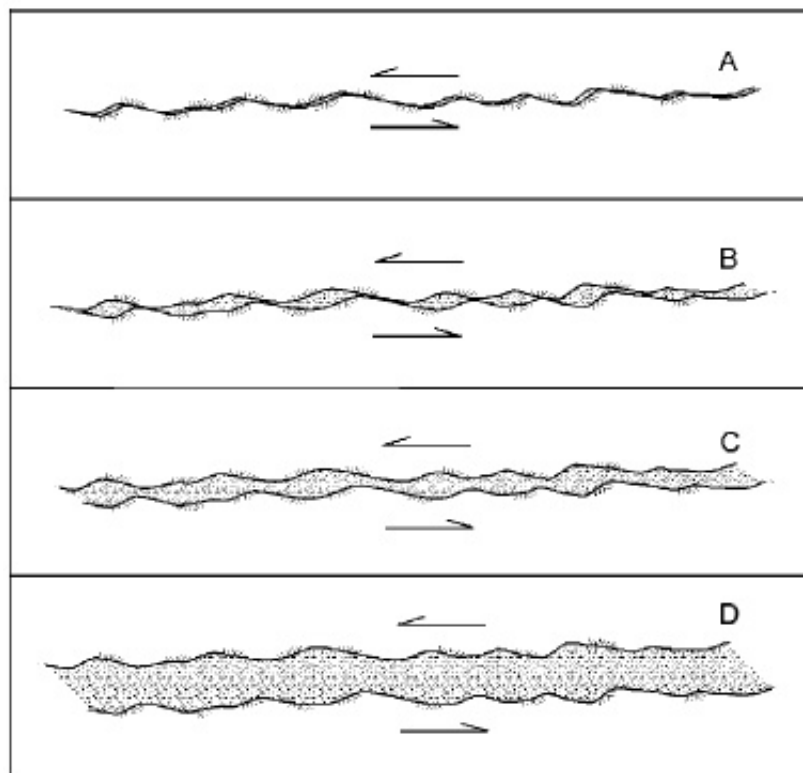
2.2.2 Geometrie diskontinuit

Orientace diskontinuit ve skalním masivu má velký význam na stabilitu svahu. Proto je důležité správně identifikovat a popsat kriticky orientované diskontinuity. Dalšími významnými parametry jsou například délka, otevřenost a průběžnost.

2.2.3 Výplň diskontinuit

Vlastnosti materiálu vyplňujícího diskontinuitu mohou mít v určitých případech větší význam než vlastnosti horniny tvořící masiv. Jakákoliv vlhká jílová výplň o dostatečné tloušťce usnadní blokům masivu pohyb po diskontinuitě (Hoek a Bray, 1981). Barton (Barton a kol., 1974) uvádí následující kategorie vyplněných diskontinuit (viz obr. 2.1)

1. Kategorie A - Přímý kontakt hornina/hornina už při malém posunu. Střížná pevnost je srovnatelná s nevyplněnou diskontinuitou. Při posunu vzniká díky dilataci záporný pórový tlak.
2. Kategorie B - Při větším posunu nastává kontakt hornina/hornina jako u A. Dilatace a její složka střížné pevnosti je omezena, stejně jako záporný pórový tlak.
3. Kategorie C - Kontakt hornina/hornina nenastává ani při větším posunu, ale v místech, kde se vrcholky nerovností vzájemně přibližují, narůstá napětí. V těchto místech při rychlém posunu vzrůstá pórový tlak a střížná pevnost klesá. Naopak při pomalém posunu nastává konsolidace a odvodnění do míst s nižším tlakem. Střížná pevnost je v tomto případě větší.
4. Kategorie D - Rozevřenost diskontinuity několikrát přesahuje amplitudu nerovnosti stěny. Pevnost závisí na vlastnostech výplně.



Obrázek 2.1: Kategorie diskontinuit podle mocnosti výplně. (Barton a kol., 1974)

3. Klasifikační systémy horninových masivů

3.1 Definice a použití klasifikačních systémů

Klasifikace horninových masivů je empirickým přístupem k inženýrskogeologickému problému a je založena na roztrídění horninových masivů do skupin a tříd, dle jejich parametrů (Bieniawski, 1989) a přiřazení číselné hodnoty nebo specifického popisu, který poskytuje relativně objektivní popis a předpokládané chování masivu. Za horninový/skalní masiv považujeme horninu in-situ, včetně jejích diskontinuit a zvětrávacích profilů (Singh a Goel, 2011).

Klasifikační metody vznikaly převážně pro popisování masivu při konstrukci podzemních staveb a později se začaly využívat a modifikovat i pro posuzování skalních svahů. Nacházejí největší uplatnění při orientační a předběžné fázi projektu či průzkumu, kdy informace o horninových, napjatostních a hydrogeologických podmínkách chybí a mohou poskytnout alespoň základní údaje o charakteru masivu, jako je pevnost, složení deformační vlastnosti aj. Mimo to také indikují, jaké parametry a informace budou pro daný projekt zásadní (Bieniawski, 1993).

Zároveň by však klasifikační metody neměly sloužit jako náhrada za metody analytické, terénní průzkum a úsudek inženýrského geologa (Bieniawski, 1993), avšak měly by je doplňovat. V dnešní praxi se totiž využívá kombinace metod empirických, analytických, observačních a numerických (Singh a Goel, 2011). Například parametry pevnosti a deformace odvozené z klasifikace horninového masivu mohou být použity jako vstupní data pro numerické modelování stability, deformace, atd. (Abbas a Konietzky, 2017). Jako nejdůležitější cíle klasifikačních systémů uvádí Bieniawski (1993) tyto:

- určit, jaké parametry nejvíce ovlivňují chování horninového masivu
- rozdělit části masivu do kvalitativních tříd a popsat jejich základní charakteristiky
- umožnit vzájemné porovnání horninových masivů na různých lokalitách
- odvodit kvantitativní data
- usnadnit komunikaci mezi projektantem a geologem
- doporučit vhodné technologické a pracovní postupy

3.2 Výhody klasifikačních systémů

V praxi se často inženýři, resp. inženýrství geologové nespokojí s geologickým popisem a upřednostňují číselné vyjádření. Klasifikační systémy jsou užitečným nástrojem pro převedení celkového stavu masivu do číselné hodnoty (Singh a Goel, 2011). Další výhodou je, že určují všechny klíčové parametry pro daný typ skalního masivu a zároveň postup při sběru vstupních dat (Abbas a Konietzky, 2017). Takto sjednocená data lze snáze využít pro statistické zpracování.

3.3 Omezení a nevýhody klasifikačních systémů

Většina klasifikačních systémů vynikla pro konkrétní typ skalního masivu, například Q-system byl určen pro žulový masiv, a proto je při použití systému v jiných podmínkách třeba obezřetnosti. Žádný systém také nehodnotí všechny parametry stejnou vahou. V krajních hodnotách své škály bývají klasifikace přesnější. Pokud se však kvalita masivu blíží středním hodnotám, spolehlivost se snižuje. Výběrem kombinací vhodných metod na základě zkušeností se přesnost popisu zvyšuje (Singh a Goel, 2011).

V každé části skalního masivu se mohou parametry velmi lišit, a proto je lepší ke každému parametru přidělit rozsah jeho hodnot. Pokud chceme pro celek určit jednu hodnotu, je třeba zvolit správnou metodu statistického zpracování dat (např. aritmetický průměr u RMR a GSI, nebo geometrický průměr u Q-systému). (Singh a Goel, 2011).

Problémy také mohou nastat, pokud jsou klasifikační systémy použity nevhodně, například při použití pouze jednoho systému, ignorování analytických a observačních metod nebo použití nedostatečného množství kvalitních dat (Bieniawski, 1989).

Pro masivy poškozené odstřely a velmi specifické oblasti by z principu neměly být klasifikace používány. Jedná se o podmořské oblasti, regiony postižené mrazovým zvětráváním, velmi nepravidelnými silnými srážkami či jinak neobvyklými geologickými a morfologickými podmínkami (Singh a Goel, 2011).

3.4 Rozdělení klasifikačních systémů

Klasifikace lze rozdělit na kvalitativní, které masiv popisují slovně (např. GSI, Rock load), a kvantitativní, vyjadřující stabilitu číselnou hodnotou (RMR, RSR, Q-system, nebo RQD) (Abbas a Konietzky, 2017).

3.5 Vybrané klasifikační systémy

3.5.1 Rock quality designation

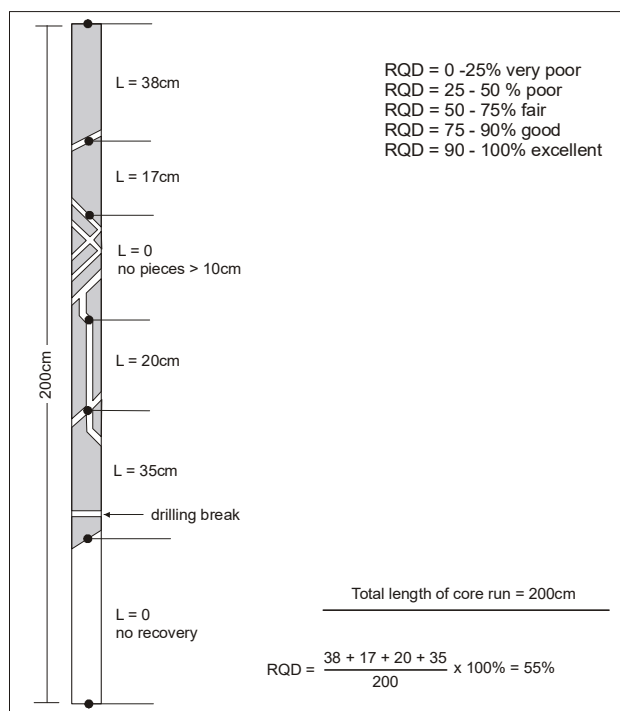
Rock quality designation, klasifikace představená D.U. Deere (1963), je založena na kvantitativním popisu puklinového systému a horninových bloků. Primárně vychází z popisu vrtného jádra, ale pokud není kvalitní jádro k dispozici, je možné jeho hodnotu získat převodem z objemového součtu puklin nebo seismické metody využívající poměru rychlostí šíření seismických vln v masivu a v neporušeném vzorku horniny (Singh a Goel, 2011). Hodnota RQD se využívá ve výpočtech složitějších klasifikačních systémů.

Přímá metoda

Při výpočtu RQD z vrtného jádra vychází jeho hodnota ze vzorce

$$RQD = \frac{l_{10}}{L_c} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kde l_{10} je suma všech kousků jádra s délkou větší než 10 cm a L_c je celková délka vrtného jádra (viz obr. 3.1). RQD tedy vyjadřuje procento nepoškozených kousků jádra delších než 10 cm v celkové délce jádra.



Obrázek 3.1: Postup při stanovení hodnoty RQD z vrtného jádra, převzato z Palmstrom (2005)

Pro určení správné hodnoty RQD je nutné, aby jádro bylo co nejzachovalejší, a proto je potřeba zvolit správnou technologii vrtání. Je doporučeno použít minimálně dvojistou jádrovnicí s diamantovou korunkou o průměru alespoň 54,7 mm (Singh a Goel, 2011). Protože je nezbytné odlišit pukliny původního masivu a pukliny vzniklé v důsledku vrtání a manipulace s jádrem (například odtržení), geolog by měl být průběhu vrtných prací přítomen. Nepůvodní pukliny mohou být identifikovány i podle vzájemného těsného zapadnutí přilehlých kousků jádra a ve výpočtu je samozřejmě potřeba tyto pukliny ignorovat (Singh a Goel, 2011).

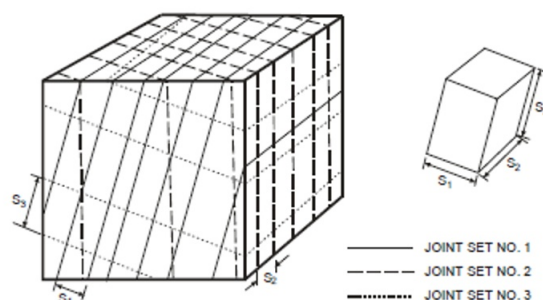
Metoda objemového součtu puklin

Volumetric Joint Count (J_v) představený A. Palmströmem (1982) je definován jako suma hustoty puklin (počet puklin na jednotku objemu) všech puklinových systémů (viz obr. 3.2).

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (3.2)$$

kde S_i je vzdálenost mezi jednotlivými puklinami systému. J_v tedy vyjadřuje počet puklin na jednotku objemu.

V případě, kdy nejsou puklinové systémy zřetelné a pukliny jsou v masivu distribuované spíše náhodně, je možné vypočítat hustotu všech puklin na jednotku



Obrázek 3.2: Blok obsahující 3 puklinové systémy (Palmstrom, 1982)

plochy. Aby bylo dosaženo objemového rozměru, je nutné hodnotu hustoty vynásobit faktorem K , nabývajícím hodnot 1,1 až 1,5 v závislosti na rovnoměrnosti distribuce puklin ve všech směrech (Palmstrom, 1982).

Další úpravou je zavedení náhodných puklin na základě „náhodných vzdáleností“ (R):

$$J_v = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i} \right) + \frac{N_r}{R\sqrt{A}} \quad (3.3)$$

kde N_r je počet náhodných puklin a může být odvozen z naměřené hustoty náhodných puklin. A je plocha zkoumané oblasti v m^2 (Palmstrom, 2005).

Korelační vztahy mezi RQD a J_v jsou dány následujícími rovnicemi:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (3.4)$$

je starší rovnice vhodná pro bloky plochého nebo dlouhého tvaru (Palmstrom, 1982).

$$RQD = 110 - 2.5J_v \quad (3.5)$$

je novější, upravená rovnice vhodnější pro bloky kvádrotitého tvaru (Palmstrom, 2005). Nejedná se však o příliš přesnou korelaci, obzvláště při délce kusů jader okolo 10 cm (Palmstrom a Broch, 2006).

Omezení

RQD, jako jednoduchý klasifikační systém, nepopisuje zkoumaný masiv příliš podrobně. V přímé variantě vycházející z rozpukání jádra jde pouze o jednorozměrnou reprezentaci masivu, tudíž nemůže zohlednit sklon, orientaci nebo délku puklin. Velký problém se skrývá v ostré hranici velikosti kousku jádra 10 cm, kdy se v extrémním případě může změnou vzdálenosti mezi puklinami celé délce jádra o 1 cm změnit hodnota RQD z 0 na 100%. Není vhodný pro korelaci s jinými parametry, ale v jednodušších podmínkách blokového masivu bývá pro určení stability dostačující (Palmstrom, 2005).

3.5.2 Rock Structure Rating (RSR)

Kvantitativní klasifikace Rock structure rating (RSR) představená v G.E. Wickhamem a kol. (1972) určená primárně pro ražbu tunelů popisuje kvalitu

skalního masivu, a zároveň doporučuje vhodné podpůrné stavební prvky (Bieniawski, 1989). RSR vychází ze tří parametrů A, B, C. Každému parametru je dle tabulky přidělen určitý počet bodů. Hodnota RSR (nabývající maxima 100) je pak dána součtem všech bodů přidělených parametrům.

$$RSR = A + B + C \quad (3.6)$$

Parametr *A* popisuje celkový charakter masivu. Závisí na struktuře, typu a tvrdosti horniny. Maximální počet bodů je 30 a minimální 6 (Tabulka 3.1).

Parametr *B* popisuje puklinové systémy v masivu. Závisí na jejich hustotě, směru a sklonu v závislosti na směru raženého tunelu. Maximální počet bodů je 45, minimální 7 (Tabulka 3.2).

Hodnota Parametru *C* je závislá hydrogeologických podmínkách (očekávaného přítoku do tunelu) a stavu puklin. Nabývá maxima 25 a minima 6 bodů (Tabulka 3.3).

RSR je jeden z prvních klasifikačních systému skalních masivů. Výhodou systému je jednoduchost a rychlost vyhodnocení, ale pro posuzování stability svahu není ze své podstaty příliš vhodný a měl by sloužit spíše jako doplňková metoda.

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decomposed				
Igneous	1	2	3	4	Massive	Slightly folded or faulted	Moderately folded or faulted	Intensively folded or faulted
Metamorphic	1	2	3	4				
Sedimentary	2	3	4	4				
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

Tabulka 3.1: Hodnoty parametru A, (Bieniawski, 1989)

Average joint spacing	Strike perpendicular to Axis					Strike parallel to Axis		
	Direction of Drive					Direction of Drive		
	Both	With Dip		Against Dip		Either Direction		
	Dip of Prominent Joints ^a					Dip of Prominent Joints		
	Flat	Dipping	Vertical	Dipping	Vertical	Flat	Dipping	Vertical
1. Very closely jointed, < 2 in	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed, 2 – 6 in	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately jointed, 6 – 12 in	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky, 1 – 2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive, 2 – 4 ft	36	38	40	33	35	36	24	28
6. Massive, > 4 ft	40	43	45	37	40	40	38	34

^a Dip: flat: 0 – 20°, dipping: 20 – 50°, and vertical: 50 – 90°

Tabulka 3.2: Hodnoty parametru B, (Bieniawski, 1989)

Anticipated water inflow gpm/1000ft of tunnel	Sum of Parameters A+B					
	13-44			45-75		
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, < 200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200 - 1000 gpm	15	22	7	21	16	12
Heavy, > 1000 gpm	10	8	6	18	14	10

^b Joint condition: good = tight or cemented; fair = slightly weathered or altered; poor = severely weathered, altered or open

Tabulka 3.3: Hodnoty parametru C, (Bieniawski, 1989)

3.5.3 Rock Slope Rating

Metodika Rock slope rating byla vyvinuta speciálně pro specifickou geologickou stavbu České republiky v rámci projektu Nemeton 2013 (Štábl a kol., 2013). Slouží k vyhodnocení stability svahu a rizika ohrožení lidského zdraví a majetku.

RSR-PR

Přímé hodnocení stavu skalního svahu, zařazuje svah do jednoho z pěti konečných stavů (viz tabulka 3.4) pomocí bodové klasifikace RSR-PR (point rating). Je určeno k rychlému ohodnocení svahu. (Štábl a kol., 2013). Dané stavy jsou:

- *Stabilní stav* – nejbezpečnější, aktivace svahových pohybů přirozenými procesy je prakticky vyloučená
- *Stav bdělosti* – málo nebezpečný stav, masiv je postižený lehkým zvětráním, může se vyskytovat drobný opad, pravděpodobnost výrazných svahových pohybů je malá
- *Stav podmíněčně labilní* – středně nebezpečný stav, masiv je postižen středním až silným zvětráním, skalní řízení může být iniciováno v důsledku mimořádných událostí
- *Kriticky labilní stav* – velmi nebezpečný stav, masiv je silně narušen zvětrávacími procesy, frekventovaný opad malých úlomků, výskyt labilních bloků, vysoká pravděpodobnost skalního řízení v důsledku vnějších vlivů
- *Havarijní stav* – akutně nebezpečný, vysoká pravděpodobnost iniciace skalního řízení v důsledku i nepatrných vnějších vlivů

Základem bodové klasifikace rychlého vyhodnocení RSR-PR je jedenáct geotechnických kritérií v celkem 52 variantách. Každé z těchto kritérií je rozděleno do tří až šesti variant nabývajících bodového ohodnocení 1, 2, 3, 5, 7 a 9 bodů. Ohodnocení 1 značí nejpříznivější stav a 9 naopak stav nejnepříznivější. Pro vyhodnocení stavu skalního svahu lze použít součtový model za pomoci faktoriální tabulky (viz obr. 3.3) a nebo v systému Nemeton 2013 pomocí výpočetní techniky model numerický. Na rozdíl od ostatních klasifikací je u RSR-PR nízká stabilita svahu ohodnocena vysokým počtem bodů.

RSR-PR (point rating)	RSR (hodnocení stavu stability)
13–28	Stabilní stav
29–42	Stav bdělosti
43–58	Stav podmíněčně labilní
59–69	Kriticky labilní stav
70–85	Havarijní stav

Tabulka 3.4: Hodnocení stavu skalního svahu podle RSR-PR, (Štábl a kol., 2013)

Jako geotechnická kritéria byly vybrány charakteristiky svahu a vnější činitelé, kteří mají nejzásadnější vliv na stabilitu svahu výsledné riziko (Štábl a kol., 2013).

- i. *Hlavní-generelní sklon svahu*
- ii. *Výška skalního svahu*
- iii. *Geomorfologická stavba*
- iv. *Základní popis stavu masivu*
- v. *Průměrná vzdálenost ploch odlučnosti masivu*
- vi. *Sklon ploch odlučnosti*
- vii. *Vodní aktivita*
- viii. *Expozice skalního svahu*
- ix. *Rozrušující vliv vegetace*
- x. *Četnost opadávání*
- xi. *Vzdálenost paty svahu od ohroženého prostoru*

3.5.4 Q-system a Q-slope

Kvantitativní metoda Q-system pro hodnocení kvality masivu (Q) byla vyvinuta v Norském geotechnickém institutu autory Bartonem, Lienem a Lundem (1974) na základě více než 200 projektů podzemních staveb v podmínkách žulových masivů. Metoda je dodnes často používána a na základě nových zkušeností upravována (Singh a Goel, 2011). V roce 2015 představil Barton a kol. (2015) modifikaci Q-systému pro návrh a posouzení stability skalního svahu nazvanou Q-slope.

METODIKA PRO HODNOCENÍ STAVU SKALNÍCH SVAHŮ													
FAKTORIÁLNÍ TABULKA PRO HODNOCENÍ IN-SITU													
Bodová klasifikace	Hlavní - generální sklon svahu	Výška skalního svahu	Geomorfologická stavba	Základní popis stavu masivu	Průměrná vzdálenost ploch odlučnosti masivu	Sklon ploch odlučnosti v povaze od vodorovné roviny	Vodní aktivita	Expozice svahu	Rozrušující vlivy vegetace	Četnost opadávání opadu	Vzdálenost paty svahu od ohroženého prostoru	RSR-PR (point rating)	RSR (hodnocení stavu)
1	méně jak 35°	méně jak 3 m	spodní partie svahu je tvořena zemním svahem, za horní hranou skalního svahu přechází část v zemní svah	skalní svah je makroskopicky celistvý, puklinový systém je uzavřený	více jak 800 mm	skalní svah bez výrazného systému ploch odlučnosti	bez přítomnosti vody	expozice s mírným střídaním směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	bez vegetace či s ojedinělými křovinami	bez zamenaného opadu	více jak 20 m	≤ 28	stabilní stav
2	35° - 50°	3 - 8 m	skalní svah je tvořený makroskopicky celistvým s lokálními výstřelky poruchových partií	skalní svah je celistvý s maloplošným výskytům málo výrazných poruchových partií	250 - 800 mm	systém odlučnosti je uklopen -15° až -15°	lokálně, při odlehle, v silně svislé části, v puklinách bez projevu na povrchu	expozice s častým střídáním směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	vegetace porostlé v lokálním rozsahu, či část plochy skalního masivu		20 - 15 m		
3	50° - 75°	8 - 15 m	skalní stěna tvoří jediný morfologický celek od paty po horní hranu, za horní hranou svahu může mírně přecházet v zemní svah	skalní masiv je celistvý jen v lokálním rozsahu, makroskopicky zastoupeni výrazných poruchových partií	75 - 250 mm	systém odlučnosti je uklopen -15° až -75° - 40°	silně erozi působení vody, lokální slabé výrony z puklin, vodní aktivity vázané na srážky	expozice s častým střídáním směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	porostlé křovinami a drobnými náletem	ojedinělý opad - dokumentováno 1 x za 25 let	7,5 - 15 m	29 - 42	stav bdělosti
5	75° - 85°	15 - 25 m	skalní svah je od paty sklonově členitý s přímým přechodem do puklinového až zemního svahu, horní hrana svahu není zřetelná	skalní masiv postaven plošně výraznými poruchami, jen lokální výskyt kompaktního materiálu, část masivu jsou viditelně odděleny od mateřské části	75 - 250 mm - se sekundárním výrazným systémem diskontinuit	skalní svah s viditelným výrazným všednějším systémem odlučnosti	lokální výrony vody z puklin, slabá erozi činnost, v zímě tvorba malých ledopádů	expozice odvrtného skalního svahu s částečným směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	huště porostlé náletem a křovinami	zřídavý opad - opadávání je dokumentováno 1 x za 5 let	3 - 7,5 m	43 - 58	stav podměnečného labilní
7	více jak 85° s převahou členitosti do 0,5 m	25 - 75 m	skalní svah je od paty sklonově členitý s přímým přechodem do puklinového až zemního svahu, horní hrana svahu není zřetelná	skalní masiv postaven plošně výraznými poruchami, jen lokální výskyt kompaktního materiálu, část masivu jsou viditelně odděleny od mateřské části	20 - 75 mm	systém odlučnosti je uklopen +75° až +90° až -75° až -90°	silně výrony vody z puklin, nahodilá silná erozi činnost či trvalá povrchová aktivita vody, v zímě tvorba výrazných ledopádů	expozice odvrtného skalního svahu s částečným směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	plně porostlé náletem s lokálním výskytům vzrostlých stromů	pravidelné - po zmlíním období a po výdatných srážkách	1,5 - 3 m	59 - 69	kritický labilní stav
9	více jak 85° s převahou členitosti nad 0,5 m	více jak 75 m	skalní svah je od paty sklonově členitý s přímým přechodem do puklinového až zemního svahu, horní hrana svahu není zřetelná	skalní masiv je silně až extrémně porušený na jednotlivé fragmenty a částí se charakteru části se charakteru částí	méně jak 20 mm	systém odlučnosti je uklopen +15° až +75° - ze svahu	silně výrony vody z puklin, nahodilá silná erozi činnost či trvalá povrchová aktivita vody, v zímě zamrzání skalní stěny masivním ledopády	expozice skalního svahu s částečným směrem, směrem k svahu, směrem ke korytu, vegetace či zastavba	silně porostlé porostlé vegetací, hlavně náletem a vzrostlými stromy	časté - neustálý opad	méně jak 1,5 m	70 S	havarijní stav

Ing. Stanislav Štábl, Ing. Ondřej Holý, Mgr. Pavel Tichý, Ing. Jiří Petera
NEMETON 2013

Obrázek 3.3: Faktoriální tabulka RSR-PR (Štábl a kol., 2013)

Metody jsou postaveny na třech základních charakteristikách masivu (velikosti bloků, střížná pevnost a vnější faktory), které jsou kvantifikovány dílčími parametry. Hodnota Q může být využita pro odvození různých mechanických vlastností masivu. Například soudržnost, úhel vnitřního tření, či deformačního modulu (Singh a Goel, 2011).

Q-system

Skalní masiv je zařazen do tříd na základě hodnoty Q pomocí tabulky 3.5. Výsledná hodnota Q vychází ze 6 parametrů skalního masivu, může nabývat široké škály hodnot (0,001 – 1000) a je dána rovnicí (Barton a kol., 1974):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (3.7)$$

Classification of Rock Mass Based on Q-Values		
Q	Group	Classification
0.001–0.01		Exceptionally poor
0.01–0.1	3	Extremely poor
0.1–1		Very poor
1–4	2	Poor
4–10		Fair
10–40		Good
40–100	1	Very good
100–400		Extremely good
400–1000		Exceptionally good

Tabulka 3.5: Zatřídění masivu podle hodnoty Q , převzato z Singh a Goel (2011)

RQD – Hodnota rock quality designation vychází z rovnic (3.1, 3.4, nebo 3.5). Minimální dosažená hodnota by i při $RQD < 10$ měla být 10 (Singh a Goel, 2011).

Parametr J_n – Parametr vyjadřuje počet puklinových systémů. Za puklinový systém se v metodice považují pouze výrazně vyvinuté pukliny s paralelní orientací. Pokud se v masivu vyskytuje malé množství puklin, je vhodnější tyto diskontinuity vyhodnotit jako náhodné pukliny (random joints). Tabulková hodnota (3.6) je zhruba druhou mocninou počtu puklinových systémů. Nabývá základních hodnot 0,5 – 20. (Barton a kol., 1974).

Parametry J_r a J_a – Drsnost puklin J_r a alterace puklin J_a určují pevnost masivu ve střížném napětí, a proto by měly být jejich hodnoty určovány z nejslabšího kriticky orientovaného puklinového systému, nebo z jílem vyplněné poruchy. V případě, že je orientace tohoto systému nebo poruchy příznivá stabilitě svahu,

Joint Set Number (J_n)		
	Condition	J_n
A	Massive, no or few joints	0.5–1.0
B	One joint set	2
C	One joint set plus random	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cube," etc.	15
J	Crushed rock, earth-like	20

For intersections use $(3.0 \cdot J_n)$. For portals use $(2.0 \cdot J_n)$.

Tabulka 3.6: Hodnoty parametru J_n , převzato z Singh a Goel (2011)

Joint Roughness Number (J_r)		
	Condition	J_r
<i>(a) Rock wall contact and</i>		
<i>(b) Rock wall contact before 10 cm shear</i>		
A	Discontinuous joint	4.0
B	Rough or irregular, undulating	3.0
C	Smooth, undulating	2.0
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1.0
G	Slickensided, planar	0.5
<i>(c) No rock wall contact when sheared</i>		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0
J	Sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	

Descriptions refer to small-scale features and intermediate-scale features, in that order. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3m. $J_r - 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineation, provided the lineations are favorably oriented. J_r and J_n classification is applied to the joint set or discontinuity that is least favorable for stability both from the point of view of orientation and shear resistance, τ .

Tabulka 3.7: Hodnoty parametru J_r , převzato z Singh a Goel (2011)

měla by být pro vyhodnocení využita diskontinuita s druhou nejnižší hodnotou J_r/J_a a nepříznivou orientací. J_a nabývá základních hodnot 0,5 až 4. Tyto hodnoty mohou být dále upraveny na základě ostatních parametrů masivu (viz tabulky 3.7 a 3.8) (Singh a Goel, 2011).

Joint Alteration Number (J_a)			
	Condition	ϕ , approx.	J_a (degree)
(a) Rock wall contact (no mineral filling, only coating)			
A	Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote		0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only	25–35	1.0
C	Slightly altered joint walls; non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25–30	2.0
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening)	20–25	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite and mica; also chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays (discontinuous coatings, 1–2 mm or less in thickness)	8–16	4.0
(b) Rock wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)			
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25–30	4.0
G	Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)	16–24	6.0
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, <5 mm in thickness)	12–16	8.0
J	Swelling clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, <5 mm in thickness); value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles, and access to water, etc.	6–12	8–12
(c) No rock wall contact when sheared (thick mineral fillings)			
K, L, M	Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H, J for description of clay condition)	6–24	6, 8, or 8–12
N	Zones or bands of silty or sandy clay, small clay fraction (non-softening)	—	5.0
O, P, R	Thick, continuous zones or bands of clay (see G, H, J for description of clay condition)	6–24	10, 13, or 13–20

Tabulka 3.8: Hodnoty parametru J_a , převzato z Singh a Goel (2011)

Parametr J_w – Snižující faktor puklinové vody. Hodnotí nepříznivý vliv tlaku vody, který vede ke snižování normálového efektivního napětí a vyplachování výplně pukliny. Nabývá základních hodnot 0,1 – 1 (viz tabulka 3.9) (Singh a Goel, 2011)

Joint Water Reduction Factor (J_w)			
	Condition	Approx. water pressure (MPa)	J_w
A	Dry excavation or minor inflow, i.e., 5 lt./min locally	<0.1	1
B	Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.1–0.25	0.66
C	Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.25–1.0	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	0.25–1.0	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time	>1.0	0.2–0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	>1.0	0.1–0.05

Factors C to F are crude estimates. Modify J_w if drainage measures are installed. Special problems caused by ice formation are not considered. For general characterization of rock masses distant from excavation influences, the use of $J_w = 1.0, 0.66, 0.5, 0.33$, etc., as depth increases from, say, 0–5, 5–25, 25–250 to >250 m is recommended, assuming that RQD/J_n is low enough (e.g., 0.5–25) for good hydraulic conductivity. This will help to adjust Q for some of the effective stress and water softening effects in combination with appropriate characterization values of SRF. Correlations with depth-dependent static modulus of deformation and seismic velocity will then follow the practice used when these were developed.

Tabulka 3.9: Hodnoty parametru J_w , převzato z Singh a Goel (2011)

Parametr SRF (stress reduction factor) – Nabývá hodnot podle tabulky 3.10 Popisuje reakci masivu na změnu napjatostních podmínek v důsledku exkavace. Získání správných hodnot tohoto parametru je velmi obtížné. Z tohoto důvodu je v modifikaci Q-systému Rock mass number (RMN) SRF rovno 1 (Singh a Goel, 2011).

Q-slope

Q-slope je modifikací Q-systému určenou pro návrh skalních svahů a zářezů. Byla vyvinuta na základě mnoha případových studiích na různých horninových typech a představena N. Bartonem a N. Barem (2015). Metoda byla vyvinuta na základě případových studií v Asii, Austrálii, Střední Americe a Evropě na magmatických, metamorfovaných i sedimentárních horninách (Bar a Barton, 2017). Klade větší důraz na střížnou pevnost, kritické orientace puklinových systémů a vnější faktory ovlivňující stabilitu svahu.

Rovnice pro výpočet hodnoty Q_{slope} je velmi podobná rovnici Q-systému (3.7).

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (3.8)$$

Parametry RQD , J_n , J_r a J_a – Hodnoty parametrů jsou nezměněné (viz 3.11). Hodnotu výrazu pro střížnou pevnost $\left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0$ však lze upravit na základě „O-faktoru“ – vlivu orientace dvou hlavních puklinových systémů označených A , B

Stress Reduction Factor				
Conditions	SRF			
<i>(a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated</i>				
A Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	10.0			
B Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation ≤ 50 m)	5.0			
C Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)	2.5			
D Multiple-shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)	7.5			
E Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation ≤ 50 m)	5.0			
F Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation > 50 m)	2.5			
G Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube," etc. (any depth)	5.0			
<i>(b) Competent rock, rock stress problems</i>				
	q_c/σ_1	σ_θ/q_c	SRF (old)	SRF (new)
H Low stress, near surface, open joints	>200	<0.01	2.5	2.5
J Medium stress, favorable stress condition	200–10	0.01–0.3	1.0	1.0
K High stress, very tight structure; usually favorable to stability, may be unfavorable to wall stability	10–5	0.3–0.4	0.5–2.0	0.5–2.0
L Moderate slabbing after >1 hour in massive rock	5–3	0.5–0.65	5–9	5–50
M Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	3–2	0.65–1.0	9–15	50–200
N Heavy rock burst (strain-burst) and immediate dynamic deformations in massive rock	<2	>1	15–20	200–400
<i>(c) Squeezing rock; plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressures</i>				
O Mild squeezing rock pressure			1–5	5–10
P Heavy squeezing rock pressure			>5	10–20
<i>(d) Swelling rock; chemical swelling activity depending on presence of water</i>				
Q Mild swelling rock pressure			5–10	
R Heavy swelling rock pressure			10–15	

Reduce these SRF values by 25–50% if the relevant shear zones only influence but do not intersect the excavation. This will also be relevant for characterization.

For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduce q_c to $0.75 q_c$; when $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduce q_c to $0.50 q_c$ (where q_c is unconfined compressive strength), σ_1 and σ_3 are major and minor principal stresses, and σ_θ is the maximum tangential stress (estimated from elastic theory).

Few case records available where depth of crown below surface is less than span width; suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see H).

Cases L, M, and N are usually most relevant for support design of deep tunnel excavation in hard massive rock masses, with RQD/ J_n ratios from about 50–200.

For general characterization of rock masses distant from excavation influences, the use of SRF = 5, 2.5, 1.0, and 0.5 is recommended as depth increases from, say, 0–5, 5–25, 25–250, >250 m. This will help to adjust Q for some of the effective stress effects, in combination with appropriate characterization values of J_w .

Correlations with depth-dependent static modulus of deformation and seismic velocity will then follow the practice used when these were developed.

Cases of squeezing rock may occur for depth $H > 350Q^{1/3}$ (Singh & Goel, 2006). Rock mass compressive strength can be estimated from $q_{c, \text{mass}} \approx 7\gamma(Q)^{1/3}$ (MPa); γ is the rock density in t/m^3 , and $q_{c, \text{mass}}$ = rock mass compressive strength.

Tabulka 3.10: Hodnoty parametru SRF , převzato z Singh a Goel (2011)

a případného „klínového faktoru“ podle tabulky 3.12 (Barton a kol., 2015).

Parametr J_{wice} (Enviromentální a geologické podmínky) – Nahrazuje parametr J_w . Zahrnuje širší spektrum přírodních podmínek, které mají oproti podzemním stavbám, větší vliv na dlouhodobou stabilitu svahu (Barton a kol., 2015).

Parametr SRF_{slope} (Strength Reduction Factor) – Faktor oslabení pevnosti doplňuje do vzorce nejnejpříznivější charakteristiku masivu z jedné ze tří kategorií SRF_a , SRF_b a SRF_c popsanych v tabulce 3.12 (tzn. do vzorce doplníme kategorii s největší dosaženou hodnotou). S rostoucí výškou svahu roste význam kategorie napětí a pevnosti SRF_b . Naopak u nižších svahů závisí stabilita převážně na hlavních diskontinuitách (SRF_c) (Bar a Barton, 2017).

Pro určení sklonu β nevyztuženého svahu menšího 30 m při jeho návrhu z hodnoty Q_{slope} , vytvořili Barton a Bar Barton a kol. (2015) vzorec

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (3.9)$$

Omezení

Q-system je velmi oblíbená a používaná metoda a v průběhu více než čtyřiceti let své existence byla mnohokrát modifikována. Velmi jemná škála výsledných hodnot může dávat zdání velké přesnosti, proto je třeba brát v úvahu její omezení. Ta jsou částečně dána už vstupními parametry. Samotné výše probrané nepřesnosti v naměřeném RQD můžou přinést velké výkyvy v hodnotě Q.

Významná chyba se může vyskytnout i při mapování puklinových systémů. Silně rozpukaný masiv může obsahovat jen malé množství systémů, zatímco pukliny systému s velkou roztečí mohou být nezkušeným pozorovatelem označeny jako více puklinových systémů (Palmstrom a Broch, 2006).

Parametr SRF je v Q-systému všeobecně problémový, a proto ho někteří autoři (Kaiser a kol., 1986) doporučují zanedbat a nahradit hodnotou 1 (Singh a Goel, 2011).

Palmstrom a Broch (2006) dále uvádějí, že Q-systém ignoruje některé důležité vlastnosti masivu, jako je průběžnost, velikost a otevřenost puklin. Neobsahuje ani pevnost horniny, a proto není vhodný pro použití na měkkých horninách (Palmstrom a Broch, 2006).

Q-systém není pro posuzování stability svahu příliš vhodný, protože jako „nástroj“ pro podzemní práce neklade dostatečný důraz na střížnou pevnost (například orientaci puklinových systémů) a geometrii svahu. Q-slope tyto chyby částečně napravuje.

3.5.5 Rock mass rating a Slope mass rating

Rock mass rating

Kvantitativní klasifikační systém Rock mass rating (RMR nebo geomechanická klasifikace) byl vytvořen Bieniawskim (1973) na základě jeho zkušeností

1. Rock Quality Designation		RQD (%)
A	Very poor	0-25
B	Poor	25-50
C	Fair	50-75
D	Good	75-90
E	Excellent	90-100

i) Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including zero), a nominal value of 10 is used to evaluate Q_{slope} .
ii) RQD intervals of 5, i.e., 100, 95, 90, etc., are sufficiently accurate.

2. Joint set number		J_n
A	Massive, no or few joints	0.5-1
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed	15
J	Crushed rock, earthlike	20

3. Joint roughness number		J_r
a) Rock wall contact, b) contact after shearing		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1.0
G	Slickensided, planar	0.5
c) No rock-wall contact when sheared		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact.	1.0
J	Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact	1.0

i) Descriptions refer to small-scale features and intermediate scale features, in that order.
ii) Add 1.0 if mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.
iii) $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joint having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength.
iv) J_r and J_a classification is applied to the joint set or discontinuity that is least favourable for stability both from the point of view of orientation and shear resistance τ (where $\tau \approx \sigma_n \tan^{-1} (J_r/J_a)$).

4. Joint alteration number		J_a
a) Rock-wall contact (no clay fillings, only coatings)		
A	Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote.	0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only.	1.0
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0
D	Silty- or sandy-clay coatings, small clay fraction (non-softening).	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays.	4.0
b) Rock-wall contact after some shearing (thin clay fillings, probable thickness $\approx 1-5\text{mm}$)		
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	4.0
G	Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings.	6.0
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings.	8.0
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite. Value of J_a depends on per cent of swelling clay-size particles, and access to water.	8-12
c) No rock-wall contact when sheared (thick clay/crushed rock fillings)		
M	Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H, J for description of clay condition).	6, 8, or 8-12
N	Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction (non-softening).	5.0
OPR	Thick, continuous zones or bands of clay (see G, H, J for description of clay condition).	10, 13, or 13-20

Tabulka 3.11: Hodnoty parametrů pro stanovení Q_{slope} , převzato z Barton a kol. (2015)

5. Discontinuity Orientation Factor – O-factor					
Set A	Set B	Description	<i>Note: Orientation adjustment for joints in rock slopes. Apply Set A orientation-factor to most unfavourable joint set. If required, apply Set B orientation-factor to secondary joint set in case of potentially unstable wedge formation.</i>		
2.0	1.5	Very favourably oriented			
1.0	1.0	Quite favourable			
0.75	0.9	Unfavourable			
0.50	0.8	Very unfavourable			
0.25	0.7	Causing failure if unsupported			
<i>Example of 0-factor application: Set A is dominant and least favourable: $J_r = 1.5$, $J_a = 2$; Set B is less dominant: $J_r = 2$, $J_a = 1$. Wedges assumed formed by these two sets due to dip: A) $J_r/J_a = 1.5/2$; 0-factor = 0.5 (very unfavourable). B) $J_r/J_a = 2/1$; 0-factor = 0.9 (unfavourable). Total wedge assumption: $(J_r/J_a)_0$ in Q-slope = $(1.5/2) \times 0.5 \times (2/1) \times 0.9 = 0.68$ ($\phi = 34^\circ - 35^\circ$)</i>					
6. Environmental & Geological Condition Number – J_{wice}					
J_{wice}	Desert Environment	Wet Environment	Tropical Storms	Ice Wedging	
Stable structure, competent rock	1.0	0.7	0.5	0.9	
Stable structure, incompetent rock	0.7	0.6	0.3	0.5	
Unstable structure, competent rock	0.8	0.6	0.1	0.3	
Unstable structure, incompetent rock	0.5	0.3	0.05	0.2	
<i>Note: When drainage measures are installed apply $J_{wice} \times 1.5$ When slope reinforcement measures are installed apply $J_{wice} \times 1.3$ When drainage and reinforcement is installed apply both factors: $J_{wice} \times 1.5 \times 1.3$</i>					
7. Strength Reduction Factor – SRF_{slope} (use maximum of SRF_a , SRF_b & SRF_c)					
<i>SRF_a - Physical Condition</i>					
A	2.5	Slight loosening due to surface location			
B	5	Loose blocks, signs of tension cracks & joint shearing, susceptibility to weathering			
C	10	As B but strong susceptibility to weathering effects			
D	15	Slope is in advanced stage of erosion and loosening due to periodic water erosion and/or ice-wedging effects			
E	20	Residual slope with significant transport of material down-slope			
<i>SRF_b - Stress</i>					
F	2.5-1	Moderate stress-strength range (σ_c/σ_1 : 50-200)			
G	5-2.5	High stress-strength range (σ_c/σ_1 : 10-50)			
H	10-5	Localised intact rock failure (σ_c/σ_1 : 5-10)			
J	15-10	Crushing or plastic yield (σ_c/σ_1 : 2.5-5)			
K	20-15	Plastic flow of strain softened material (σ_c/σ_1 : 1-2.5)			
<i>SRF_c - Major Discontinuity</i>		<i>Discontinuity Orientation</i>			
		<i>Favourable</i>	<i>Unfavourable</i>	<i>Very Unfavourable</i>	<i>Causing Failure if Unsupported</i>
L	Major disc. with little or no clay	1	2	4	8
M	Major discontinuity with RQD ₁₀₀ due to clay and crushed rock	2	4	8	16
N	Major discontinuity with RQD ₃₀₀ due to clay and crushed rock	4	8	12	24
<i>Note: RQD₁₀₀ = 1 metre perpendicular sample of discontinuity RQD₃₀₀ = 3 metre perpendicular sample of discontinuity</i>					

Tabulka 3.12: Hodnoty parametrů pro stanovení Q_{slope} , převzato z Barton a kol. (2015)

z ražby tunelů v sedimentech v Jižní Africe. Jedná se o často používanou nestálou se vyvíjející metodu s mnoha modifikacemi.

Skalní masiv je klasifikován na základě výsledné hodnoty RMR vycházející z šesti parametrů ohodnocených dle tabulek. RMR nabývá hodnot 0 – 100 a je algebraickým součtem hodnot těchto parametrů. Součet prvních pěti parametrů bez orientace diskontinuit se nazývá RMR_{basic} . Jednotlivým parametrům by měly být přidělovány spíše rozsahy hodnot než jednotlivé hodnoty (Singh a Goel, 2011).

Pevnost v prostém tlaku UCS – Zatržďení je možné podle UCS (viz podkapitola 2.1), nebo přímo z odrazového čísla Schmidtova kladiva H_r podle tabulky 3.13.

Application of H_r in RMR								
UCS (MPa)	>250	100–250	50–100	25–50	5–25	1–5	<1	
Rating	15	12	7	4	2	1	0	
Range of Schmidt hammer rebound values								
	>71.5	55.2–71.5	42.8–55.2	30.5–42.8	1.8–30.5	<1.8	–	

Tabulka 3.13: Hodnoty parametru UCS klasifikace RMR podle odrazového čísla H_r , převzato z Wang a kol. (2017)

RQD – Hodnoty jsou závislé na rock quality designation (viz podkapitola 3.5.1) podle tabulky 3.14.

Vzdálenost diskontinuit – Za diskontinuity jsou považovány pukliny, vrstevnatost foliace, střížné zóny a jiné povrchové poruchy. Kriticky orientovanému nebo nejhůře hodnocenému systému diskontinuit by měla být přidělena hodnota podle tabulky 3.14 (Singh a Goel, 2011).

Stav diskontinuit – Hodnotí hrubost, otevřenost, průběžnost, zvětrávání a výplň diskontinuit. Některé vlastnosti v pomocné tabulce 3.16 se navzájem mohou vylučovat. Například pokud je otevřená puklina vyplněna, hrubost její stěny není významná, protože smyk po této ploše je řízen vlastnostmi materiálu výplně (Singh a Goel, 2011).

Vliv podzemní vody – Pro klasifikaci skalního svahu by hodnoty měly být odvozeny z obecného popisu (General description).

Orientace diskontinuit – Zahrnuje směr a sklon systémů diskontinuit a jejich vliv na stabilitu masivu. Hodnotu RMR_{basic} upravuje podle tabulky 3.15.

Z hodnot RMR se dají odvodit mechanické vlastnosti masivu jako soudržnost, úhel vnitřního tření, nebo únosný tlak (viz tabulka 3.17).

Parameter		Range of Values							
1	Strength of intact rock material	Point load strength index (MPa)	>10	4–10	2–4	1–2	for this low range uniaxial compressive strength is preferred		
		Uniaxial Compressive Strength (MPa)	>250	100–250	50–100	25–50	5–25	1–5	<1
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill Core Quality RQD (%)		90–100	75–90	50–75	25–50	<25		
		Rating	20	17	13	8	3		
3	Joint Spacing (m)		>2	0.6–2	0.2–0.6	0.06–0.2	<0.06		
		Rating	20	15	10	8	5		
4	Condition of Joints		Not continuous, very rough surfaces, unweathered, no separation	Slightly weathered surfaces, slightly weathered, separation < 1 mm	Slightly rough surfaces, highly weathered, separation < 1 mm	Continuous, slickensided surfaces, or gouge < 5mm thick, or separation 1–5 mm	Continuous joints, soft gouge > 5mm thick, or separation > 5 mm		
		Rating	30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/min)	none	<10	10–25	25–125	>125		
		Joint water pressure / major in situ stress	0	0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.5	>0.5		
		General conditions	dry	damp	wet	dripping	flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		

Tabulka 3.14: Hodnoty parametrů RMR_{basic} a jejich popisy, převzato z Bieniawski (1989)

Rating adjustment for joint orientations						
Strike and dip orientation of joints		Very favorable	favorable	fair	unfavorable	Very unfavorable
Ratings	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

Tabulka 3.15: Hodnoty RMR pro orientaci puklinového systému, převzato z Bieniawski (1989)

Parameter	Ratings				
	<1 m	1–3 m	3–10 m	10–20 m	>20 m
Discontinuity length (persistence)	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	<0.1 mm	0.1–1.0 mm	1–5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	Hard filling			Soft filling	
	None	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
	6	5	3	1	0

Tabulka 3.16: Pomůcka pro hodnocení diskontinuit v systému *RMR*, převzato z Bieniawski (1989)

Rock mass classes determined from total ratings					
Rating	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Class no.	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

Meaning of rock mass classes					
Class no.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	>400	300–400	200–300	100–200	<100
Friction angle of rock mass (degrees)	>45	35–45	25–35	15–25	<15

$RMR = \Sigma$ (classification parameters) + discontinuity orientation adjustment

Tabulka 3.17: Třídy *RMR* a jejich mechanické vlastnosti, převzato z Bieniawski (1989)

Autoři Singh a Goel (2011) upozorňují, že RMR není spolehlivý při nízkých hodnotách, a proto v porušených zónách doporučují spíše Q-systém. Pro použití na skalních svazích je pochopitelně doporučena modifikace Slope Mass Rating (Singh a Goel, 2011). M. Romana (2015) označuje RMR pro posouzení svahu jako takřka nepoužitelnou metodu.

Slope mass rating

Nedostatky RMR při použití na skalních svazích vedly autora M. Romana (1985) k vývoji systému Slope mass rating (SMR). Hodnota SMR vychází z RMR_{basic} (viz kapitola 3.5.5), upraveného faktory geometrického vztahu puklin a sklonu svahu F_1, F_2, F_3 a faktorem exkavace F_4 (Singh a Goel, 2011). Tato metoda zohledňuje i různé mechanismy porušení: planární porušení, klínové porušení a blokové překlápění. Výsledná hodnota je dána vztahem:

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (3.10)$$

Faktor F_1 – Závisí na vztahu směrů stěny a puklinového systému. Nabývá hodnot 0,15 – 1,0. Původně byly hodnoty zavedeny empiricky a následně bylo zjištěno, že přibližně odpovídají vztahu

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \quad (3.11)$$

kde A je $(\alpha_s - \alpha_j)$ tj. rozdíl směru stěny svahu (α_s) a směru puklin (α_j) (Singh a Goel, 2011).

Faktor F_2 – Reprezentuje sklon puklin β_j a závisí i na mechanismu pohybu. Při planárním porušení nabývá, stejně jako F_1 , hodnot 0,15 – 1,0. Při překlápění je jeho hodnota rovna 1 (Singh a Goel, 2011)

$$F_2 = \tan \beta_j \quad (3.12)$$

Faktor F_3 – Závisí na vztahu sklonů svahu β_s a puklin β_j a mechanismu pohybu. Například pro překlápění je jeho hodnota dána vztahem $\beta_j - \beta_s$.

Faktor F_4 – Hodnota závisí na metodě exkavace, nebo je daná pro přirozený stav svahu, který bývá díky vegetaci a jiným přírodním jevům stabilnější (Singh a Goel, 2011).

Hodnoty všech tří faktorů mohou být určeny z tabulky 3.18. Podle výsledné hodnoty SMR je svah zařazen do jedné z pěti stabilitních tříd. Hodnota také může sloužit jako pomůcka při návrhu sanačních opatření (Singh a Goel, 2011).

Kontinuální funkce SMR

Kontinuální funkce 3.11 a 3.12 nejsou příliš přesné. Přesnější funkce pro faktory F_1, F_2 a F_3 , navrhli Tomáš a kol. (2007). Jsou jednou z několika modifikací SMR. Oproti diskretním funkcím M. Romany (1985) snižují nepřesnost a

TYPE OF FAILURE		VERY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	UNFAVORABLE	VERY UNFAVORABLE	
P	A	$ \alpha_i - \alpha_s $	$>30^\circ$	30-20°	20-10°	10-5°	
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W	F₁		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j \text{ ó } \beta_i $	$<20^\circ$	20-30°	30-35°	35-45°	$>45^\circ$
P/W		F₂		0.15	0.40	0.70	0.85
T	1.00						
P	C	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	10-0°	0°	0-(-10°)	$<(-10^\circ)$
W		$\beta_i - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$					
P/T/W	F₃		0	-6	-25	-50	-60
EXCAVATION METHOD (F₄)							
Natural slope			+15	Blasting or mechanical		0	
Presplitting			+10	Deficient blasting		-8	
Smooth blasting			+8				
P: planar failure; T: toppling failure; W: wedge failure.							

Tabulka 3.18: Faktory SMR, převzato z Tomás a kol. (2007)

subjektivnost hodnocení v okolí hranic jednotlivých tříd faktoru (Romana a kol., 2015). Rovnice funkcí jsou:

$$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} \arctg \left(\frac{1}{10} (|A| - 17) \right) \quad (3.13)$$

$$F_2 = \frac{9}{16} + \frac{1}{195} \arctg \left(\frac{17}{100} \beta - 5 \right) \quad (3.14)$$

Kde A a β jsou shodné s parametry z rovnice 3.11 a 3.12 vyjádřené v stupních.

Faktor F_3 může být vypočítán pomocí jedné ze dvou nabízených rovnic funkcí:

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \arctg C \quad (3.15)$$

$$F_3 = -13 - \frac{1}{7} \arctg (C - 120) \quad (3.16)$$

kde C je rovno vztahu β_s a β_j podle tabulky 3.18.

Výběr funkce závisí na mechanismu poruchy. Rovnice 3.15 je používána pro klínové (v tabulce 3.18 W) a planární porušení (P). Pro blokové překlápění (T) je určena rovnice 3.16 (Tomás a kol., 2007).

Omezení

SMR je dlouhodobě a celosvětově užívaný klasifikační systém. I přesto bývají systému vytýkána různá omezení.

Romana a kol. (2003) upozorňují na to, že Slope mass rating nebere v úvahu výšku svahu, která má na stabilitu zásadní vliv a geomechanická část klasifikace je lehce zastaralá. Systém navíc posuzuje pouze strukturně řízené mechanismy poruch a nebere v potaz jiné spouštěcí mechanismy jako vodu nebo zemětřesení (Basahel a Mitri, 2017).

Také není citlivý na některá geometrická uspořádání puklinového systému a stěny svahu, kdy se SMR přibližně rovná $RMR + F_4$ (Basahel a Mitri, 2017). Konkrétně se jedná se o tyto případy:

- planární poruchy s $\beta_s < \beta_j$, hodnotou $A > 30^\circ$ nebo $\beta_j < 20^\circ$
- blokové překlápění s $A > 30^\circ$ nebo s $(\beta_s + \beta_j) \leq 120^\circ$

3.5.6 Geological Strength Index

Klasifikaci GSI představili Hoek a kol (1995) jako vstupní parametr do obecného Hoek-Brownova kritéria, hodnotící snížení pevnosti geologickými podmínkami skalního masivu. Lze jej však použít i pro výpočet jiných mechanických parametrů. Popis je založen na dvou základních faktorech majících zásadní vliv na mechanické vlastnosti masivu: struktuře masivu a stavu povrchu diskontinuit (Hoek a Brown, 2019).

Systém umožňuje rychlé ohodnocení masivu na základě vizuální prohlídky. Zatřídění probíhá pomocí schématu 3.4. Strukturální třídy jsou velmi podobné Terzaghiho klasifikaci z roku 1946 (Singh a Goel, 2011).

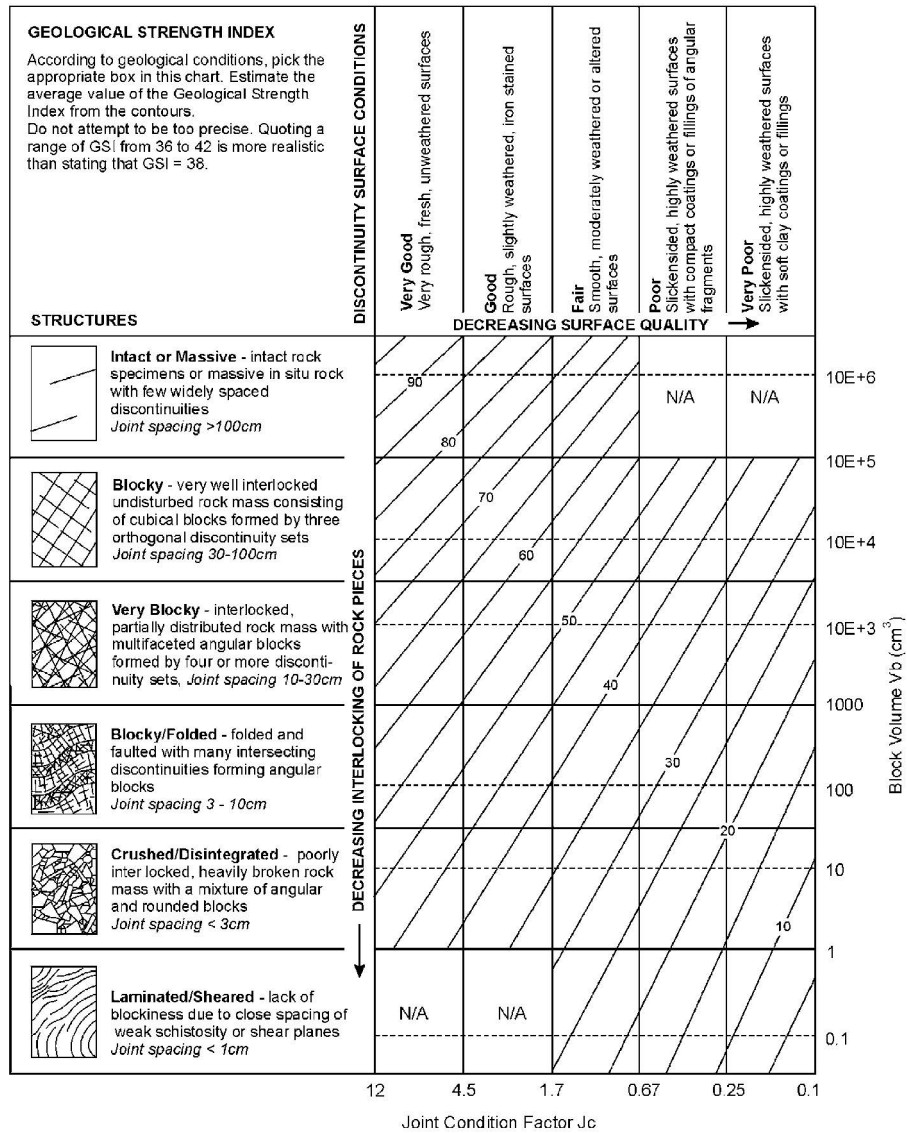
- Neporušená nebo masivní
- Blokovaná
- Velmi blokovaná
- Blokovaná – zvrásněná
- Podrcená/rozdrcená
- laminovaná/vrstevnatá/střižná

Třídy stavu povrchu diskontinuit jsou podobné stavu puklin v systému RMR.

- Velmi dobrý
- Dobrý
- Přijatelný
- Špatný
- Velmi špatný

Schéma 3.4 lze použít na heterogenní masivy, jako jsou například horniny flyše. Autor metody Hoek (1998) doporučuje výsledný GSI uvádět jako rozsah hodnot, namísto jejich průměru (Singh a Goel, 2011).

V kvantifikované modifikaci GSI jsou strukturální třídy reprezentovány objemem bloků V_b a třídy diskontinuit faktorem stavu puklin J_c . Hodnota J_c závisí na parametrech pukliny (Cai a kol., 2004).



Obrázek 3.4: Schéma pro stanovení hodnoty GSI na základě vizuální prohlídky masivu ve vztahu k blokovému objemu a stavu puklin, převzato z Singh a Goel (2011)

Omezení

GSI nezohledňuje anizotropii masivu. Hodnota by měla být stanovována z masivu nepoškozeného trhacími pracemi.

Pro vrstevnatý masiv s vysokou pevností materiálu a silnými vrstvami není vhodné schéma 3.4 použít, protože pevnost tohoto masivu je mnohem vyšší než by udávala hodnota GSI (Singh a Goel, 2011). Pokud je rozteč diskontinuit v porovnání s rozměry svahu velká, metoda by neměla být použita a pozornost by měla být věnována jednotlivým diskontinuitám (Hoek, 2007).

Hodnota indexu je často využívána v numerickém modelování, proto v metodě nejsou specifikovány napjatostní ani hydrogeologické podmínky, které bývají v těchto modelech zahrnuty (Singh a Goel, 2011).

Hoek-Brownovo kritérium porušení

Obecné Hoek-Brownovo kritérium porušení ve verzi z roku 2002 (Hoek a kol., 2002) je pro porušené skalní masivy definováno jako:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^n \quad (3.17)$$

kde:

σ'_1 a σ'_3 jsou maximální a minimální hlavní efektivní napětí při porušení.

σ_{ci} je pevnost neporušené horniny v prostém tlaku.

m_b je hodnota Hoek-Brownovy konstanty pro skalní masiv:

$$m_b = m_r \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3.18)$$

m_i je Hoek-Brownova materiálová konstanta pro neporušenou horninu, kterou lze získat z triaxiálních testů nebo pomocí empirických vztahů v tabulce 3.19. D je faktor disturbance

s a a jsou konstanty závislé na vlastnostech skalního masivu.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3.19)$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (3.20)$$

Faktor disturbance D závisí na stupni poškození masivu odstřelem a snížením napjatosti masivu. Nabývá hodnot 0–1. Pro neporušený masiv je hodnota $D = 0$.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic				Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated**		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3 Granodiorite (29 ± 3)	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.

** These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Tabulka 3.19: Empirické vztahy pro určení pevnosti v prostém tlaku různých horninových typů, převzato z Hoek (2007)

3.5.7 Kvalita textura struktura QTS

Klasifikační systém pro ražbu podzemních staveb v geologických podmínkách Prahy byl navržen O. Tesařem (1977a) pro ražbu pražského metra. Na základě využití systému v praxi byl systém upraven, tak aby vyhovoval i mimopražským podmínkám. Byly zavedeny redukční parametry, snižující hodnotu TS (textura struktura) při nepříznivých hydrogeologických podmínkách a orientacích diskontinuit (Tesař, 1984).

Skalní masiv je zařazen podle součtu bodového ohodnocení tří základních parametrů TS_A , TS_B , TS_C , vycházejících z rozhodujících texturních a strukturních vlastností horniny. V určitých případech je nutné hodnotu snížit o redukce α , β , γ a δ . Hodnotu základních parametrů lze určit z tabulek nebo vypočítat přímo ze změřených dat.

Parametr TS_A – Závisí na pevnosti v prostém tlaku úlomků horniny σ_d , kterou lze získat z laboratorních zkoušek, nebo in-situ pomocí Schmidtova kladiva.

$$TS_A = 10 \log(\sigma_d) - 3 \quad (3.21)$$

Parametr TS_B – Závisí na průměrné vzdálenosti d ploch diskontinuit (bez ohledu na jejich systémy). Výpočet by měl vycházet z měření počtu diskontinuit na danou vzdálenost, minimálně ve dvou na sebe kolmých směrech. Případně lze vycházet i z průměrné velikost úlojku vrtného jádra.

$$TS_B = 26,2\log(d) + 52,4 \quad (3.22)$$

Při $d > 4,0$ m nabývá hodnota maximálního počtu bodů 68.

Parametr TS_C – Závisí na rozevření diskontinuit v masivu D v milimetrech. Nabývá hodnot podle tabulky 3.20. Pokud není možno měřit in-situ, lze hodnotu odhadnout z hloubky daného místa pod povrchem podle rovnice:

$$TS_C = 6,2\log(D) + 12 \quad (3.23)$$

Rozevření trhlin [mm]	Počet klasifikačních bodů TS_C
5	14
3 - 5	16
1 - 3	18
1	19
sevřené	21

Tabulka 3.20: Hodnoty parametru TS_C , převzato z Tesař (1984)

Celková základní hodnota TS je tedy dána vztahem:

$$TS = 10 \log(\sigma_d) + 26,2\log(d) + 6,2\log(D) + 61,4 \quad (3.24)$$

Redukční parametry $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – Tyto redukce je potřeba zavést v následujících případech:

- α – při sklonu ploch diskontinuity $30^\circ - 80^\circ$ proti směru ražby
- β – pro diskontinuity s hladkými rovnými stěnami nebo jílovitou výplní. A zároveň s nepříznivou orientací (viz α)
- γ – při výskytu horninou volně protékající podzemní vody bez hydrostatického tlaku
- δ – při vyplavování jemnozrnného materiálu nebo při výskytu vývěřů podzemní vody pod hydrostatickým tlakem

Hodnota redukci je závislá na základním počtu klasifikačních bodů a lze ji získat z tabulky 3.21.

Počet klasifikačních bodů TS	snížení počtu klasifikačních bodů			
	α	β	γ	δ
25	0.0	0.0	4.0	12.0
30	0.0	0.0	3.5	10.5
35	1.0	1.5	3.0	10.0
40	1.5	2.5	3.0	9.5
45	2.5	3.5	3.0	8.0
50	3.5	5.0	2.5	8.0
55	4.0	6.0	2.5	7.5
60	5.0	7.5	2.0	7.0
65	6.0	9.0	2.0	6.0
70	6.5	10.0	2.0	5.5
75	7.5	11.0	1.5	5.0
80	8.5	12.5	1.5	4.0
85	9.0	14.0	1.0	3.5
90	10.0	15.0	1.0	3.0
95	11.0	16.0	1.0	2.5
100	11.5	17.5	0.5	2.0

Tabulka 3.21: Hodnoty redukcí QTS, převzato z Tesař (1984)

4. Hodnocení skalních svahů

Pro posouzení možnosti využití daných klasifikací na hodnocení náchylnosti skalních svahů byly vybrány tři svahy s rozdílnými strukturálně geologickými vlastnostmi. Jedná se o pískovcovou skalní stěnu Pastýřská stěna na levém břehu Labe v Děčíně, granitový skalní svah u hradiště Starý loket v Tašovicích u Karlových Varů a jihovýchodní stěnu Branické skály, tvořenou zvrásněnými vrstvami vápence.

4.1 Metodika hodnocení

Zařazení svahu do výsledných stabilitních tříd probíhalo na základě hodnocení masivu na jednotlivých dokumentačních bodech. Výjimkou byla metoda RSR-PR systému Nemeton 2013 (Štábl a kol., 2013), která hodnotí celý svah jako celek.

Na každém dokumentačním bodě byly získány hodnoty pro jednotlivé parametry klasifikačních systémů. Výsledné hodnoty všech klasifikací (kromě Q-system a Q-slope) byly pro porovnání v grafech 4.4, 4.6 a 4.9 převedeny na jednotnou škálu 0-100. Dále byly vypočteny průměrné hodnoty pro celý svah (viz příloha A.1).

Rozteč puklin jednotlivých puklinových systémů a diskontinuit byla změřena pásmem nebo svinovacím metrem. Z rozteče puklin byla pomocí rovnice 3.2 vypočítána hodnota J_v . Pomocí vztahu 3.5 byla odvozena hodnota RQD.

Orientace svahu, puklinových systémů a diskontinuit byla změřena geologickým kompasem. Další data byla získána z fotogrammetrického modelu zhotoveného pomocí UAV použitím nástroje pro měření ploch v programu CloudCompare.

Hrubost puklinové stěny byla hodnocena vizuálně s pomocí vzorových profilů z obrázku 4.1 a Bartonova hřebene.

Pro získání odrazového čísla Schmidtova kladiva Hr bylo provedeno na každém dokumentačním bodě 12 měření. Dvě nejdlejší hodnoty byly vyřazeny a ze zbylých hodnot byl spočítán aritmetický průměr. Z odrazového čísla byly získány hodnoty pevnosti v prostém tlaku UCS. Dále byly provedeny laboratorní zkoušky pro pevnost v prostém tlaku a výsledky byly porovnány.

RQD

Bez možnosti získání vrtného jádra požadované kvality byla hodnota RQD odvozena z objemového součtu puklin pomocí vztahu 3.5. Hodnota byla spočtena z měření J_v in-situ na jednotlivých dokumentačních bodech.

Rock structure rating

Parametry pro Rock structure rating byly odvozeny z odrazového čísla a měření puklinového systému.

Relation between J_r and JRC_n		J_r	JRC_{20}	JRC_{100}
I	Rough	4	20	11
	Smooth			
II	Slickensided	3	14	9
	Stepped			
III	Slickensided	2	11	8
	Stepped			
IV	Rough	3	14	9
	Smooth			
V	Slickensided	2	11	8
	Stepped			
VI	Slickensided	1.5	7	6
	Undulating			
VII	Rough	1.5	2.5	2.3
	Smooth			
VIII	Slickensided	1.0	1.5	0.9
	Stepped			
IX	Slickensided	0.5	0.5	0.6
	Planar			

Obrázek 4.1: Vzorové profily pro odhad hrubosti puklinové stěny, převzato z Singh a Goel (2011)

Rock slope rating

Hodnoty jedenácti hlavních geotechnických kritérií bodového vyhodnocení RSR-PR byly získány z vizuální prohlídky a měření geometrie svahu a puklinového systému pomocí faktoriální tabulky vyhodnocení.

Q-system a Q-slope

Za parametr SRF klasifikace Q-system byla dosazena hodnota 1, protože není pro stabilitu svahu příliš relevantní. Aby byl zohledněn vliv srážek na stav svahu, byla hodnota parametru J_w vždy $\leq 0,66$. U systému Q-slope byla hodnota SRF_{slope} zvolena podle vlastností masivu. O-faktor puklinového systému byl zvolen podle odhadnuté příznivosti jeho orientace.

Rock mass rating a Slope mass rating

Tabulkové hodnoty parametru orientace 3.15 nepřiměřeně snižují výslednou hodnotu RMR, někdy až do záporných hodnot, a to i u relativně stabilních částí svahu, proto byla vyhodnocena pouze hodnota RMR_{basic} , která poskytuje objektivnější výsledky. Obecný popis stavu podzemní vody byl hodnocen tak, aby zohledňoval také vliv srážek, a proto byla jeho hodnota maximálně 7. Pro výpočet faktorů F_1 , F_2 a F_3 byly použity kontinuální funkce 3.13, 3.14, 3.15 a 3.16, podle zvoleného mechanismu porušení. Pro jejich výpočet byl využit software SMRtool (A.J. Riquelme, 2014).

Geological strength index

Index byl odvozen z vizuální prohlídky masivu pomocí schématu 3.4.

Kvalita textura struktura

Hodnoty hlavních parametrů a zavedených redukcí byly získány z tabulek a rovnic v podkapitole 3.5.7.

4.2 Hodnocené svahy

4.2.1 Pastýřská stěna

Skalní svah Pastýřská stěna se nachází na východní straně stejnojmenného skalního hřbetu v městské části Děčín IV Podmokly (obr. 4.2). Nachází se v inženýrskogeologického subregionu České křídové pánve. Tento subregion je známý výskytem skalního říčení v údolích řek tvořených vysokými skalními stěnami (Matula a Pašek, 1986). Náleží k jizerskému souvrství středního a svrchního turonu. Svah je v rizikových místech sanován pomocí stříkaného betonu, zdiva a horninových kotev. Hodnocena byla severní, méně sanovaná část svahu. Orientace a sklon stěny je 300/85 a místy je mírně převislá. Výška svahu v nejvyšší části je 38m.



Obrázek 4.2: Horní část skalní stěny Pastýřská stěna

Horninový materiál je křemenný středně až hrubozrnný pískovec barvy světle hnědé či světle šedé s nažloutlými vložkami. Pevnost materiálu v prostém tlaku určená laboratorními zkouškami, které byly provedeny Geologickým ústavem AV ČR, nabývá dle stupně zvětrání hodnot 2 – 35 MPa (Petružálek, 2018a). Hodnoty Hr měřené in-situ pomocí Schmidtova kladiva naznačují i vyšší pevnost, až 50 MPa. Tři hlavní puklinové systémy s orientací a sklonem 036/85, 310/86 a 120/30 tvoří subhorizontálně uložené kvádrovité bloky se střední až velmi velkou délkou stran. Nevýraznější puklinový systém je vyvinut podél vrstevnatosti.

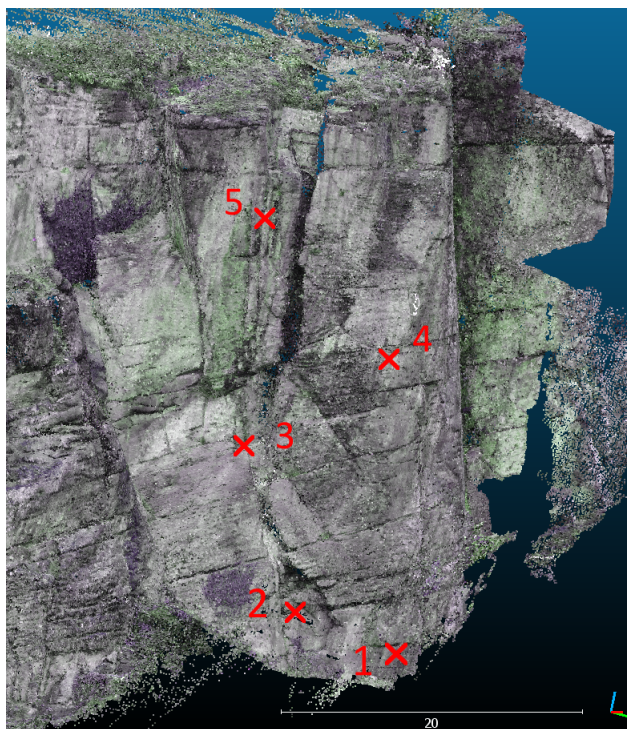
Na většině plochy stěny je hornina slabě zvětralá. Vyskytují se zde však silněji zvětralé zóny, vázané převážně na poruchové zóny a vodní erozi. Tato místa jsou porušena hustšími systémy diskontinuit.

metoda	Pastýřská stěna					Rozsah		Průměrná hodnota*
	D.B.	1	2	3	4	5	min	
RQD	100	95	100	75	80	75	100	90
RSR	72	54	77	59	59	54	77	64.2
Qsystem	0.833333	3.958333	15	0.9375	1	0.833333	15	2.154164
Qslope	0.067708	0.369444	2.625	0.15625	0.166667	0.067708	2.625	0.279639
RMR	49	56	74	47	51	47	74	55.4
SMR	40	69	88	58	60	40	88	63
GSI	75	55	80	40	50	40	80	60
QTS	66.30591	55.18713	82.71423	49.78759	52.40237	49.78759	82.71423	61.27

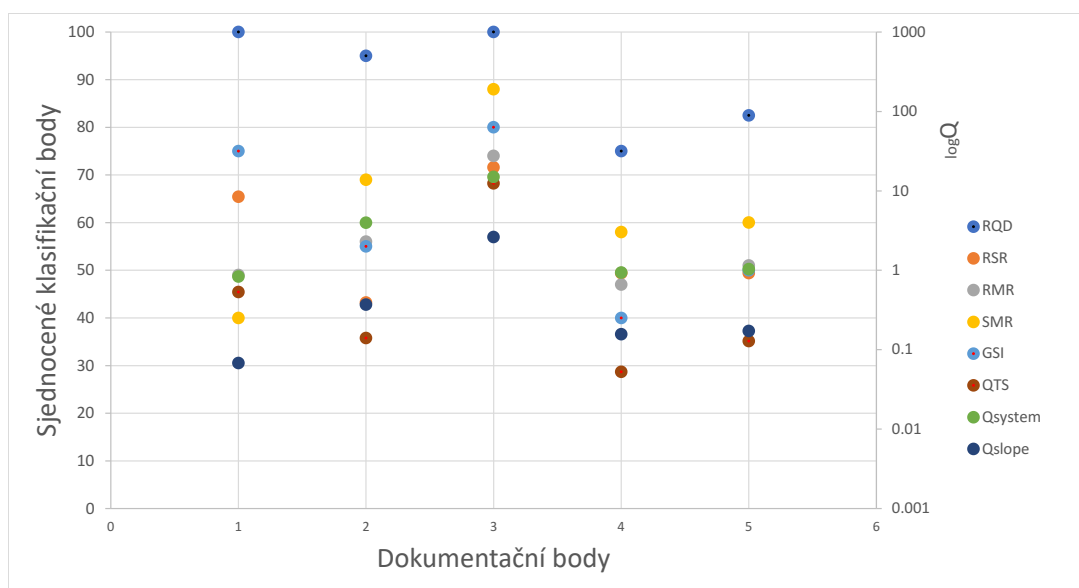
Tabulka 4.1: Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Pastýřská stěna. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr, pro zbylé klasifikace průměr aritmetický

Výsledné hodnoty klasifikačních systémů (tabulka 4.1) se na jednotlivých dokumentačních bodech výrazně liší. Výrazný rozdíl mezi jednotlivými klasifikacemi lze pozorovat například na dokumentačních bodech 1 a 2. Masiv na dokumentačním bodě 1 je tvořen masivními bloky zdravé horniny se stranou 80 – 200 mm, které se však zřetelně překlápějí směrem ze svahu. Masiv na D.B. 2 je sice silněji zvětralý rozpuštěný, ale mnohem stabilnější. Pouze systémy RMR, SMR, Q-system a Q-slope tuto situaci dokázaly správně popsat. Naopak hodnota GSI byla na D.B. 1 mnohem vyšší, než na D.B. 2. Na zbylých dokumentačních bodech je trend všech metod podobný.

Hodnota RSR-PR 44 (viz tabulka 4.2) klasifikuje stav svahu jako *podmínečně labilní*. Počet bodů je na spodní hranici této kategorie a proto není nebezpečí tak vysoké, jak by se mohlo z názvu zdát. Nebezpečná je především výška a sklon svahu.



Obrázek 4.3: Umístění dokumentačních bodů na Pastýřské stěně



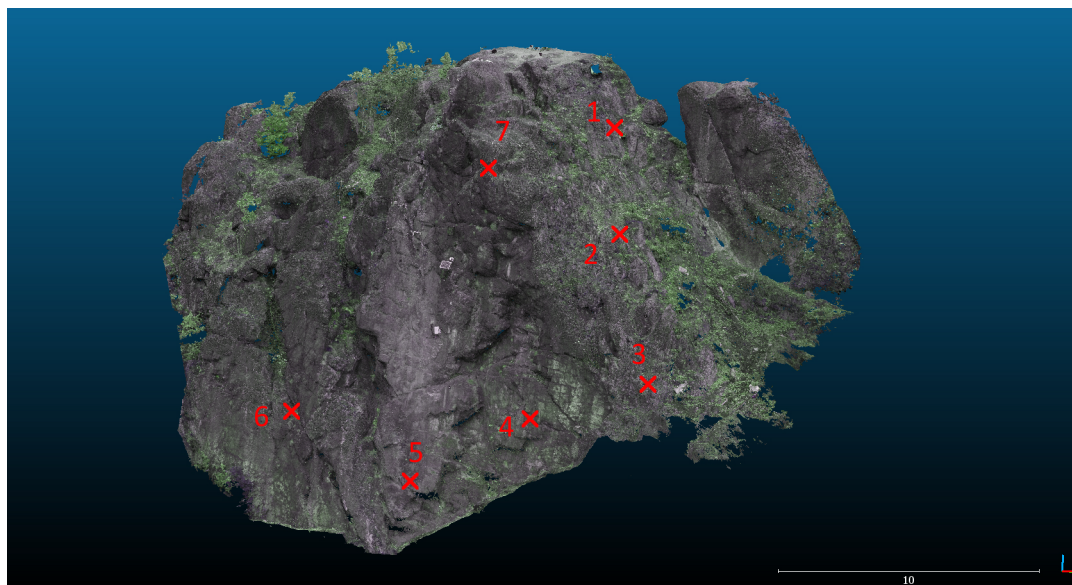
Obrázek 4.4: Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Pastýřská stěna

RSR-PR	points
Hlavní-generelní sklon svahu	7
Výška skalního svahu	7
Geomorfologická stavba	5
Základní popis stavu masivu	3
Průměrná vzdálenost ploch odlučnosti	2
Sklon ploch odlučnosti	5
Vodní aktivita	2
Expozice svahu	5
Rozrušující vlivl vegetace	1
četnost opadávání	5
Vzdálenost svahu paty od ohroženého prostoru	2
point rating	44
Hodnocení stavu svahu	podmínečně labilní

Tabulka 4.2: Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Pas-týřská stěna

4.2.2 Hradiště Starý loket

Žulový skalní svah se nachází na levém břehu Ohře jihozápadně Tašovic u Karlových Varů a patří do regionu krušnohorského plutonu krystalinika. Podle M. Matuly (1986) v tomto regionu dochází v těchto hlubokých mladých erozních údolích se strmými skalními stěnami k opadu kamenů a ojediněle i k řícení skalních bloků. Obrázek 4.5 znázorňuje umístění dokumentačních bodů na fotogrammetrickém modelu.

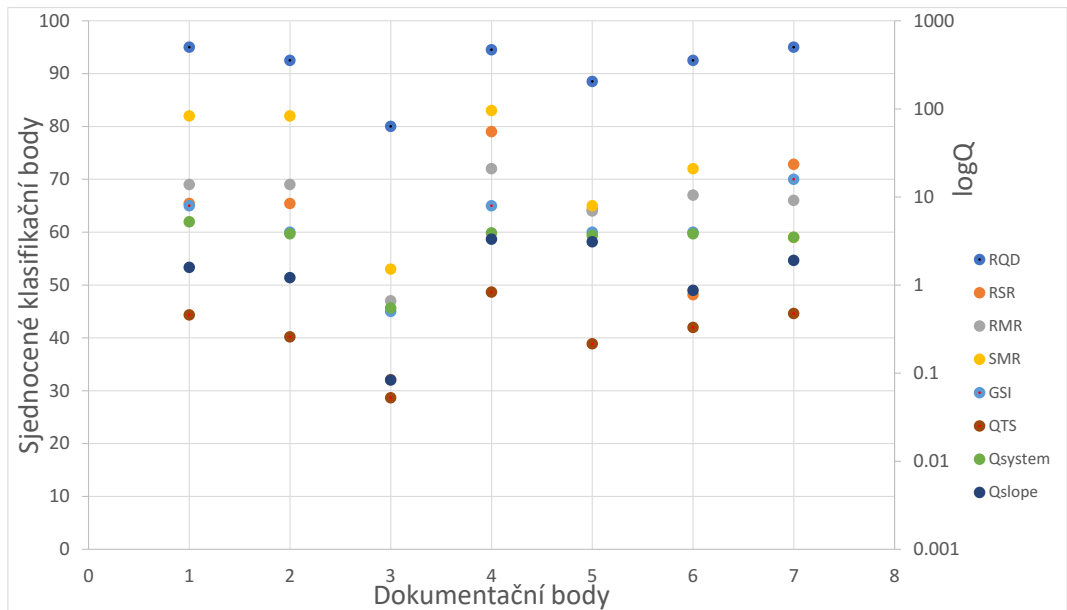


Obrázek 4.5: Umístění dokumentačních bodů na svahu Hradiště Starý loket

Výchoz je v nejvyšším místě vysoký 19 m s orientací a sklonem východní stěny 340/89 a místy mírně převislý. Na severovýchodním a jihozápadní straně je sklon svahu přibližně 50°. Hornina je světle hnědý, hrubě zrnitý granit. V závislosti na stupni zvětrání nabývají hodnoty pevnosti naměřené při laboratorních zkouškách 36 až 63 MPa (Petružálek, 2018b) a pevnosti odvozené z odrazového čísla 17 až 69 MPa. Masiv je porušen třemi hlavními puklinovými systémy tvořící kosoúhlé kvádrovité bloky s několika méně významnými systémy diskontinuit. Horninový materiál je převážně slabě zvětralý a odbarvený, lokálně silněji zvětralý. Na bočních stranách (SV a JZ) je svah částečně porostlý křovinami a drobným náletem.

Skalní svah je poměrně homogenní, proto jsou i výsledné hodnoty jednotlivých klasifikačních systémů na dokumentačních bodech (viz tabulka 4.3) relativně podobné. Nižší hodnoty reprezentují části svahu s větší hustotou puklin, nebo lokálním zvětráním horninového materiálu. Tyto oblasti mohou být potenciálním zdrojem opadu. Hodnoty systémů se sice vzájemně opět výrazně liší (viz obr. 4.6), ale lze u nich pozorovat podobný trend.

Hodnota RSR-PR 46 (viz tabulka 4.4) klasifikuje stav svahu jako *podmínečně labilní* (hodnota je blíže spodní hranici). Nebezpečný je převážně jeho sklon a expozice teplotním změnám v důsledku orientace skalní stěny na jihovýchod.



Obrázek 4.6: Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Hradiště Starý loket.

Metoda	Hradiště starý loket							Rozsah		Průměrná hodnota*
	D.B. - 1	2	3	4	5	6	7	min	max	
RQD	95	92.5	80	94.5	88.5	92.5	95	80	95	91.14286
RSR	72	72	45	83	71	58	78	45	83	68.42857
Q_{system}	5.225	3.815625	0.55	3.898125	3.650625	3.815625	3.483333	0.55	5.225	2.977339
Q_{slope}	1.583333	1.214063	0.083333	3.3075	3.0975	0.867188	1.9	0.083333	3.3075	1.152698
RMR	69	69	47	72	64	67	66	47	72	64.85714
SMR	82	82	53	83	65	72	59	53	83	70.85714
GSI	65	60	45	65	60	60	70	45	70	60.71429
QTS	61.45136	57.75392	47.49379	65.31563	56.58149	59.34387	61.69799	47.49379	65.31563	58.51972

Tabulka 4.3: Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Hradiště Starý loket. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr, pro zbylé klasifikace průměr aritmetický

RSR-PR	points
Hlavní-generelní sklon svahu	7
Výška skalního svahu	5
Geomorfologická stavba	2
Základní popis stavu masivu	3
Průměrná vzdálenost ploch odlučnosti	2
Sklon ploch odlučnosti	7
Vodní aktivita	2
Expozice svahu	7
Rozrušující vlivl vegetace	3
četnost opadávání	5
Vzdálenost svahu paty od ohroženého prostoru	3
point rating	46
Hodnocení stavu svahu	podmínečně labilní

Tabulka 4.4: Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Hradiště Starý loket

4.2.3 Branická skála

Byla hodnocena jihozápadní stěna Branické skály, která je součástí bývalého lomu. Svah je v nejvyšším bodě vysoký 39 m s generelní orientací a sklonem 240/70. Masiv tvoří šedé dvorecko-prokopské deskovité vápence ve vrstvách se směrem sklonu a sklonem 325/50. Skalní svah je velmi členitý s mnoha převisy a volnými bloky o různé velikosti s délkou hrany od 20 do 300 cm. Jsou zde zřetelné tři hlavní puklinové systémy s orientací a sklonem 325/50, 197/89 a 085/62, které definují plochy odlučnosti a tvoří deskovité bloky o tloušťce 20 – 400 mm.



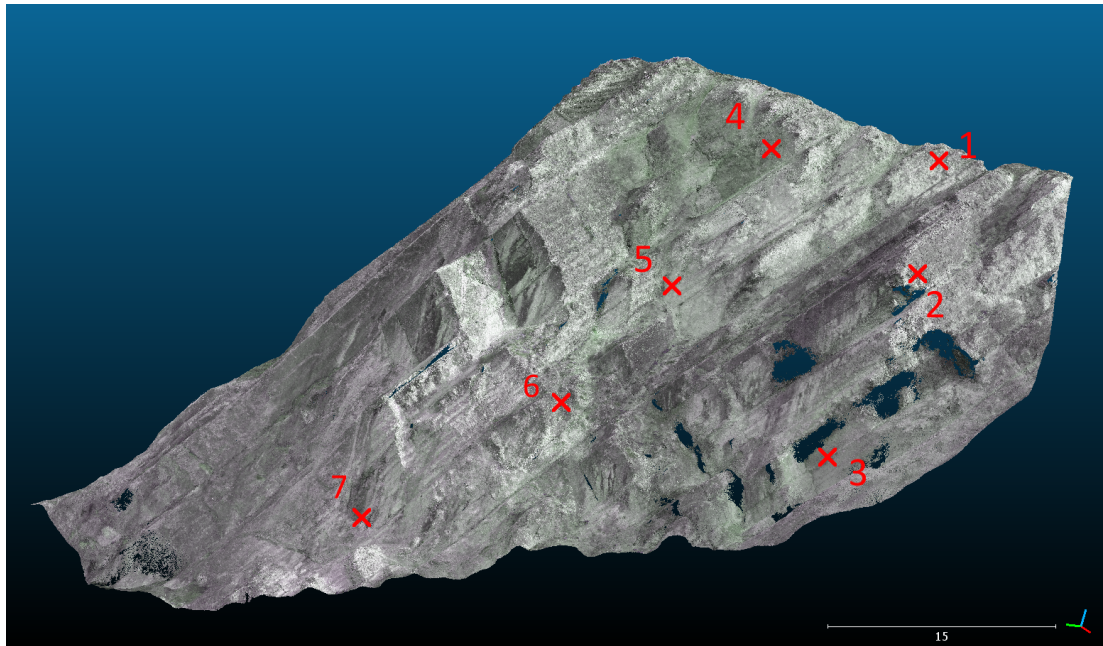
Obrázek 4.7: Branická skála

Horninový materiál je tvořen hlíznatým biomikritem a mikritem šedé až světle šedé barvy (Česká geologická služba, 1998). Stupeň zvětrání masivu se v jednotlivých vrstvách velmi liší. Od velmi pevné zdravé horniny s pevností UCS okolo 120 MPa, až po velmi zvětralou horninu s pevností okolo 20 MPa (tato pevnost vypočítaná z odrazového čísla Schmidtova kladiva platí pravděpodobně pouze pro přípovrchovou vrstvu, protože laboratorní zkoušky provedené na válcových vzorcích zdravého i zvětralého vápence ukázaly pevnost mnohem větší, okolo 90 MPa u zvětralého vápence a až 240 MPa u zdravého (Petružálek, 2019)).

V důsledku vysoké heterogenity, anizotropie a členitosti svahu bylo hodnocení jeho stavu pomocí klasifikačních systémů v porovnání s předchozími lokalitami obtížné. Největší riziko zde tvoří jednotlivé volné bloky, které většina systémů nedokáže posoudit. Žádný klasifikační systém, kromě RSR-PR, také nezohledňuje přítomnost převisů. Dále bylo obtížné souhrnně zhodnotit vrstvy s výrazně odlišnými geotechnickými vlastnostmi. Problematický byl i popis bioklastické horniny se zvětralou jemnozrnnou složkou, protože nebylo jasné, zda ji popsat jako masivní, či rozpukanou horninu.

Z těchto důvodů jsou výsledné hodnoty velmi rozptýleny (viz tabulka 4.5 a obr. 4.9). Dokumentační body s nejnižšími hodnotami se nacházejí v horní části svahu, kde je masiv velmi zvětralý a přechází v eluvium. Tato místa jsou jedním ze zdrojů materiálu pro opad. Body s nejvyššími hodnotami pak popisují hlavně nižší část masivu, kde je hornina kompaktní a jednotlivé vrstvy silnější.

Hodnota RSR-PR 57 (viz tabulka 4.6) klasifikuje stav svahu stejně jako *pod-*

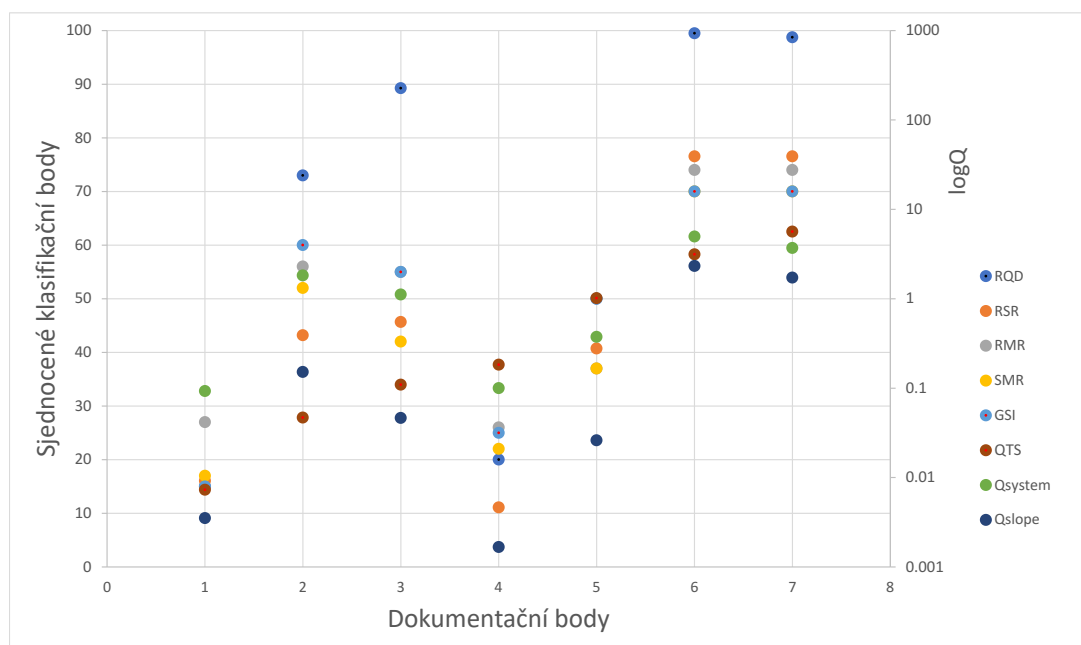


Obrázek 4.8: Umístění dokumentačních bodů na Branické skále

mínečně labilní podobně jako u předchozích dvou svahů. V tomto případě je však hodnota na horní hranici této třídy. Největším rizikem je zde nepříznivý sklon vrstev a odlučných ploch, častý až neustálý opad z vrchní části svahu a teplý expoziční typ.

Metoda	Branická skála							Rozsah		Průměrná hodnota*	
	D.B. -	1	2	3	4	5	6	7	min		max
RQD		15	73	89.25	20	50	99.5	98.75	15	99.5	63.64286
RSR		32	54	56	28	52	81	81	28	81	54.85714
Q_{system}		0.092813	1.825	1.115625	0.1	0.375	4.975	3.703125	0.092813	4.975	0.747623
Q_{slope}		0.003516	0.152083	0.046484	0.001667	0.026042	2.321667	1.728125	0.001667	2.321667	0.063853
RMR		27	56	55	26	37	74	74	26	74	49.85714
SMR		17	52	42	22	37	70	70	17	70	44.28571
GSI		15	60	55	25	50	70	70	15	70	49.28571
QTS		34.81334	46.78836	52.24843	55.57114	66.61564	73.86076	77.63498	34.81334	77.63498	58.21895

Tabulka 4.5: Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Branické skály. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr. Pro zbylé klasifikace průměr aritmetický



Obrázek 4.9: Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Branické skály

RSR-PR	points
Hlavní-generelní sklon svahu	7
Výška skalního svahu	7
Geomorfologická stavba	5
Základní popis stavu masivu	5
Průměrná vzdálenost ploch odlučnosti	2
Sklon ploch odlučnosti	9
Vodní aktivita	2
Expozice svahu	7
Rozrušující vlivl vegetace	2
četnost opadávání	9
Vzdálenost svahu paty od ohroženého prostoru	2
point rating	57
Hodnocení stavu svahu	podmínečně labilní

Tabulka 4.6: Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Branické skály

4.2.4 Diskuze

Z výsledků vyhodnocení tří lokalit je možné diskutovat výhody i nevýhody jednotlivých klasifikačních systémů.

Klasifikační systémy poskytly na prvních dvou lokalitách hodnoty, které, ze subjektivního pohledu, relativně odpovídají skutečnému stavu skalního svahu. Rozptýlené hodnoty u Branické skály sice alespoň zdůraznily členitost svahu a nízkými hodnotami označily některá riziková místa, ale nezhodnotily všechny faktory stability.

Jako problematické se ukázalo měření objemového součtu puklin pro RQD. Na mnoha místech bylo obtížné přesně rozlišit jednotlivé puklinové systémy a ve špatně přístupném terénu měřit jejich rozteče. To, spolu s ostatními omezeními tohoto systému, mohlo vést k velkým nepřesnostem, které se dále mohly projevit v ostatních systémech, které používají RQD jako vstupní parametr.

Jednoduché systémy jako RSR a QTS a GSI jsou u členitých skalních svahů vhodné spíše pro lokální posouzení míry rozpukání masivu, případně stupně zvětrání. V kontextu skalního řízení je možné je použít pro popis části svahu, který je zdrojem materiálu pro opad. Výhodou systému GSI je rychlost jeho vyhodnocení. Výhodou může být i jednoduchá struktura, která umožňuje mírně subjektivní posouzení masivu, které může být pro využití klasifikace v členité geologii Českého masivu s velkým množstvím horninových typů důležité.

Q-system a Q-slope jsou, už z podstaty jejich vzniku, vhodnější spíše do tvrdších, kompaktních hornin, například pro region krystalinika a neovulkanitů, protože pevnost horniny není v jejich vstupních parametrech. Q-slope je však, díky většímu množství parametrů relevantních pro svahy, vhodný i pro posouzení svahů s různými horninovými typy.

Slope mass rating SMR dokáže komplexněji hodnotit geometrické vztahy mezi puklinovými systémy a svahem. Mechanismy porušení se však vztahují spíše k skalním sesuvům. V určitých případech je možné metodu použít k posouzení stability jednotlivých bloků. Při určitých geometrických uspořádáních je velmi citlivá na správné a přesně změřené orientace puklinových systémů a svahu.

Metoda RSR-PR se od ostatních metod výrazně liší. Hodnotí svah jako celek. Zaměřuje se spíše na obecný popis a hodnotí i riziko následků případného dynamického jevu. Jako jediná z metod zohledňuje cyklické tepelné změny vedoucí ke skalnímu řízení.

5. Závěr

Z výsledků aplikace klasifikačních systémů na vybrané lokality Českého masivu vyplývají následující závěry:

- Vybrané klasifikační systémy mají pro využití pro hodnocení náchylnosti skalních svahů v Českém masivu značná omezení. Ta částečně plynou už ze samotné podstaty těchto metod, kdy se pokouší popsat komplexní těleso skalního svahu pomocí číselné hodnoty.
- Jednoduché metody, jako GSI RSR nebo QTS, většinou vyvinuté pro posouzení relativně malé části masivu ve výrubu tunelu, nemohou spolehlivě hodnotit i několik desítek metrů vysoký skalní svah. Mohou však posloužit při popisu lokálně porušených částí svahu.
- S výjimkou RSR-PR klasifikační systémy nedokáží zohlednit převislý svah, nebo převislou část svahu.
- Z vybraných systémů dokáže jednotlivé bloky omezeně posoudit pouze metoda Slope Mass Rating.
- Geological Strength Index nedokáže správně ohodnotit masivní, ale nepříznivě orientovaný masiv
- Složitější metody (např. SMR, Q-slope), které zohledňují různé charakteristiky svahu významně ovlivňující jeho stabilitu, jsou pro hodnocení vhodnější. Příliš složitý klasifikační systém však postrádá výhodu rychlosti vyhodnocení.
- V členité geologické stavbě Českého masivu je potřeba dobře znát omezení jednotlivých systémů. Protože žádná metoda nepřihlíží ke všem charakteristickým vlastnostem všech horninových typů, je nutné zvolit správnou kombinaci metod.

Využití klasifikačních systémů se nabízí například při předběžném a orientačním inženýrskogeologickém průzkumu. Při hodnocení stability skalního svahu je lze využít pro identifikaci rizikových částí svahu vhodných pro podrobnější analýzu či umístění měřících zařízení monitorovacího systému. I přes zdánlivou jednoduchost je pro sběr dat a vyhodnocování nutná velká zkušenost z praxe.

Literatura

- ABBAS, S. M. a KONIETZKY, H. (2017). Rock mass classification systems. *Introduction to Geomechanics*, **9**(2017), 1–48.
- A.J. RIQUELME, R. TOMÁS, A. A. (2014). SMRTool beta. A calculator for determining Slope Mass Rating (SMR). electronically. URL <http://personal.ua.es/es/ariquelme/smrtool.html>. License Creative Commons, CC.
- BAR, N. a BARTON, N. (2017). The q-slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **50**(12), 3307–3322.
- BARTON, N., LIEN, R. a LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, **6**(4), 189–236.
- BARTON, N., BAR, N. a KOL. (2015). Introducing the q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In *ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- BASAHEL, H. a MITRI, H. (2017). Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: a case study. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, **9**(6), 993–1009.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- BIENIAWSKI, Z. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, **15**(12).
- BIENIAWSKI, Z. (1993). Classification of rock masses for engineering: the rmr system and future trends. In *Rock Testing and Site Characterization*, pages 553–573. Elsevier.
- CAI, M., KAISER, P., UNO, H., TASAKA, Y. a MINAMI, M. (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the gsi system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**(1), 3–19.
- DEERE, D. (1963). Technical description of rock cores. geol. u. *Bauw. J*, **28**.
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA (1998). Databáze významných geologických lokalit: 232. URL <http://lokality.geology.cz/d.pl?item=3&id=232&vyb=1&odlok=7>. [Online; 30-December-2019].
- GOODMAN, R. E. (1976). Toppling of rock slopes. In *Proc. Speciality Conference on Rock Engineering for Foundation and Slopes*, pages 201–234. ASCE.
- HOEK, E. (2007). Practical rock engineering. 2007. *Online. ed. Rocscience*.
- HOEK, E. a BRAY, J. (1981). Rock slope engineering. inst. *Mining and metallurgy, London*.

- HOEK, E. a BROWN, E. (2019). The hoek–brown failure criterion and gsi–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **11**(3), 445–463.
- HOEK, E., KAISER, P. a BAWDEN, W. (1995). Support of underground excavations in hard rock., 1995. *AA Balkema, Rotterdam*.
- HOEK, E. (1998). Reliability of hoek-brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**(1), 63–68.
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C. a CORKUM, B. (2002). Hoek-brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, **1**(1), 267–273.
- KAISER, P. K., MACKAY, C. a GALE, A. (1986). Evaluation of rock classifications at bc rail tumbler ridge tunnels. *Rock mechanics and rock engineering*, **19**(4), 205–234.
- MATULA, M. a PAŠEK, J. (1986). *Regionálna inžinierska geológia ČSSR*. Alfa.
- ONDRÁŠIK, R. a RYBÁŘ, J. (1991). *Dynamická inžinierska geológia*. Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava.
- PALMSTROM, A. (1982). The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In *International Association of Engineering Geology. International congress. 4*, pages 221–228.
- PALMSTROM, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (rqd). *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**(4), 362–377.
- PALMSTROM, A. a BROCH, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the q-system. *Tunnelling and underground space technology*, **21**(6), 575–593.
- PETRUŽÁLEK, M. (2018a). Stanovení popisných a mechanických vlastností na vzorcích z lokality pastýřská stěna. závěrečná zpráva. – nepublikovaná zpráva. Technical report, Geologický ústav AV ČR, v. v. i. pro Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.: 1 – 22. Praha.
- PETRUŽÁLEK, M. (2018b). Stanovení popisných a mechanických vlastností zvětralého granitu z lokality tašovice. závěrečná zpráva. – nepublikovaná zpráva. Technical report, Geologický ústav AV ČR, v. v. i. pro Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.: 1 – 24. Praha.
- PETRUŽÁLEK, M. (2019). Popisné a mechanické vlastností vápence z lokality praha-braník. závěrečná zpráva. – nepublikovaná zpráva. Technical report, Geologický ústav AV ČR, v. v. i. pro Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.: 1 – 24. Praha.
- ROMANA, M. (1985). New adjustment ratings for application of bieniawski classification to slopes. In *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, Mexico*, pages 49–53.

- ROMANA, M., TOMÁS, R., SERÓN, J. A KOL. (2015). Slope mass rating (smr) geomechanics classification: thirty years review. In *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- ROMANA, M., SERÓN, J. B., MONTALAR, E. A KOL. (2003). Smr geomechanics classification: application, experience and validation. In *10th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- SINGH, B. a GOEL, R. K. (2011). *Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann,.
- ČSN EN ISO 14689-1 (72 1005). Geotechnický průzkum a zkoušení - pojmenování, popis a klasifikace hornin, Praha:Český normalizační institut, Česká technická norma, 2008.
- STEAD, D., WOLTER, A. a CLAGUE, J. (2011). A critical review of landslide failure mechanisms. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- ŠTÁBL, STANISLAV HOLÝ, O. A KOL. (2013). *Metodika pro hodnocení stavu skalních svahů*. nemeton 2013.
- TERZAGHI, K. (1946). Introduction to tunnel geology, with proctor. *RU, and White, TL, Rock tunneling with steel supports: The Commercial Shearing & Stamping Co.*
- TESAŘ, O. (1977a). Návrh klasifikace skalních hornin pro podzemní stavby v Praze. In *Sborník celostátního symposia v Praze*. Podzemní stavby 77. část 1.
- TESAŘ, O. (1984). *Klasifikace skalních a poloskalních hornin pro podzemní stavby a její využití*. PhD thesis, Československá akademie věd, Ústav geologie a geotechniky.
- TOMÁS, R., DELGADO, J., GÁÑEZ, S., BERNARDO, J. A KOL. (2007). Modification of slope mass rating (smr) by continuous functions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- WANG, H., LIN, H. a CAO, P. (2017). Correlation of ucs rating with schmidt hammer surface hardness for rock mass classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **50**(1), 195–203.
- WICKHAM, G., TIEDEMANN, H. a SKINNER, E. H. (1972). Support determinations based on geologic predictions. In *N Am Rapid Excav & Tunnelling Conf Proc*, volume 1.
- ZÁRUBA, Q. a MENCL, V. (1987). *Sesuvy a zabezpečování svahů. Druhé přepracované a doplněné vydání*. Academia.

Seznam obrázků

1.1	příklady svahových pohybů typu řícení, převzato z Ondrášik a Rybář (1991)	5
1.2	Mechanismus překlápění bloků: a, ohybové b, blokové c, ohybově-blokové, převzato z Goodman (1976)	6
2.1	Kategorie diskontinuit podle mocnosti výplně. (Barton a kol., 1974)	10
3.1	Postup při stanovení hodnoty RQD z vrtného jádra, převzato z Palmstrom (2005)	13
3.2	Blok obsahující 3 puklinové systémy (Palmstrom, 1982)	14
3.3	Faktoriální tabulka RSR-PR (Štábl a kol., 2013)	18
3.4	Schéma pro stanovení hodnoty GSI na základě vizuální prohlídky masivu ve vztahu k blokovému objemu a stavu puklin, převzato z Singh a Goel (2011)	33
4.1	Vzorové profily pro odhad hrubosti puklinové stěny, převzato z Singh a Goel (2011)	39
4.2	Horní část skalní stěny Pastýřská stěna	40
4.3	Umístění dokumentačních bodů na Pastýřské stěně	42
4.4	Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Pastýřská stěna	42
4.5	Umístění dokumentačních bodů na svahu Hradiště Starý loket	44
4.6	Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Hradiště Starý loket.	45
4.7	Branická skála	47
4.8	Umístění dokumentačních bodů na Branické skále	48
4.9	Srovnání výsledných hodnot pro lokalitu Branické skály	49

Seznam tabulek

2.1	Klasifikace horniny podle ČSN EN ISO 14689-1	8
3.1	Hodnoty parametru A, (Bieniawski, 1989)	15
3.2	Hodnoty parametru B, (Bieniawski, 1989)	15
3.3	Hodnoty parametru C, (Bieniawski, 1989)	16
3.4	Hodnocení stavu skalního svahu podle RSR-PR, (Štábl a kol., 2013)	17
3.5	Zatřídění masivu podle hodnoty Q, převzato z Singh a Goel (2011)	19
3.6	Hodnoty parametru J_n , převzato z Singh a Goel (2011)	20
3.7	Hodnoty parametru J_r , převzato z Singh a Goel (2011)	20
3.8	Hodnoty parametru J_a , převzato z Singh a Goel (2011)	21
3.9	Hodnoty parametru J_w , převzato z Singh a Goel (2011)	22
3.10	Hodnoty parametru SRF , převzato z Singh a Goel (2011)	23
3.11	Hodnoty parametrů pro stanovení Q_{slope} , převzato z Barton a kol. (2015)	25
3.12	Hodnoty parametrů pro stanovení Q_{slope} , převzato z Barton a kol. (2015)	26
3.13	Hodnoty parametru UCS klasifikace RMR podle odrazového čísla H_r , převzato z Wang a kol. (2017)	27
3.14	Hodnoty parametrů RMR_{basic} a jejich popisy, převzato z Bieniawski (1989)	28
3.15	Hodnoty RMR pro orientaci puklinového systému, převzato z Bieniawski (1989)	28
3.16	Pomůcka pro hodnocení diskontinuit v systému RMR , převzato z Bieniawski (1989)	29
3.17	Třídy RMR a jejich mechanické vlastnosti, převzato z Bieniawski (1989)	29
3.18	Faktory SMR, převzato z Tomáš a kol. (2007)	31
3.19	Empirické vztahy pro určení pevnosti v prostém tlaku různých horninových typů, převzato z Hoek (2007)	35
3.20	Hodnoty parametru TS_C , převzato z Tesař (1984)	36
3.21	Hodnoty redukce QTS, převzato z Tesař (1984)	37
4.1	Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Pastýřská stěna. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr, pro zbylé klasifikace průměr aritmetický	41
4.2	Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Pastýřská stěna	43
4.3	Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Hradiště Starý loket. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr, pro zbylé klasifikace průměr aritmetický	45
4.4	Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Hradiště Starý loket	46
4.5	Výsledné hodnoty klasifikačních metod pro lokalitu Branické skály. *Pro výpočet Q a Q_{slope} byl použit geometrický průměr. Pro zbylé klasifikace průměr aritmetický	49

4.6	Výsledná hodnota rychlého vyhodnocení RSR-PR pro lokalitu Branické skály	50
-----	--	----

A. Přílohy

A.1 Dokumentační body a výpočet hodnot

A.1.1 Pastýřská stěna

Pastýřská stěna dokumentační body a výpočet.pdf

A.1.2 Hradiště starý loket

Hradiště starý loket Dokumentační body a výpočet.pdf

A.1.3 Branická skála

Branická skála dokumentační body a výpočet.pdf