



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEOTECHNIKY  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# ŘEŠENÍ NĚKTERÝCH PROBLÉMŮ STABILITY HORNINY VE SVAZÍCH A STĚNÁCH S OPTIMALIZACÍ KOTEVNÍCH PRVKŮ

Solution of some rock stability problems in slopes and walls with optimization  
of anchor elements

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE  
PhD THESIS

OBOR

KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ  
STAVBY

BRANCH OF STUDY

STRUCTURES AND TRAFFIC  
CONSTRUCTIONS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ING. ONDŘEJ HOLÝ

VEDOUČÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSC.

OPONENTI  
OPPONENTS

XXX  
XXX

MÍSTO A DATUM  
OBHAJOBY  
PLACE AND DATE  
OF DEFENSE

BRNO, XX 2019



## **Klíčová slova**

tahová zkouška, plášťové tření, porušení, vrtné jádro, jednoosá tlaková pevnost, svorník, koeficient drsnosti pukliny, vrtání, horninový masiv, skalní řízení, dopadová energie

## **Keywords**

loading test, skin friction, failure, core, uniaxial compressive strenght, rock bolt, joint roughness number, drilling, rock mass, rockfall, impact energy

Rukopis disertační práce je uložen na ústavu geotechniky.

Ondřej Holý<sup>®</sup>  
Všechna práva vyhrazena.

ISBN 80-214-~~XXX~~  
ISSN 1213-4198

# OBSAH

1. ÚVOD .....	1
1.1 Historie a současnost oboru .....	1
1.2 Názvosloví .....	2
1.3 Rizikové geofaktory skalního řízení .....	3
1.4 Geotechnický průzkum .....	5
1.5 Metody zajištění proti pádu horniny .....	6
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	16
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	17
3.1 Realizace tahových zkoušek in situ .....	17
3.2 Realizace průzkumných prací .....	18
3.3 Realizace laboratorních zkoušek .....	19
4. INTERPRETAČNÍ ČÁST .....	20
5. APLIKAČNÍ ČÁST .....	22
Použitá literatura .....	25
CV .....	28
Abstract .....	31



# 1. ÚVOD

V sousedství inženýrských děl, komunikací a obytných budov existují skalní svahy a stěny. Jedná se o svahy a stěny přírodní, formované geologickými činiteli, nebo svahy a stěny antropogenní, vzniklé či upravené člověkem. V prostředí Českého masivu – hlavní geologické soustavy České republiky, se lze díky četným skalním svahům a stěnám, neboli výchozům, seznámit s pestrou horninovou skladbou. Geomorfologie České republiky je různorodá, když 75% území tvoří tzv. Česká vysočina. Tyto skutečnosti podmiňují vznik poutavých přírodních scenérií, které jsou však v případě stavební činnosti často vnímány jako jistá rizika, překážky, ačkoliv se zde ocitly již v dávné geologické minulosti. V případě antropogenních svahů (zářezů, odřezů, lomů atd.) je riziko již při vzniku díla a často se zvyšuje v čase vzhledem k zanedbané údržbě. Pro riziko se v České republice používá pojem geohazard (databázi takových jevů eviduje Česká geologická služba), obsahující jak skalní, tak i poloskalní a zemní svahy.

V dalším textu je problematika metod zajišťování (sanačních metod) omezena na tu část, týkající se hornin, skalního řízení a také s tím související stability skalních stěn.

## 1.1 Historie a současnost oboru

Svahové deformace rozdělil K. Terzaghi (1925) podle fyzikálních vlastností postižených hornin. Dále navrhl číselnou tunelářskou klasifikaci hornin se zohledněním diskontinuit resp. jejich oslabení. Svahové deformace v Československu jsou podrobně technicky popisován nestorem čs. inženýrské geologie Q. Zárubou-Pfeffermannem (1931). Tentýž autor spolu s naším předním geotechnikem V. Menclem (1969) vydali publikaci, týkající se sesuvů a jejich zabezpečování. Vychází významná publikace (Nemčok et al. 1972), věnující se klasifikaci svahových nestabilit a také zásadní publikace L. Hobsta a J. Zajíce (1972) „Kotvení do hornin“. V Londýně se jako část oboru geotechnika rekrutovala vědní oblast pod názvem „Rock slope engineering“, původně zaměřená na problematiku velkolomů. Obratem vychází stejnojmenná publikace (Hoek a Bray 1974 in Wyllie a Mah 2014), později v mnoha reedicích. Od roku 1980 dochází k intenzivním teoretickým inovacím v oblasti skalních svahů u nás i v zahraničí (Pavlík 1981; Hoek 2006; Hoek 2014; Wyllie a Mah 2014) což je dáno především vývojem osobních počítačů a specializovaných software.

V posledních cca dvaceti letech, resp. v současnosti je díky propracovaným software možné provádět parametrické studie a stochastické simulace pomocí numerických metod (Li a Stillborg 1999; Hillar a Pruška 2011; Nicholson 2016).

Určitým problémem je „doplnění“ modelů reálnými daty, získanými průzkumem in situ, jejichž zisk je časově a finančně obvykle velice náročný. Proto je běžné, že řada řešitelů (projektantů či geotechniků) úzce spolupracuje se zhotovitelstvími organizacemi v oboru báňských či geotechnických staveb např. v rámci projektů výzkumu a vývoje.

## 1.2 Názvosloví

Jelikož problematika skalních svahů tvoří jen malou část oboru geotechnika, dochází tak k jakési užší profilaci a výskytu specialistů v rámci ČR. S tím souvisí i některé základní pojmy z praxe, které je vhodné zmínit.

Kotva je pramencový, kabelový nebo tyčový tahový prvek běžně délky větší než 5 m, předepnutý, s volnou délkou a kořenem, únosnosti až 10 000 kN (Pruška 2002). Z hlediska životnosti je její použití pro konstrukce dočasné i trvalé, podle typu použitého materiálu a antikorozi ochrany.

Svorník je termín označující prvek, používaný na stavbách v podzemí i při zajišťování skalních svahů. Pojem tak zlidověl (viz „ankr“ či „jehla“), že mnohdy není zcela jasné, zda se (především na stavbě) daný prvek označuje správně. Tato nejednoznačnost je patrná i v zahraničí. V ČR je asi nejvýstižnější popis (Horák 2000): kratší tyčový prvek (dl. max. 6 m), upínaný do vrtu různým způsobem, předepnutý aktivováním matice v hlavě svorníku, únosnosti běžně do 300 kN. Problémem je, že pojem u nás postupně přešel i na prvky kotvené po celé délce, tj. hřebíky. V technické angličtině se lze setkat se dvěma skupinami a to „soil nails/dowels“ (hřebíky) a „active/passive rock bolts“ (svorníky v celé délce upnuté zcela nebo částečně). Z hlediska životnosti je jejich použití pro konstrukce dočasné i trvalé podle typu použitého materiálu a antikorozi ochrany.

Hřebík je tyčový prvek obdobné délky jako svorník, nepředepnutý. Postrádá volnou délku. Funguje kombinací tahu, soudržnosti a stříhu (Horák 2000). Typický způsob jeho zhotovení spočívá v instalaci do vrtu vyplněného cementovou maltou, případně v dodatečném zainjektování zavrtané tyče. Může být také zarážení. Oproti svorníkům nemusí mít závit ani podkladní desku. Z hlediska životnosti je jejich použití v oblasti zakládání staveb pro konstrukce dočasné i trvalé. V oblasti sanace skalních stěn jde o trvalé prvky.

Skalní svah je ukloněná plocha omezující skalní těleso od okolního prostředí mající jinou fyzikální podstatu, než hmota skalního tělesa, skloněná pod menším úhlem než 60°. (Pavlík 1981).

Skalní stěna viz skalní svah, ovšem až do sklonu vertikálního, vzniklá přirozeně geologickými činiteli nebo uměle lidskou činností (Pavlík 1981).

Skalní převis je plocha ve smyslu skalní stěny, jejíž sklon je vyšší než 90° (Pavlík 1981).

Výška stěny je svislá odlehlost paty a hrany stěny v určitém profilu, kdy do 10 m se jedná obvykle o stěny nízké, od 10 do 50 m o stěny vysoké a nad 50 m jde o stěny velmi vysoké (Pavlík 1981).

Sklon stěny je generelní úhel, sevřený spojnicí paty a horní hrany hrany s horizontálou.

Skalní výchoz je místo, kde jsou in situ povrchově obnaženy horniny podloží.

Skalní defilé je soubor dvou a více skalních výchozů.

Smyková plocha je plocha obecného tvaru uvnitř skalního tělesa, podél níž dochází v důsledku určitého oslabení nebo zvýšení koncentrace napětí ke vzájemnému pohybu částí tělesa/bloků (Pavlík 1981).

Plášťové tření je velikost napětí na plášti kořene kotvy/svorníku/hřebíku při dané kotevní síle. Při jeho plné mobilizaci je dosaženo limitní kotevní síly na mezi porušení.

Impakt (náraz) bloku je proces, kdy při dopadu tělesa horniny dochází k disipaci kinetické energie přetvárnou prací materiálu záchytných systémů či jakýchkoliv jiných objektů.

Skalní řízení je proces pádu horninových úlomků či jednotlivých bloků saltací (odskokem) nebo volným pádem, resp. uvolnění větší kubatury hornin s kombinovaným pohybem (Nemčok et al. 1972).

### **1.3 Rizikové geofaktory skalního řízení**

Skalní řízení patří mezi rizikové geofaktory, stejně jako zemní sesuvy a zemitokamenité proudy. Jejich výskyt může nastat za vhodných podmínek i současně nebo indukovaně. Rizikové geofaktory skalního řízení lze popsat s použitím následujících kritérií:

Rizikem geohazardu dle klasifikace RHRS (Wyllie 1987), kde riziko vyjadřuje míru poškození objektů, ohrožení osob s jejich četností výskytu v místě dopadu a hazard jako pravděpodobnost vzniku jevu, v ČR slovně např. podle Lysenka (1997),

Bodovým hodnocením stability klasifikací RMR (Bieniawski 1989), SMR (Tomás 2007), Qslope (Barton a Bar 2016),

Analýzou strukturních dat pomocí kinematické analýzy (Hoek 2006),

Stupněm bezpečnosti, který určuje míru stability tělesa (bloku, svahu, stěny),

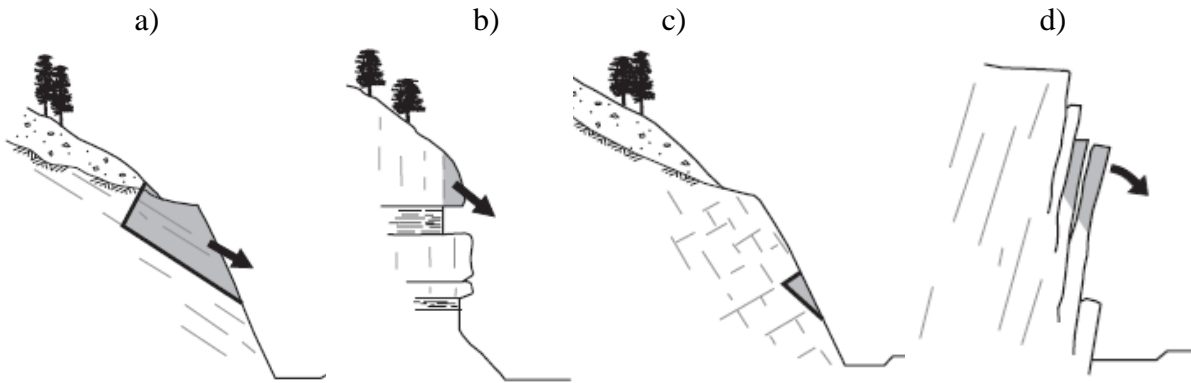
Určením stabilního sklonu pomocí Rothovy metody (Hobst a Zajíc 1972 in Pavlík 1981),

Určením trajektorie pádu pomocí simulace CRSP (Pfeifer a Bowen 1989) (Obr.10), empiricky (Dorren 2003; Domaas 1994) nebo pádovou zkouškou,

Monitoringem pohybu vybraných těles automaticky či ručně (Obr.5).

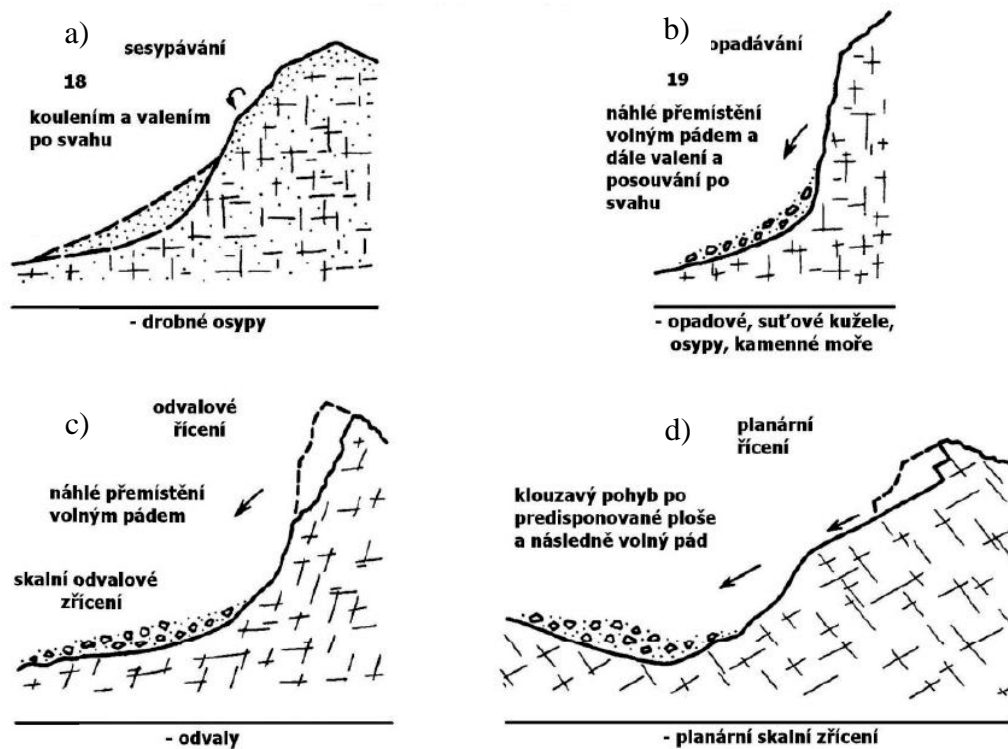


Z hlediska porušení skalní stěny lze vyčlenit tyto případy (upraveno podle Wyllie 2014):



Obr.1 a) smyk po rovinné smykové ploše; b) odtržení bloků; c) smyk horninových klínů; d) překlopení bloků

Z hlediska charakteru řízení horniny lze vyčlenit tyto případy (upraveno podle Malgot et al. 1992):

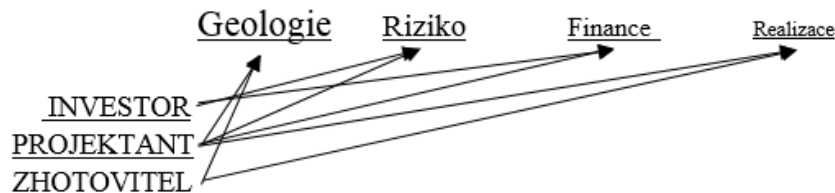


Obr.2 a) sesypávání; b) opadávání; c) odvalové řízení; d) planární řízení

Posouzení typu porušení a charakteru pádu horniny je jedním z významných faktorů a současně úkolů geotechnického průzkumu (GTP), které podmiňují výběr metody zajištění (sanační metody) skalní stěny proti pádu hornin. Důvodem vzniku tohoto typu svahové deformace je především erozní činnost, tedy chemická a mechanická eroze způsobená srážkovou a podzemní vodou, větrem, vegetací a mechanickým namáháním díky tepelné oscilaci horniny.

## 1.4 Geotechnický průzkum

Jako i mnoho dalších metod v podzemním stavitelství, zakládání staveb apod. se stabilizace či ochrana skalních stěn neobejde bez podrobného GTP. V souvislosti s probíhající debatou profesního aktivu geotechniky (ČKAIT, jaro 2017) ohledně kvality GTP je na místě zmínit zkušenosti s touto problematikou. V české praxi sanace skalních stěn se lze setkat přibližně s tímto schématem subjektů a jejich hledisek v procesu výstavby (Obr.28):



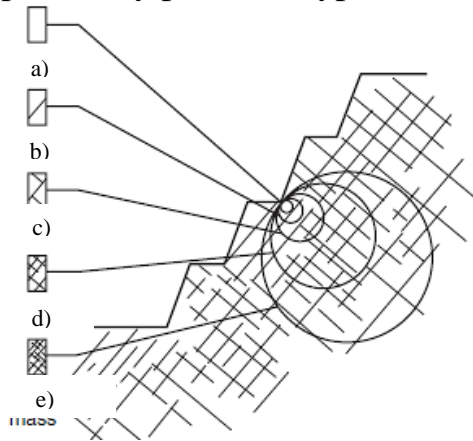
Obr.3 Schéma významnosti hledisek subjektů v procesu výstavby

Ve schématu není zahrnut zhotovitel GTP. Není tam také zhotovitel geodetického zaměření, biologického či dendrologického průzkumu aj. To vše jsou činnosti podpůrné, jejichž náplň a zadání určuje projektant a jejichž výsledky přebírá pro svou činnost. Je to také projektant, který v případě nedostatečného průzkumu (předaného na základě projektantovy objednávky, předaného investorem nebo jiným projektantem) výsledky průzkumu nepřevezme a neprovede rizikový návrh. Oporu co do výběru GT kategorie, návrhového přístupu i potřebného testování může projektant nalézt v ČSN EN1997-1, zejména kap. 1 až 3.

Geotechnický průzkum musí jednoznačně:

- 1) Provést geometrické určení lokality – zaznamenat prostorový rozsah jevů jako jsou hrana, pata, převis, osypový kužel, vegetace, suťové pole, rokle a rozsedliny, skalní věže, kaverny a police, pukliny vyšších řádů, výrony vody z puklin a ledopády, staré ochranné prvky, stávající zástavbu, ohrožené objekty (příportálové oblasti, komunikace, budovy, vodní díla, stezky), případně další infrastrukturu,
- 2) Provést terénní rekognoskaci – dokumentovat zonaci částí masivu, které vykazují uniformní vlastnosti a jsou odlišeny výraznou změnou (poruchou, typem horniny, typem porušení/řícení), strukturní stavbou. Realizovat terénní náčrt s trasou pochůzky (kilometrů apod.), podrobnou fotodokumentaci,
- 3) Určit horninový typ – s regionálně-geologickým zařazením, petrografickým zařazením, charakterem zvětrání,
- 4) Stanovit fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin – objemovou hmotnost, jednoosou tlakovou pevnost, smykové parametry pevnosti diskontinuity/intaktní horniny/masivu podle měřítko nestability (Obr.4) popř. další korelačně odvozené parametry,

- 5) Popsat diskontinuity – s měřením orientace strukturních prvků (vrstevních ploch, foliací, lineace, hlavními a vedlejšími systémy diskontinuit), charakterem diskontinuit (ISRM 1977) jako je rozteč, četnost, drsnost, průběžnost, výplň, aktivita, odrazová pevnost (Schmidt nebo podle ČSN EN ISO 14689-1), číselnou klasifikací RQD, GSI, Jv, Ja, Jr, Jd, Jn, Jcond, Vb, S (Palmström 1996; 2005) viz kap.1.5.1.
- 6) Popsat pokryvné útvary – parametry jako je mocnost, zatřídění, smykové parametry pevnosti, typ a velikost propustnosti, vlhkost,



Obr.4 Idealizované schéma velikosti vzorku a přechodu od horniny a) celistvé; b) s jedním systémem puklin; c) se dvěma systémy puklin; s mnohočetným systémem puklin až ke e) zcela porušenému masivu (upraveno podle Wyllie 2014)

Podrobnost a metody geotechnického průzkumu by však měly odpovídat geotechnické kategorii. U stávajících skalních stěn je obecně vždy lepší získat data měřením in situ než odvozením. Navíc je nezbytné lokalitu osobně prozkoumat, velmi často za pomoci horolezecké techniky. Zároveň je více než vhodné provést minimálně jeden subhorizontální rotační jádrový vrt  $\varnothing$  cca 50 mm do hloubky alespoň 3,0 m a sérii kopaných sond s obnažením tahových trhlin příp. kaveren. U plánovaných antropogenních skalních svahů (odřezů, zářezů, lomů a příportálových oblastí) je nezbytný podrobný vrtný průzkum, kompletní laboratoř mechaniky hornin vč. všech popisných charakteristik (viz předchozí odstavce).

Špatným příkladem může být stavební akce II/353 Velký Beranov-obchvat. Investorem byl objednan orientační inženýrsko-geologický průzkum pro stupeň DÚR. V trase je mj. několik mostů a oboustranných zářezů hloubky až 20 m v třebíčských durbachitech. Výsledkem průzkumu byly jádrové vrty (prováděné bez výplachu!) do hl. 10 m s vyčíslením tabulkové výpočtové únosnosti  $R_{dt}$  [kPa] podle již neplatné ČSN 73 1001. Kuriózní bylo, že v přechodové oblasti plánovaného zářezu a mostu se nachází stávající exponovaný skalní výchoz. Je zjevné, že zde došlo k naprostému mrhání veřejných prostředků.

## 1.5 Metody zajištění proti pádu horniny

Na rozdělení metod zajištění (dále sanačních metod), používaných v ČR není konkrétní klíč. Z dosavadní praxe autora DP lze na metody nahlížet třemi (často vzájemně se překrývajícími) způsoby a to podle následujících kategorií:

Podle umístění ve svahu v oblasti:

- a) akumulční
- b) transportní
- c) zdrojové

Podle disipace energie na:

- d) aktivní
- e) pasivní

Podle funkce na: f) monitorovací (observace)

- g) akumulční
- h) záchytná
- i) usměrňovací
- j) ochranná
- k) stabilizační

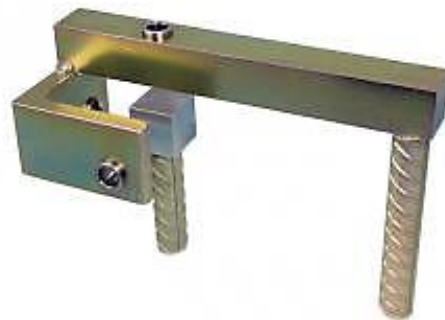
Pro další orientaci je ke každé metodě vedle názvu přiřazena i příslušná kombinace číslice a písmena dané kategorie, pokud je relevantní. Vlastní opatření jsou často technologicky v překryvu a proto se mohou v následujícím výčtu opakovat.

Monitorovací opatření (IIIIf) se umisťují do Ia, Ib i Ic. Patří mezi ně:

- a) Vizuální pozorování – osazení skleněných destiček; dnes již málo používané,
- b) Velmi přesný monitoring pohybu skalních bloků – dilatometry manuální (Obr.5; 6) nebo automatické s měřením 1D, 2D a 3D posunů, tiltmetry, radarová interferometrie,
- c) Varovný systém – součást měření posunů, jež dálkově reaguje dle zadaných varovných stavů např. zastavením dopravy výstražnou signalizací.



Obr.6 1D dilatometr podle vlastního návrhu (sada kalibrovaných nastavitelných tyčí s roztečí 20 až 270 cm a měřicím rozsahem  $\pm 15$  mm s přesností měření 0,01 mm (archiv autora)



Obr.5 3D dilatometr (HUDDY DIAMONDS s.r.o.)

Akumulační opatření (IIIg) se podle polohy umisťují do Ia. Patří mezi ně:

- a) Záchytné příkopy – navrhují se podle nomogramů (Ritchie 1963) a pádových simulací,
- b) Vyztužené valy (IIId+IIIh) – zemní konstrukce typu MSE (vyztužené násypy) či terramesh systém (Obr.8),
- c) Ploty, palisády a stěny (IIe+IIIh) – výplň tvoří ocelové sítě (Obr.7), betonové a dřevěné pažiny, výšky běžně 2 m,
- d) Betonová svodidla (IIId) – typ New Jersey výšky běžně 1,1 m.



Obr.7 Trať č. 260 Brno – Č. Třebová  
km 171,330-171,650; těžký ochranný plot  
v. 2 m (archiv autora)



Obr.8 Silnice II/102 v úseku Strnady-Měchenice; vyztužený val –  
první realizace v ČR (archiv autora)

Záchytná opatření (IIIh) se umisťují ve svahu do Ia a Ib. Patří mezi ně:

- a) Vyztužené valy (IIId+IIIg) – zemní konstrukce typu MSE (vyztužené násypy) či terramesh systém, o záchytné energii až 30 000 kJ,
- b) Ploty a palisády (IIe+IIIg) – záchytná energie max. 100 kJ, lehké ploty jako dočasná konstrukce, obecně vhodné pro záchyt sutí a zemitokamenitých proudů,
- c) Dynamické bariéry (IIId) – záchytná energie 100 až 8 500 kJ, obvyklé výšky 3 až 7 m,

- d) Galerie (II<sub>d</sub>) – příportálové oblasti, ŽB konstrukce nebo systém „canopy“ záchytné energie 2 000 kJ (v případě železobetonu až 6 MJ). ŽB galerie se navrhuje se s tlumícím zásypem, jsou typické v alpských zemích. V ČR ochrana doubravnického portálu pomocí dvou dynamických bariér (Obr.9). ŽB galerie chrání portály choceňského, jakubského a říkovského tunelu,



Obr.9 Doubravnický tunel na trati č. 251 Žďár n. S. – Tišnov v km 85,200; modifikovaná galerie doubravnického portálu tvořená dynamickou bariérou výšky 8,0 a 3,0 m (archiv autora)

Obr.10 Doubravnický tunel v km 85,200; kinematická simulace pádu bloku o objemu 1,6 m<sup>3</sup> bítešské ortoruly (archiv autora)

Usměrňovací opatření (III<sub>i</sub>) se umísťují ve svahu do Ib a Ic. Patří mezi ně:

- a) Clony (II<sub>d</sub>) – v podstatě ploty s popuštěnou ocelovou sítí délky cca 4,0 m směrem po svahu. Během vletu úlomků či bloků horniny do prostoru clony dochází k retardaci rychlosti a amplitudy saltace; je možná instalace několika clon sestupně až k akumulárnímu prostoru.
- b) Závěsy (II<sub>d</sub>+III<sub>g</sub>) – plošný kryt svahu ocelovou sítí, kotvenou při horní hraně nebo i hraně dolní (Obr.11). Dochází k usměrnění pádu drobnějších úlomků a k jejich akumulaci v III<sub>g</sub>, nebo i pod samotným systémem v ponechané rezervě sítě.

Ochranná opatření (III<sub>j</sub>+II<sub>e</sub>) se ve svahu umísťují do Ia, Ib i Ic. Patří mezi ně:

- a) Vegetace – jedná se o odstranění zmlazených sukcesivních dřevin, keřů a stromů
  - 1) s prokazatelným expanzním účinkem kořenového systému v puklinách horniny u strmých svahů nebo 2) s viklacím účinkem vzrostlých stromů při poryvech větru či 3) v případě plošného zajištění např. ocelovými sítěmi.
 V mnoha případech se jedná naopak o ponechání vegetačního krytu jako

významného retardéru skalního řízení a creepu svahovin především u svahů do cca 50° (Berger a Dorren 2007),



Obr.11 Brno-Královo Pole v ul. Myslínova; ocelová síť z r. 2006 ve formě závěsu s betonovým závažím, bývalý granodioritový lom (archiv autora)

- b) Očištění – odstranění přívodových částí masivu ručním (páčidla a motyky), ojediněle pneumatickým náradím. Velice důležité je práce usměrňovat podle přirozeného puklinového systému s odstraněním svahovin, obnažením tahových trhlin vyšších řádů a čištěním puklin stlačeným vzduchem. Provedením očištění dochází k rychlému snížení rizika skalního řízení z povrchové zóny skalní stěny,
- c) Odtěžení – téměř výhradně ruční odstranění nestabilních bloků, polic, převisů a věží horniny ve stěně. Vyjimečně vytvoření laviček s reprofilací svahu (jen u odolných hornin). Používají se pneumatická sbíjecí a vrtací kladiva, pneumatické podušky (60 t), hydraulické „darda“ klíny (Obr.12),



Obr.12 Hydraulické trhací klíny s tlakem až 365 t (www.darda.de)

Od trhacích prací je v současnosti téměř upuštěno kvůli nepříznivým doprovodným jevům a náročnému schvalování. Pokud ano, tak lze použít pouze presplit či ojediněle příložné počínové náložky. Za zcela ojedinělé lze považovat expanzní cementy či vodní paprsek (Hřensko). Strojní způsob představuje nasazení impaktorů či výložníkových

fréz, ale často s nebezpečím „natřesení“ svahu s nadvýlomy a vznikem budoucích nestabilit.

Stabilizační opatření (IIIk+Ile) se ve svahu umisťují do Ib a Ic. Patří mezi ně:

- a) Podezdívky – nosné podchycení konvexních nestabilních partií svahu, lze použít místní opracovaný materiál jednostranně lícovaný na maltu i na sucho nebo jako přiznané bednění se zalitím betonem. Vhodné je spřažení s masivem prostřednictvím kotevních trnů z betonářské oceli. Řešení je velice efektivní také ve formě patních opěrných pilířků. Zvláště u sedimentárních hornin lze docílit kvalitním řemeslným zpracováním původní vrstevnatosti a přirozeného vzhledu (Obr.13),
- b) Plomby, spárování, výplňová injektáž, odlehčovací vrty – materiál plomb je totožný jako u podezdívek, ale bez nosné funkce. Hlavní úkolem je omezení pronikání mrazu a vody do dutin - sklípků, krasových jevů, mrazových kaveren či širokých tahových spár (Obr.13). Ve směru proudění vody se spárují betonem koutové hrany lavic s vytvarováním náběhu. Injektáž se provádí buď nízkotlaká do 0,6 MPa nebo samotíží obvykle cemetovými směsmi. Odlehčovací vrty (do Ø 156 mm) se realizují v řadách subhorizontálně a dovrchně v místech výronů puklinové vody a níže pro redukci hydrostatického tlaku,



Obr.13 Krnsko - sanace skalní stěny v zadním traktu obytného domu, kombinace podezdívek, plomb a kotvení v kallianasových vápňitých pískovcích (archiv autora)

- c) Stříkaný beton – převažuje mokrá směs tloušťky do 100 mm, s výztužnými ocelovými mřížemi a hřebíky. Pro vyšší statickou účinnost je možné použití drátkobetonu (koroze vyčnívající drátek v lící stěny). Nevýhodou je nutnost zbudování skutečně účinné drenáže rubu stěny, náchylnost k promrzání a vzhled. U svahů menších ploch s výrazně desintegrovanou matečnou horninou je to nicméně jedna z efektivních bezúdržbových metod,



- d) 3D ocelová mřížovina – je kotvená hřebíky a diagonálními pruty, vyplněná štěrkem a opatřená stříkaným betonem nebo plastovou PP mříží s hydroosevem. Jde o velice efektivní metodu v poloskálních svazích sklonu až 90°. V ČR je provedeno autorem tohoto pojednání několik návrhů (Obr.14),



Obr.14 Silnice mezi Štýrskem a Sv. Valentýnem v Rakousku - sanace skalního svahu (foto poskytl R. Krismer)

- e) Biopásy – jsou tvořeny pásy ocelové dvouzákrutové sítě s okem 60x80 mm, opatřené kokosovou rohoží a separační geotextilií. Vzniklé kapsy jsou plněné úrodnou zemínou v množství cca 0,4 m<sup>3</sup>/bm<sup>2</sup>. Pokládka se provádí diagonálně ve svazích o sklonu max. 70°. Pásy se kotví v horním horizontu ocelovými hřebíky a v ploše pomocí kotviček tvaru U či T z betonářské oceli. Stabilizují přípovrchové pásmo rozvolněné sutě v poloskálních svazích do hloubky max. 1,5 m či na bázi skalního masivu (Obr.15),



Obr.15 Chorvatsko - sanace poloskálního svahu (foto poskytl M. Šubic)

- f) Železobetonová žebra – kotvená ŽB stěna, tvořená roštem svislých a horizontálních převážkových trámů. Prostory vzniklé v kotevním rastru se opatřují stříkaným betonem s pohledovým obkladem nebo ochrannými sítěmi. V ČR ojediněle jako např. Jakubský tunel a zámek Orlík (Záruba a Mencl 1969), Tišnov v ul. Klášterská (Švanda, Obr.16), časté v alpských zemích a dále při významných stavbách jako jsou přehrady (např. Vaiont) či dálniční zářezy,
- g) Opěrné konstrukce – tížné nebo kotvené (převažují), s funkcí opěrnou či obkladní, materiál železobeton, drátokamenné prvky, zemní konstrukce, ztracené bednění,



Obr.16 Tišnov, ul. Klášterská - sanace skalní stěny v zadním traktu obytného domu; ŽB žebra a aplikace SB se zavěšenými ocel. sítěmi v devonských vápencích (archiv autora)

- h) Ocelové sítě – jedna z nejvíce frekventovaných metod v ČR, velký výběr materiálu i výrobců. Dochází ke stabilizaci rozvolněného pásma skalního svahu definované mocnosti pomocí svorníků a zabránění vývalů horniny mezi svorníky pomocí membránového účinku ocelové sítě, často doplněné křížnými lany (Obr.17),



Obr.17 Tunel č. 8/1 - sanace skalní stěny u brněnského portálu, granodiorit typu Blansko (archiv autora)

Používají se hexagonální sítě (v rolích) s dvojnásobným zákrutem drátu (porucha se nešíří) či jednoduché ortogonální sítě s vyšší pevností drátu (min.  $380 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) s tahovou pevností pásu  $80$  až  $180 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  (Obr.17), lanové sítě (panely) s většími oky únosnosti  $140$  až  $250 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ . Jejich povrchovou úpravu představuje pokovení slitinou Zn-Al nebo dvojitá ochrana s PVC povlakem,

- i) Mikropiloty – používají se jako tlakové a tahové prvky s trubkovou nebo košovou výztuží (Obr.18). Realizují se (mimo zakládání staveb) např. při založení jednotlivých sloupů dynamických bariér, kdy nelze zakládat na skalním podloží. Výztuž tvoří silnostěnné trubky  $\text{Ø } 70/12$  a  $89/10$  s injekčními otvory nebo armokoš z podélných prutů  $\text{Ø } 20$  až  $28 \text{ mm}$  s manžetovou trubkou. Injektáž a další provádění se řídí podle ČSN EN 14199,



Obr.18 Dolní Žleb - výztuž mikropilot při založení patek dynamických bariér (vpravo); Tišnov - založení roznášecího prahu (vlevo) (archiv autora)

- j) Kotvení – jsou prvky pramencové, lanové a tyčové z hlediska konstrukce vlastního stvolu kotvy. Tyčové prvky jsou vyráběné z oceli nebo sklolaminátu. V případě skalního řízení se jedná v drtivé většině o svorníky, hřebíky a lanové kotvy upínané cementovou maltou nebo syntetickými pryskyřicemi s průměry prvků od  $20$  do  $32 \text{ mm}$  a únosností až  $440 \text{ kN}$  (ocel ST 500 S), ale i  $850 \text{ kN}$  (ocel Y 1050). Méně časté jsou kompozitní svorníky  $\text{Ø } 20$  až  $25 \text{ mm}$ , limitované pevností závitu  $80$  až  $180 \text{ kN}$  (Obr.21), což je také jejich hlavní nevýhoda na úkor průřezu jádra tyče. Lanové kotvy jsou časté v případech opásání samostatných skalních objektů např. lanovými sítěmi a při instalaci dynamických bariér. Hlavní výhoda spočívá v konstrukci hlavy tvořené flexibilní očnicí s temváním. Díky tomu není nutné vrtat ve směru tahu. Využívá se také pro jednoduchost napojování brzdných mechanismů bariér přímo na montážní oko kotvy. Nejčastěji jsou používány lana pr.  $10$  až  $24 \text{ mm}$  s obvyklou únosností kotvy  $170$  až  $780 \text{ kN}$ . Jako pomocné kotevní prvky jsou hojně využívány tyče z betonářské oceli  $\text{Ø } 25 \text{ mm}$  s kovaným okem (Obr.20) (vyjímečně závitová tyč s okem šroubovým), které tvoří podélné horizonty pro vodící lana, upínané nejčastěji syntetickým tmelem (např. Lokset, Geoflex) pro svůj rychlý nástup pevnosti. Velice důležitá je volba způsobu zainjektování

kotevních prvků, s čímž souvisí i volba typu svorníku. V současnosti se používá zálivka samotíží (gravitační, beztlaká) nebo nízkotlaká do 0,6 MPa. Vyšší tlaky nejsou obvykle potřeba vzhledem k množství a prostupnosti diskontinuit na většině lokalit (projeví se snadno při výplachu realizačních vrtů mnohdy i u paty svahu výronem vrtného prachu z puklin). Vhodné jsou reinjektáže pro omezení spotřeby směsi. Běžně používané jsou celozávitové plnoprofilové kotevní tyče (CKT) a injektovatelné tyče se ztracenou korunkou (R tyč, IBO apod.), jejichž četnost použití je na vzestupu (Obr.19).



Obr.19 Injektovatelná tyč R 32 N (archiv autora)



Obr.20 Tyč s kovaným okem (archiv autora)

Důvodem použití R-tyčí je častý problém se zablokovanou poměrně drahou vrtnou tyčí (šestihránná vrtáková ocel s úderníkem), kvůli uzavírání vrtu v porušených horninách. Z hlediska ceny a únosnosti je a nejspíše zůstane výhodnější celozávitová tyč i z toho důvodu, že při použití R-tyčí je nutné volit vyšší průměry (typicky 32/18,5 mm) než projektované a to z důvodu jejich častého prasknutí během zavrtávání. Podrobnější rozsah problematiky svorníků viz samostatná kapitola.



Obr.21 Doubravnický tunel, trať č. 251 Žďár n. S. v km 85,200 - kotvení obezdívky boračského portálu sklolaminátovými svorníky (archiv autora)

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce (DP), jak již bylo deklarováno v pojednání DP v rámci rigorózní zkoušky, je rozdělení a zřehlednění sanačních metod s podrobným technickým popisem a ukázkami realizace. Zvláštní zřetel je věnován kotvení pomocí svorníků jako primárních prvků ochrany proti pádu horniny. Výzkum těchto prvků představuje shrnutí a analýzu výsledků tahových zkoušek svorníků in situ a laboratorních zkoušek na odebraných vzorcích horniny (realizace v rámci výzkumného projektu FR-TI4/329). Získané výsledky poslouží jako podklad pro provádění podrobného geotechnického průzkumu a jako vstupní parametr při návrhu konkrétních postupů při zajišťování nestabilit (především z hlediska pádu). Použití těchto výstupů je vhodně demonstrováno v praktických ukázkách.

Řešení disertační práce je předběžně rozčleněno do následujících dílčích kroků (cílů):

- 1) Přehled metod posuzování nestabilit z hlediska pádu horniny.
- 2) Rozdělení metod zajištění skalních stěn proti pádu horniny.
- 3) Realizace 201 ks zatěžovacích zkoušek svorníků na 12 lokalitách s různou geologickou stavbou.
- 4) Laboratorní testování a popis horninových vzorků odebraných jádrovými vrty v celkem 24 lokalitách (vč. lokalit doplněných praxí autora DP).
- 5) Sumarizace výsledků prováděného terénního a laboratorního testování.
- 6) Výběr a třídění dat týkajících se ověřování plášťového tření na rozhraní zálivka/hornina a hledání závislostí s charakteristikami hornin. K tomu jsou použity numerické a simulační metody.
- 7) Analytické a grafické vyjádření dosažených závislostí a jejich verifikace s výsledky provedených zatěžovacích zkoušek.

Objasnění vlivu stavu a množství diskontinuit, pevnosti a objemové hmotnosti horniny povede k získání následujících výstupů:

- 8) Přibližné analytické vyjádření vztahů mezi plášťovým třením  $\tau_b$  [MPa] a parametry horniny (GSI [-], RQD [%], objemová hmotnost  $\rho_v$  [kg.m<sup>-3</sup>], jednoosá tlaková pevnost  $\sigma_c$  [MPa]). Zpřesnění pomocí korelačních koeficientů numerickými metodami v závislosti na velikosti kotevní síly a typu tmelu = přímá hodnota délky (plochy) upnutí  $d_b$  [m] pro návrh a nebo recipročně stanovení  $\tau_b$  v rámci GTP.
- 9) Návrhové diagramy - stochastická simulace závislosti mezi délkou (plochou) upnutí svorníku a plášťovým třením podle kotevní síly a typu tmelu = střední hodnoty a mezní hodnoty (bezpečné) délky upnutí pro orientační návrh bez terénních dat.

Pro účely numerické a stochastické analýzy dat byla využívána zprogramovaná sestava v MS Excel, s využitím metody nejmenšího spádu, metody Monte Carlo (rovnorné a normální rozdělení) a metody trial-error (pokusu a omylu). Pro rychlejší algebraické úpravy byl využíván program Derive 6.1, pro interpretaci zatěžovacích křivek program Advanced Grapher 2.2.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Disertační práce shrnuje experimentální výsledky práce autora v rámci výzkumného projektu FR-TI4/329. Část tohoto projektu (horninové kotvy – svorníky a hřebíky), byla aplikačně zaměřena na jeden z návrhových parametrů při posuzování těchto prvků – plášťové tření mezi kotevním tmelem svorníku a horninovým prostředím.

#### 1.1 Realizace tahových zkoušek in situ

Pro tahové zkoušky byl použit hydraulický systém ENERPAC 600 (Obr.22), který byl kalibrován Českým metrologickým institutem. Hydraulický systém se skládá z dutého válce RCH 603, hydraulického čerpadla, tlakoměru indikujícího zatížení, termoplastické hydraulické hadice, přesného úchylkoměru a magnetického stojanu. Zařízení je schopno vyvinout maximální tahovou sílu 600 kN. V rámci realizace zatěžovacích zkoušek svorníků byl vytvořen speciální zatěžovací stend. Podrobnější popis některých dílčích výsledků je uveden následně.



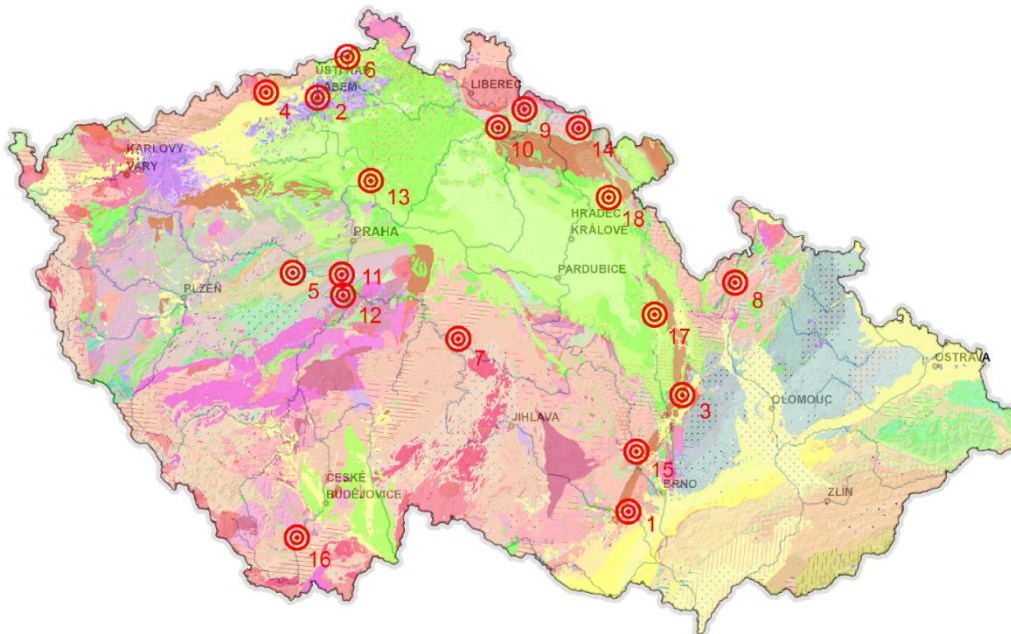
Před zkouškou byla sestava předtížena na 0,5 kN kvůli dosednutí a odečtena nulová hodnota posunutí. Další zatěžování bylo prováděno v 5 až 7 stupních, aby se dosáhlo maximální pevnosti na mezi porušení rozhraní zálivka/hornina nebo meze kluzu oceli či pevnosti stržení závitu. Časové prodleva mezi zatěžovacími stupněmi byla dvacet minut nebo do ustálení posunů. Hodnoty posunu v jednotlivých úrovních zatížení byly odečteny digitálním snímačem. Výsledky byly zaznamenány do protokolů pro další zpracování.

Obr.22 ENERPAC 600 a zatěžovací stend (archiv autora)

Jako inovativní součást sestavy byl zkonstruován zatěžovací stand (Obr.22). Ramena jsou vyrobena z válcovaných profilů HEA. Ty jsou spojeny horním a dolním styčným a každý z nich je pro zvýšení tuhosti vysokopevnostně přivařen k centrální silnostěnné trubce. Na koncích jsou ramena opatřena závitovými tyčemi jako aretace vzhledem k ose svorníku. Zařízení se vzhledem k vyšší hmotnosti při manipulaci vyvážovalo dočasným horním kotvením. Důvod, proč bylo takovéto zařízení navrženo, spočívá v přenosu tlakových sil do pevné skalní horniny mimo hypotetickou kuželovou výtrž a to ve vzdálenosti  $l_{\min} = 15d_{\text{vrt}}$ . Díky tomu nebylo okolí svorníku tlakově ovlivněno.

Z provedených 201 ks tahových zkoušek bylo pro další hodnocení použito 87 ks, tedy cca 43%. Interpretace výsledků nebyla zaměřena na deformační parametry, ale byl sledován vývoj postupného zatěžování vs. posun svorníku. Z průběhů zkoušek pak byla hodnocena mez vzniku plné mobilizace plášťového tření a to před mezí kluzu oceli (v případě svorníků typu CKT a IBO) nebo mezí pevnosti kompozitního závitu (v případě svorníků typu Rockbolt).

Od ukončení projektu v r. 2016 a publikování výsledků (Holý 2017) došlo ke kritické revizi dat a hledání širších vztahů především směrem k charakteru diskontinuit hornin všech 12 lokalit (Obr.23). Navíc bylo doplněno dalších 6 lokalit, kde autor prováděl obdobný geotechnický průzkum v rámci pracovních zakázek (Tab.1).



Obr.23 Situování testovaných (č.1-12) a doplňkových (č.13-18) lokalit v mapě regionálně-geologického členění ČR 1 : 500 000 (www.geology.cz)

## 1.2 Realizace průzkumných prací

Součástí výzkumného projektu byla realizace vrtů  $\varnothing 50$  mm, délky 3 m rotačním jádrovým vrtáním s vodním výplachem soupravou Hilti DD500 (Obr.24). Hmotná

dokumentace v podobě vrtných jader byla uschována v připravených vzorkovnicích (Obr.25). Současně s odběrem vzorků byl prováděn i popis a hodnocení diskontinuit. Následoval převoz vzorkovnic do laboratoře mechaniky hornin v rámci Centra AdMaS k dalšímu testování.



Obr.24 Hanušovice - jádrové vrtání pr. 50 mm (archiv autora)



Obr.25 Vrtná jádra a vzorkovnice dl. 1 m (archiv autora)

### 1.3 Realizace laboratorních zkoušek

Přehled zkoušek a výsledků testů byl uveřejněn v rámci oponentury výzkumného projektu FR-TI4/329. Dílčí výsledky pak byly publikovány (Zavacký 2017; Holý 2017) v recenzovaném časopise. Data byla autorem dále rozšířena (Tab.1).

Lokalita č.	Název	Horninový typ	Ø	Ø	Korelovaná
			Prostá tlaková pevnost $\sigma_c$ [MPa]	Objemová hmotnost $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	tahová pevnost $\sigma_t$ (Horák 1992) [MPa]
1	Dolní Kounice	Granodiort, typ Tetčice	74	2 618	7,2
2	Ústí n. Labem – Mariánská Skála	Trachyt	65	2 423	6,5
3	Velké Opatovice	Písčítý slínovec	55	2 152	1,4
4	Hrob	Pararula dvojslídna	29*	2 519*	1,7*
5	Velkolom Čertovy Schody	Vápenec mikritický	51	2 669	1,3
6	Dolní Žleb	Křemenný pískovec	31	2 016	0,9
7	Lom Vlastějovice	Ortorula, skarn	66	2 579	6,1
8	Hanušovice	Amfibolit	62	2 869	5,6
9	Vilémov	Fylit až kvarcit	50	2 628	3,9



## Teze disertační práce

10	Železný Brod	Fylit dvojslídny	6,1**	2 535**	0,1**
11	Vrané nad Vltavou	Tufit	86	2 627	2,0
12	Štěchovice	Břidlice	29	2 690	0,9
13 <sup>#</sup>	Mělník – Na Polabí	Vápnitý slínovec	20	2 288	0,7
14 <sup>#</sup>	Pomezní Boudy	Rula	77	2 642	7,8
15 <sup>#</sup>	Tišnov - Trmačov	Arkóza	53	2 641	1,4
16 <sup>#</sup>	Český Krumlov J1	Krystalický vápenec	46	2 838	3,4
17 <sup>#</sup>	Český Krumlov J2	Krystalický vápenec	106	2 822	13,1
18 <sup>#</sup>	Český Krumlov J3	Krystalický vápenec	103	2 841	12,5
19 <sup>#</sup>	Český Krumlov J4	Krystalický vápenec	86	2 851	9,3
20 <sup>#</sup>	Český Krumlov J5	Krystalický vápenec	102	2 851	12,3
21 <sup>#</sup>	Dlouhá Třebová V1	Vápnitý slínovec	66	2 531	1,6
22 <sup>#</sup>	Dlouhá Třebová V2	Vápnitý slínovec	101	2 427	2,2
23 <sup>#</sup>	Česká Skalice 1	Vápnitý slínovec	100	2 569	2,2
24 <sup>#</sup>	Česká Skalice 2	Vápnitý slínovec	74	2 495	1,7

Pozn.: \*) 2 vzorky    \*\*) 1 vzorek    #) doplňkové lokality (archív autora)

Tab.1 Sumarizace lokalit a jejich základních charakteristik

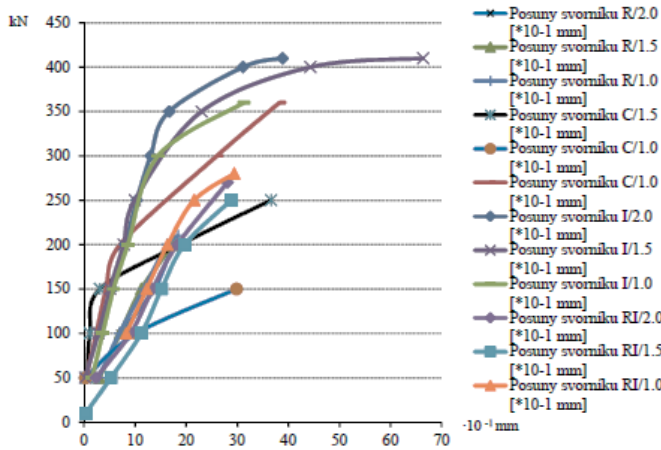
## 4. INTERPRETAČNÍ ČÁST

Interpretace 201 ks zatěžovacích křivek (Obr.26) je založena na pozorování chování svorníku ve dvou fázích A a B (Nicholson 2016). Ve fázi A je pozorována lineární pružná deformace volného konce svorníku, která přechází do fáze B poklesem tahové síly (tím i tuhosti) a plastizováním.

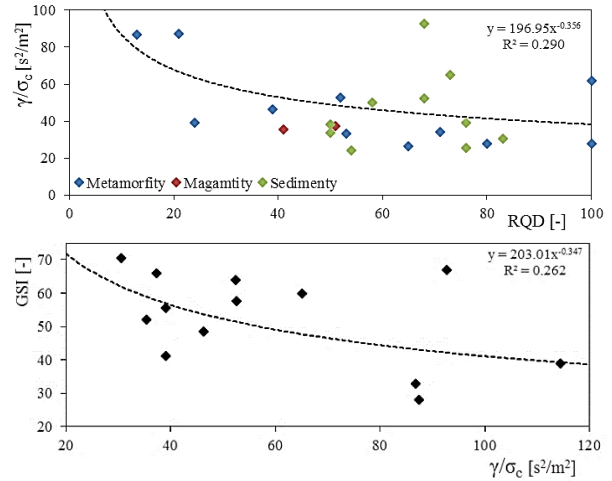
Pokud došlo k odklonu od lineární části křivky před mezí kluzu svorníku nebo mezí pevnosti závitu, mobilizovalo se právě v daném bodě plášťové tření porušením soudržnosti na pomezí zálivky/svorníku nebo zálivky/stěny vrtu. Tento jev byl vždy po provedení zkoušky vizuálně ověřen. Je vhodné dodat, že v mnoha případech byla mez kluzu i mez vrcholové pevnosti prvků překračována oproti údajům výrobce. Tyto výsledky a také zkoušky s porušením na rozhraní svorník/zálivka nebyly dále hodnoceny (viz kap. 3.1).

Vybrané zatěžovací křivky byly proloženy polynomem vyššího řádu a pomocí tečny (derivace) hledán bod „odlepení“ od lineární části křivky. Často bylo možné použít bilineární průběh s průsečíkem v bodě, kde došlo k hledanému poklesu sil.

Pro aplikaci vlivu diskontinuit a základních fyzikálně-mechanických vlastností vybraných hornin na dosažené plášťové tření byly nalezeny dvě relativně silné závislosti (Obr.27) parametrů RQD [%] a GSI [-]. Data byla rozdělena do tří skupin a to podle typu a technologie provedení kotevního tmelu/svorníku. Linearizací a letným návrhem analytického řešení délky upnutí s celkem 5 koeficienty bylo pomocí metody nejmenšího spádu zjištěno, že 3 z 5 koeficientů se nemění a 2 koeficienty se iteračním procesem téměř ztotožňují se střední hodnotou objemové hmotnosti  $\rho_{mean}$  [kg.m<sup>-3</sup>] a pevnosti UCS<sub>mean</sub> [MPa] v testovaném souboru dat.



Obr.26 Př. zatěžovacích křivek s typem svorníku a délkou upnutí, indexu RQD a GSI

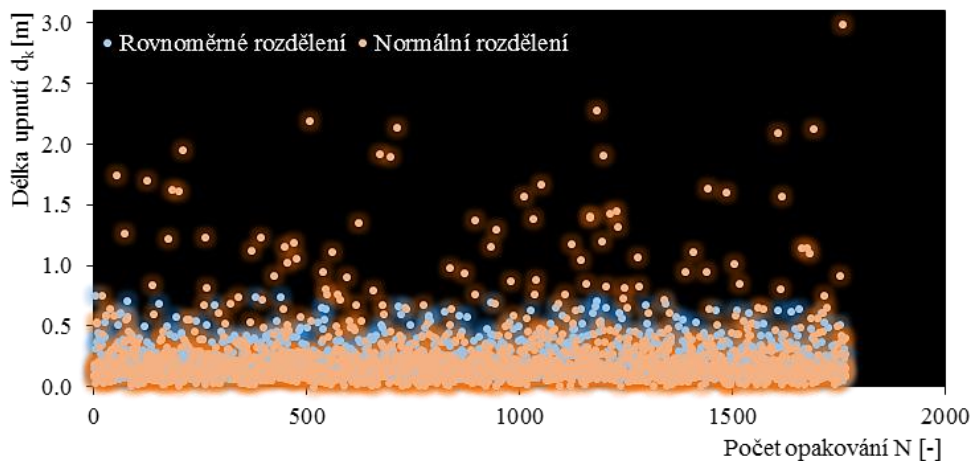


Obr.27 Závislost obj. hmot./pevnosti na (R/RI-plná/dutá sklolamimát. tyč, C/I-plná/dutá ocel. tyč)

Zůstaly tak 4 konstanty (z nich jedna se rovná nule) a jeden koeficient, zohledňující změnu kotevního tmelu a příslušného typu svorníku. Jako konvergenční podmínka byla zvolena minimální hodnota reziduí (suma kvadrátů odchylek) dosažených a vypočtených velikostí plášťových tření. Přesnost dosahovala nejhůře absolutní hodnoty rozdílu 0,03 MPa. Délka upnutí pak byla modelována pomocí metody Monte Carlo pro náhodné proměnné (dvě různá rozdělení) při dané kotevní síle. Jako dostatečně reprezentativní bylo zvoleno min. 1500 opakování (Obr.28).

$$\tau_b = UCS_{mean} \frac{F_b - 4.5d_b}{d_b(k_4 \sqrt[3]{GSI} - \rho_{mean} \sqrt{RQD_w})} \quad (1)$$

kde  $UCS_{mean}$  pro je pro zjednodušení dosazena v kPa. Hodnota součinitele  $k_4$  činí po zaokrouhlení  $17 \cdot 10^5$  pro cementovou zálivku,  $23 \cdot 10^5$  pro nízkotlakou cementovou injektáž a  $13 \cdot 10^5$  pro chemickou ampuli.



Obr.28 Simulace možné délky upnutí generováním náhodných proměnných, zde prokotevní sílu  $F_k = 25$  kN, (stř. hod. rovnoměr. rozd. 0,19 m; norm. rozd. 0,23 m, pro  $2\sigma$ )

## 5. APLIKAČNÍ ČÁST

Výsledky sensitivní analýzy (kap.4) a jejich interpretace směřují zcela záměrně dvěma směry. Prvním je možnost čerpání charakteristických dat z dostupného geotechnického průzkumu (viz kap.1.4) s odhadem nebo přímým stanovením plášťového tření, druhým pak odborný odhad s použitím aproximovaných dat. V prvním (a lepším) případě je tak možné stanovit např. délku upnutí přímo dosazením typické hodnoty plášťového tření z tabulek nebo podrobného průzkumu – pak dostaneme hodnotu pro danou kotevní sílu. Velikost této síly musí být  $F_b < F_{ed} < F_{yd}$ , kde  $F_{ed}$  je návrhová kotevní síla (s příslušným stupněm bezpečnosti) a  $F_{yd}$  je mez kluzu tyče nebo pevnost závitu kompozitní tyče.

V rámci odstranění propadu rychlosti trati č. 036 Liberec – Tanvald byla sanována řada skalních zářezů včetně příportálových oblastí (Obr.29). Jednou z nich je jablonecký portál prosečského tunelu v km 10,215-10,250. Ten byl vybrán jako první aplikační lokalita. Pro obě strany předzářezu byl statickým posudkem určen silový účinek, přenášený kotevními prvky ocelových sítí. Konzervativně byla pro obě strany zvolena vyšší z obou výpočtových hodnot a to  $F_{ed} = 1.35F_b = 136$  kN. Jako kotevní prvek byla zvolena celozávitová tyč CKT 20 (ocel ST 500 S,  $F_{yd} = 160$  kN), upínaná ve vrtu  $\varnothing 36$  mm cementovou zálivkou do zvětralé liberecké žuly.



Obr.29 Železniční trať č.036, jablonecký portál prosečského tunelu v km 10,215 (archiv autora)

Druhou aplikační lokalitou byl obchvat Moravské Třebové – podrobný geotechnický průzkum (Obr.30). Cílem podrobného průzkumu bylo získání a podání potřebných informací o geotechnických vlastnostech skalního výchozu a jeho pokryvu pro potřeby následující etapy prací tj. přípravy projektové dokumentace na stabilizaci skalní stěny. Dále je v DP uvedeno stručné resumé výsledků, zjištěných autorem této DP. K běžným postupům je přidruženo právě stanovení rámcových hodnot plášťového tření s dílčími závěry autora DP.



Obr.30 Silnice I/35 - stěna zářezu obchvatu Moravské Třebové (archiv autora)

Třetí aplikační lokalitou byla PVE Dlouhé Stráně. V letech 2002 až 2016 docházelo k nárůstu kolmatace vtokových česlí sduženého objektu dolní nádrže (Obr.31). Po sérii potápěčských průzkumů byla po konzultaci s geotechnikem shledána urgentní potřeba stabilizovat původní lomové stěny. Ty byly během výstavby opatřeny stříkaným betonem (SB), dvěma řadami KARI sítí a tyčovými kotvami. Pravá strana byla zajištěna předpjatými kotvami a dvěma inklinometry, soudě podle dochovaných zbytků. Od uvedení do provozu až do roku 2018 nebyla nádrž vypuštěna a proto se rozsah porušení odhadoval jen z provedených ponorů.

V roce 2018 bylo rozhodnuto po předchozí projektové přípravě o plánovaném vypuštění dolní nádrže. Jelikož nebylo možné do té doby provést adekvátní geotechnický průzkum, došlo k dohodě s investorem ohledně zpracování realizační dokumentace s průběžnou „ad hoc“ aktualizací podle zastižených geotechnických podmínek. Jednalo se především o průběžnou úpravu (optimalizaci) kotvení, které činilo značnou část finančního objemu.

Zhotovitel realizoval v předstihu vrtané sondy, které vyprofilovaly kvalitu zastižených hornin napříč stěnami. Zde se uplatnily poznatky, získané autorem při optimalizaci kotevních prvků.



Obr.31 PVE DS, práce probíhaly kontinuálně i během zatápění, patrné opevnění břehového pásma (archiv autora)

## POUŽITÁ LITERATURA

- 1) BERGER, F.; DORREN L.K.A Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. – Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. Vol. 158, p.p. 157-165. Illnau. 2007.
- 2) BARTON, N.R.; BAR, N. Empirical slope design for hard and soft rocks using Q-slope. ARMA 16-384. Texas. 2016. 8 p.
- 3) DORREN, L. K. A Review of rockfall mechanics and modeling approaches. Progres in Physical Geography. Vol. 27-1, p.p. 69-87. 2003.
- 4) HILLAR, M.; PRUŠKA, J. Využití statistiky pro numerické modelování podzemních staveb. Konf. geotechnické problémy líniových stavieb.
- 5) BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications. – John Wiley & Sons. New York. 1989.
- 6) HOBST, L.; ZAJÍC, J. Kotvení do hornin. SNTL Alfa. Praha. 1972. 359 p.
- 7) HOEK, E. et al.. Quantification of the Geological Strenght Index Chart. 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco. ARMA 2013. 9 p.
- 8) HOEK, E. Practical Rock Engineering. MS. Toronto. 2006. 341 p.
- 9) HOLÝ, O. Evaluation of many load tests of passive rock bolts in the Czech Republic. Geoscience Engineering. Vol 63, No 1. 2017. p. 1 -7. ISSN 1802-5420.
- 10) HORÁK, V. Experiment v mechanice hornin a jeho realizace. Habilitační práce. VUT v Brně. 2000. 177 p.
- 11) HORÁK, V. Prognóza mechanického chování hornin a její využití v geomechanice. 1992. Kandidátská disertační práce. FAST VUT v Brně.
- 12) ISRM Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. – International Joutnal of Rock Mechanics. Vol. 15, p.p. 319-368. Oxford. 1977.
- 13) KOL. autorů. Rockfall: Design considerations for passive protections structures. Wellington. 2016. ISBN 978-0-947497-61-3. 96 p.
- 14) LEPINE, C.T. Rock bolts - Improved design and possibilities. Diploma thesis. NTNU Trondheim. 2012. 105 p.
- 15) LI, C.; STILLBORG, B. Analytical model for rock bolts. Inter. Jour. Of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1999. Vol 36, p. 1013 - 1027.
- 16) MALGOT, J.; KLEPSATEL, F.; TRÁVNÍČEK, I. Mechanika hornín a inžinierska geológia. Alfa Bratislava. 1992. 282 p.
- 17) NEMČOK, A.; PAŠEK, J.; RYBÁŘ, J. Classification of landslides and other mass movements. Rock mechanics. 1972. Vol 4, issue 2, p.p. 71-78

- 18) NICHOLSON, L. Analysis and interpretation of in situ rock bolt pull tests in hard rock mines. Dissertation. University of Toronto. 2016. 170 p.
- 19) PALMSTRÖM, A. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnels and Underground Space Technology. 2005. Vol 20, p. 362-377.
- 20) PALMSTRÖM, A. The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing. Conference on Recent Advances in Tunneling Technology. New Delphi. 1996. 6 p.
- 21) PAVLÍK, J. Geotechnické způsoby určování stability skalních stěn. SNTL Praha. 1981. 216 p.
- 22) PEILA, D.; RONCO, C. Technical note - Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. European Geoscience Union. 2009. Vol. 9. p. 1291-1298.
- 23) PFEIFER, T.J.; BOWEN, T.D. Computer simulation of rockfalls. – Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Vol. 26-1, p.p. 135-146. Dallas. 1989.
- 24) PRUŠKA J. Geomechanika - mechanika hornin. ČVUT Praha. 2002. 180 p.
- 25) RITCHIE, A. M. Evaluation of rockfall and its control. – Highway Research Record. Vol. 17, p.p. 13-28. Washington. 1963.
- 26) TERZAGHI, K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. 1925. Vienna, Deuticke. 399 pp.
- 27) TERZAGHI, K. Rock defects and loads on tunnel supports". In Proctor, R.V.; White, T. Rock Tunnelling with Steel Supports. 17-99. 1946. Youngstown.
- 28) TOMÁS, R. et al. Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 44, p.p. 1062-1069.
- 29) VOLKWEIN, A. et al.. Rockfall characterisation and structural protection - a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. European Geoscience Union. 2011. Vol. 11. p. 2617-2651.
- 30) WIDMANN, R. Anchors in Theory and Practise. Proceedings of the International symposium. Salzburg. 1995. ISBN 90-5410-577-1. 459 p.
- 40) WYLLIE, D.C.; MAH, CH.W. Rock Slope Engineering – 4th ed. New York. 2014. ISBN 0-203-57083-9. 456 p.
- 41) ZAVACKÝ, M. et al.. Statistical Estimate of Uniaxial Compressive Strength of Rock Based on Shore Hardness. Symposium of ISRM. Elsevier Procedia Engineering Vol. 191 (2017) p.p. 248-255.

- 42) ZÁRUBA, Q.; MENCL, V. Inženýrská geologie. Akademia Praha. 1974. 512 p.
- 43) ZÁRUBA, Q.; MENCL, V. Sesuvy a zabezpečování svahů. ČSAV Praha. 1969. 220 p.
- 44) ZÁRUBA-PFEFFERMANN, Q. O stabilitě svahů nad povltavskou silnicí u Štěchovic a Vraného. Technický obzor 39. 1931. Praha.



## **ING. ONDŘEJ HOLÝ - CV**

### OSOBNÍ DATA:

Narozen 24/1983 v Kladně, Československá Republika, občanství: ČR; stav: ženatý, 4 děti

### VZDĚLÁNÍ:

2007 Mgr., ústav geologických věd, PřF MU v Brně  
2008 Ing., institut důlního měřictví a geodézie HGF VŠB-TU Ostrava  
2010 Ing., ústav geotechniky, FAST VŠB-TU Ostrava  
2015–do současnosti Ph.D., ústav geotechniky, FAST VUT v Brně; distanční studijní program “Konstrukce a dopravní stavby”

### PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI:

2006–2011 FAST VUT v Brně  
2010–2015 SG-Geoprojekt spol. s r.o., projektant-geotechnik  
2015–present Samostatný podnikatel v oboru geotechnika a inženýrská geologie

### PROFESNÍ ČLENSTVÍ A AKTIVITY:

2007 (2 týdny) Geotaco – Geotechnical advanced course, TU Žilina  
2008 (2 týdny) Geotaco – Geotechnical advanced course, VŠB-TU Ostrava  
Člen České speleologické společnosti: 2001–do současnosti  
Člen ČKAIT pod č.0012237: 2014–do současnosti  
Držitel oprávnění pro hornickou činnost a činnost prováděnou hornickým způsobem – báňský projektant č.j. 07704: 2012–do současnosti  
Oprávnění pro práce ve výškách a nad volnou hloubkou e.č. ALP/21/2010: 2010–do současnosti

### OCENĚNÍ:

2010 Cena děkana FAST VŠB-TU Ostrava za diplomovou práci

### VÝZKUMNÉ AKTIVITY:

Hydraulika podzemní vody  
Optimalizace sanačních metod skalních svahů  
Spolupráci na revizi přepisů SŽDC a ŘSD

### ODBORNÁ PRAXE:

2010–do současnosti přes 100 projektů a posudků, spoluřešitel 4 výzkumných projektů MPO

PUBLIKACE:

**Holý O.**, Krásný O. Variation in Behaviour of Retaining Reinforced Wall by Usage of Mohr-Coulomb and von Wolffersdorff Constitutive Material Model of Granular Backfill. Young Scientist 2010. TU Košice. ISBN 978-80-553-0391-8.

Krásný O., **Holý O.** Vinohrady Tunnel in Brno – FEM Modeling of Behavior of Specific Environment for Tunnel Driving. Underground constructions Prague 2010. ITA-AITES. ISBN 978-80254-7054-1.

**Holý O.** Estimation of recovery time and self-flushing outside and inside of the well screen. Geoscience Engineering. 2009. ISSN 1802-5420.

Krásný O., **Holý O.** Tunnel Vinohrady in Brno – Mathematical Modeling of the Specific Subsoil Using the FEM Method. Mladý Vedec. 2009. ISBN 978-80-553-0176-1.

**Holý O.** Importance of geosynthetical reinforcement stiffness and her setting. JUNIORSTAV 2009. ISBN 978-80-214-3810-1

**Holý O.** Reinforced retaining walls – History and principles of designing. Constructions. 2008. ISSN 1213-8762.

**Holý O.**, Miča L. The setting of geosynthetical axial stiffness for numerical modelling - part 1. Stavební konstrukce z pohledu geotechniky. 2008. ISBN 978-80-7204-609-6.

Miča L., **Holý O.** The setting of geosynthetical axial stiffness for numerical modelling - part 2. Stavební konstrukce z pohledu geotechniky. 2008. ISBN 978-80-7204-609-6.

**Holý O.**, Estimation of recovery time and self-flushing outside and inside of the well screen. Geológia a životné prostredie. ŠGÚDŠ a Slovak society of engineering geologists. 2008. Bratislava. ISBN 978-80-89343-06-5.

**Holý O.** Reinforced retaining walls – History and principles of designing. JUNIORSTAV. VUT Brno. 2008. ISBN 978-80-86433-45-5.

**Holý O.**, The influence of borehole screen to ground water sampling. JUNIORSTAV. 2008. VUT Brno. ISBN 978-80-86433-45-5.

**Holý O.**, The influence of borehole screen to ground water sampling. Students geological conference Brno. 2006. ISBN 978-80-7204-609-6.

**Holý, O.**, Klinčůch. M. Sanation of landslide – waste dump Chabařovice. Slope deformations and pseudokarst 2011. VUT & Svahovky, o.s. Brno.

**Holý, O.**, Review of research activity of SG-Geoprojekt comp. Slope deformations and pseudokarst 2013. Svahovky, o.s. Bischofstein.

**Holý, O.**, The results of wide amount loading tests of rock bolts. Seminary of Czech Society of Engineering Geologists 2016. ČVUT Praha.

**Holý O.**, Evaluation of many load tests of passive rock bolts in the Czech Republic. Geoscience Engineering, 2017. ISSN 1802-5420.

**Holý O.**, Results and use of non-linear behavior between length and bond friction of fully grouted rock bolts in selected jointed rock masses. Geoscience Engineering, 2018. ISSN 1802-5420.

## **Abstract**

This presented phd thesis focuses on the problems of instability in the rock walls and slopes, whose manifestation is among othersv rockfall and associated risks. It describes the theoretical aspects of the description of instability and summarizes the construction methods and technologies to eliminate them. On the basis of knowledge gained from specific buildings in the Czech Republic and based on the research project solved by author, submits suggestion to optimimalization of the anchoring elements as a basic part of most remediation methods.