

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stabilizace skalních svahů
Stabilization of the Rock Slopes

Student:

Barbora Vančurová

Vedoucí:

Ing. Martin Stolárik, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Barbora Vančurová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Stabilizace skalních svahů**
Stabilization of the Rock Slopes
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Úvod

Stanovení stability skalních svahů – obecně

Způsoby a konkrétní příklady sanací nestabilních skalních svahů

Praktický příklad stanovení stability skalního svahu (GEO 5) s návrhem zajištění

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. PAVLÍK, J. *Geotechnické způsoby určování stability skalních stěn*, SNTL. 1981, Praha. ISBN 04-418-81
2. WYLLIE, C. D. and MAH, Ch. *Rock Slope Engineering: Fourth Edition*, CRC Press, 2004, London. ISBN 978-0415280006
3. WYLLIE, C. D. *Rock Fall Engineering*, CRC Press, 2014, London. ISBN 978-1482219975
4. SARSBY, R. *Environmental Geotechnics*, Thomas Telford Limited, 2000, London. ISBN 978-0727727527

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Stolárik, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Stolárikovi, Ph.D. za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. Mé díky patří i panu Ing. Romanu Markovi, Ph.D. z firmy Minova Bohemia s.r.o. za ochotné jednání a poskytnutí informací.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou stability skalního svahu. Práce se v první části zabývá teoretickými postupy a metodami výpočtu stability skalních svahů. Následně jsou uvedeny možnosti technického řešení zajištění stability daných svahů. Poslední částí bakalářské práce je pak praktický příklad zajištění skalního svahu, návržení metody a výpočet a posouzení této metody pomocí programového softwaru GEO5 společnosti FINE s.r.o.

Klíčová slova

Stabilita skalního svahu, metody výpočtu stability, metody zajištění

Annotation

Bachelor thesis deals with the stability of the rock slope. The first part of the thesis deals with theoretical procedures and methods of calculating the stability of rock slopes. Possibilities of technical solutions ensuring the stability of the slopes are described subsequently. The last part of the thesis contains a practical example of securing the rock slope, design of method as well as calculation and assessment of this method using the programming software GEO5 FINE Company Ltd.

Key notes

Rock slope stability, methods of calculating the stability, methods of ensuring

Obsah

Seznam použitého značení	1
1. Úvod	2
2. Stanovení stability skalních svahů – obecně.....	4
2.1. Obecné zásady řešení stability skalních svahů	4
2.1.1. Stupeň bezpečnosti	4
2.1.2. Postup při zjišťování stability skalního svahu	4
2.2. Činitele ovlivňující stabilitu skalních svahů.....	5
2.3. Typy porušení stability skalních svahů	7
2.4. Řešení stability skalních svahů jako soustavy tuhých horninových bloků	7
2.4.1. Systém rovnoběžných ploch nespojitosti ze svahu vycházejících.....	8
2.4.2. Stabilita horninových klínů	9
2.4.3. Stabilita svahů se strmě zapadajícími plochami	10
2.4.4. Svahy masívů s nepravidelným systémem odlučných ploch.....	11
2.4.5. Řešení stereometrických úloh v azimutálních sítích pólového zobrazení	11
2.5. Obecné řešení stability skalních svahů	11
2.5.1. Metoda sítí	12
2.5.2. Folberthova rámová metoda	13
2.5.3. Metoda konečných prvků	14
2.6. Vyšetřování stability skalních svahů na fyzikálních modelech	16
2.6.1. Fotoelasticimetrie	16
2.6.2. Modely z ekvivalentních materiálů	16
3. Způsoby a konkrétní příklady sanací nestabilních skalních svahů	17
3.1. Aktivní metody ochrany	18
3.1.1. Kotvení	18
3.1.2. Gabionové konstrukce	22
3.1.3. Podezdívky a plomby	24
3.1.4. Injektáž	25
3.2. Pasivní metody sanace.....	26
3.2.1. Stříkaný beton a torkretové omítky	26
3.2.2. Obkladní zdi	28
3.2.3. Ochranné sítě.....	29
3.2.4. Záchytné konstrukce.....	32
4. Praktický příklad zajištění stability skalního svahu	36
4.1. Identifikační údaje stavby.....	36

4.2. Geotechnické podmínky stavby.....	37
4.3. Stanovení stability skalního svahu v km 21,933	37
4.4. Návrh zajištění stability skalního svahu v km 21,933 v programu GEO5	38
4.5. Skutečné provedení sanace.....	40
5. Závěr	42
6. Seznam použité literatury a podkladů	43
7. Seznam obrázků.....	44
8. Seznam vzorců	44
9. Seznam tabulek	44
10. Seznam příloh	45

Seznam použitého značení

A	Aktivní síla, aktivní složka od výslednice sil
F	Velikost plochy, Airyho funkce, stabilita
F_x	Velikost síly ve směru osy x
F_z	Velikost síly ve směru osy z
G	Vlastní tíha bloku
M	Moment
N	Normálové složky sil
P	Pasivní síla
Q	Deficit pasivních sil
R_s	Únosnost čelního spoje
R_t	Pevnost sítě
S	Tangenciální síla
T	Tření na předurčené smykové ploše
b	Šířka gabionu
c	Soudržnost
c_{ef}	Soudržnost efektivní
h	Výška gabionu
s	Stupeň bezpečnosti
v	Vzdálenost svislých sítí
x, y, z	Kartézské souřadnice
α	Sklon ploch diskontinuity, sklon gabionu
γ	Objemová tíha
γ_{sat}	Objemová tíha saturované zeminy
δ	Třecí úhel kce-zemina
ν	Poissonovo číslo
τ_0	Počáteční smyková pevnost
φ	Úhel tření na plochách diskontinuity, úhel vnitřního tření
φ_{ef}	Úhel vnitřního tření efektivní

1. Úvod

Skalní svahy jsou vystaveny nepříznivým účinkům okolního prostředí (účinkům vody, větru, slunečního záření, vegetace i činnosti člověka). Díky tomu se jejich stav mění a podléhají procesům zvětvávání, což má za následek různé poruchy svahů. Může dojít k pádu kamenů, sesuvu svahu, překlopení bloků či odtržení převisů. To velice ohrožuje bezpečnost v okolí svahu.

Se skalními svahy se nejčastěji setkáváme podél silničních komunikací či železničních tratí. Svahové deformace zde byly, jsou a budou. Patří mezi jedny z hlavních problémů ve stavebnictví.

Stanovení stability skalního svahu je náročný technický problém. Postup při zjišťování stability se skládá z několika bodů, které nejde nikdy vypustit. Prvním bodem je ujasnění úlohy, dále pak volba způsobu řešení, určení vlastností horninového masívu, vytvoření statického schématu, výpočet stability a nakonec posouzení stability, případně navržení vypracování návrhu zajištění stability.

Zajištění stability skalních svahů se provádí jak na umělých (nově i dříve vzniklých) tak i na přírodních svazích.

Skalní svahy je potřeba pravidelně sledovat a kontrolovat, aby se co nejvíce zabránilo riziku, že dojde k sesuvu svahu či pádu horninových úlomků.

Dále je nutná běžná údržba, během níž se většinou provede i revizní prohlídka skály. Hlavní činností běžné údržby skalních svahů je vyřezávání náletových dřevin a očištění skalních svahů od zvětralých a uvolněných horninových úlomků a volných částí skal, které jdou při běžné údržbě odstranit. Uvolněné skalní bloky, které se nemohou odstranit ručně, se musí při revizní prohlídce označit a následně navrhnout účinné sanační opatření nebo odstranění skalních bloků jiným způsobem.

Účelem zajištění skalních svahů je vyloučení nebo alespoň snížení rizika padání horninových úlomků a skalního sesuvu do okolí daného svahu.

Metody ochrany skalních svahů lze obecně rozdělit na dvě skupiny dle míry jejich spolupůsobení s horninovým masívem. A to na aktivní a pasivní ochranné metody. U některých technologií se ale tyto dvě skupiny překrývají a musí se posoudit individuálně, zda se jedná o metodu aktivní či pasivní.

Aby byl zajištěn dále bezpečný stav svahu, je potřeba zajistit sledování a údržbu již vybudované ochrany, popřípadě její vylepšení. Pravidelnou údržbou a opravami poškozených sanačních prvků se zajišťuje jejich funkčnost, stálá účinnost a zachovává jejich životnost.

Cílem bakalářské práce bylo popsat problematiku stability skalních svahů, zejména představit několik metod stanovení stability skalních svahů a způsoby zajištění svahů nestabilních.

Úvodní část práce se zabývá stanovením stability skalních svahů. Jsou zde uvedeny činitele ovlivňující stabilitu svahů, typy porušení svahů, postup při zjišťování stability svahů, ale zejména tu jsou uvedeny metody stanovení stability svahů.

Další část práce popisuje metody zajištění nestabilních skalních svahů, a to metody aktivní i pasivní.

Poslední část se pak zabývá praktickým příkladem návrhu zajištění skalního svahu pomocí programu GEO 5. Jedná se o konkrétní příklad skalního svahu v lokalitě Budčice II v km 21,933 v úseku Vlastějovice - Ledec nad Sázavou.

2. Stanovení stability skalních svahů – obecně

2.1. Obecné zásady řešení stability skalních svahů

Skalní svah je plocha ukloněná pod úhlem menší než 60 stupňů, omezující skalní těleso od okolního prostředí mající jinou fyzikální podstatu než hmota skalního tělesa.

Skalních svahy rozdělujeme na přirozené a umělé svahy. Přirozené skalní svahy vznikají odebráním části horninového tělesa přírodními činiteli, umělé svahy pak lidskou činností.

2.1.1. Stupeň bezpečnosti

Míru stability tělesa uvádí stupeň bezpečnosti proti pohybu při porušení, jehož druh a směr je třeba vždy určit. Při destrukci horninového tělesa nastává určitý pohyb jeho části, který je kombinací dvou základních typu pohybů: pohybu translačního, kdy všechny hmotné body pohybující se částí tělesa mají v určitém časovém okamžiku stejnou rychlost, a pohybu rotačního, při němž rychlost jednotlivých bodů se úměrně zvyšuje se vzdáleností od určitého bodu s nulovou rychlostí, tzv. okamžitého středu otáčení.

Stupeň bezpečnosti proti posunutí je dán poměrem hodnot všech sil pasivních $\sum P$ (sil vzdorujících pohybu) k součtu hodnot sil aktivních $\sum A$ (sil vyvolávajících pohyb) působících na smykové ploše:

$$s = \frac{\sum P}{\sum A} = \frac{\text{pasivní síly}}{\text{aktivní síly}} \quad (1)$$

kde: pasivní síly = tření a soudržnost na smykové ploše (maximální smyková pevnost)

aktivní síly = tangenciální síly na smykové ploše (působící smyková síla)

Obecně lze určit svah stabilním, pokud stupeň bezpečnosti $s > 1$. Pokud ale $s < 1$, jedná se o nestabilní svah.

Volba stupně bezpečnosti závisí na výšce a životnosti řešeného svahu. Pro svahy dočasné (provizorní) se stupeň bezpečnosti volí $s = 1,1 \div 1,25$. Pro trvalé (definitivní) svahy se stupeň bezpečnosti zvyšuje na hodnoty $s = 1,2 \div 1,5$.

2.1.2. Postup při zjišťování stability skalního svahu

Postup při zjišťování stability skalních svahů zahrnuje několik bodů. Na počátku práce na zadaném úkolu je třeba si jej řádně ujasnit a vytknout si cíl, popřípadě úlohu rozdělit do několika dílčích etap. Druhým bodem je volba způsobu řešení, která je ovlivněna výškou svahu, charakteru hornin a předběžným geotechnickým průzkumem. Dalším bodem je určení

vlastností horninového masívu z podrobného geotechnického průzkumu. Čtvrtým bodem je vytvoření statického schématu, které představuje zjednodušení geometrických rozměrů skalního tělesa, tektonických poměrů (vybrání hlavních ploch nespojitosti), vymezení zón stejných fyzikálních a mechanických vlastností horniny. Pátý bod pak zahrnuje výpočet stability. Výpočet se provádí s takovou přesností, jakou mají podklady získané geotechnickým průzkumem. Posledním bodem je posouzení stability, případné vypracování návrhu opatření na její zvýšení (snížení sklonu, kotvení, opěrné stěny).

2.2. Činitele ovlivňující stabilitu skalních svahů

Pevnost horninového masívu je v podstatě hlavní pasivní síla proti pohybu skalního tělesa. Závisí na typu horniny a jejím stavu (četnost, charakter a orientace ploch nespojitosti prostupujících horninový masív, jejich výplně, navětrání apod.). Porušení hmoty tělesa nastává buď oddálením jednotlivých částí stýkajících se v ploše diskontinuity (tahem), nebo jejich vzájemným posunutím při zachování kontaktu v této ploše (smykem). Porušení smykem je v přírodě častější. Podstatou smykového odporu hmoty je tření na těchto plochách. Jeho velikost obecně závisí na napjatosti tělesa. Tato závislost je odlišná pro různé druhy dělicích spár. Pevnost horninového masívu je třeba rozlišit na tření na plochách s hrubými nerovnostmi, tření na hladkých plochách a na pevnost celistvých hornin. Mezi vlivy ovlivňující pevnost řadíme anizotropii horninového masívu, čas, rozevření a výplň ploch diskontinuit.

Vlastní tíha horninového masívu se obvykle skládá ze složky aktivní (tangenciální) a pasivní (normálové). Čistě aktivní či pasivní působení vlastní tíhy bývá výjimečné. Jako síla aktivní bez pasivního účinku působí vlastní tíha při porušení odtržením, jako čistě pasivní působí při vodorovných ložných spárách. Velikost vlastní tíhy působící při destrukci svahu vyplývá z geometrie svahu, z polohy odlučné (smykové) plochy při porušení a z objemové hmotnosti horninového masívu.

Působení vody je velmi komplikované. Projevuje se například snížením pevnosti horniny, zvýšením objemové hmotnosti horniny, zmenšením smykového odporu na styčných spárách, bobtnáním či smršťováním horniny. Mezi významné činitele, ovlivňující stabilitu skalního svahu řadíme především hydrostatický tlak, dále pak proudění vody ve spárách a účinek ledu ve spárách. Obecně lze říci, že nejčastěji dochází k poruchám skalních svahů následkem tání nebo po mimořádných srážkách.

Účinky teplotních změn. Změny teploty během dne způsobují objemové změny horninových bloků na povrchu masívu. Důsledkem teplotních změn je pak postupné rozevírání spár, které umožňuje přístup dalším nepříznivým činitelům. Často ale dochází i k vytváření nových puklin.

Účinky zvětrávání lze výpočtem zjistit jen velmi obtížně. Náchylnost ke zvětrávání závisí na mineralogickém složení, povaze a rozsahu ploch nespojitosti ve vlastní hornině, jako jsou póry či mikrotrhliny. Při výpočtu je možné odhadnout budoucí hloubku navětrání za lícem svahu a v této zóně počítat se zhoršenými geotechnickými vlastnostmi, případně zvýšit požadovaný stupeň bezpečnosti při posuzování trvalého svahu.

Seizmické účinky jsou v našich podmínkách způsobené převážně trhacími pracemi v blízkosti svahu nebo vibracemi od dopravy. Do výpočtu se zpravidla zavádějí jako přidavné seizmické zatížení, častěji však jako statické přetížení. Velikost tohoto zatížení se obvykle stanovuje měřením při pokusných odstřelech.

Vliv geometrie svahu. V příčném řezu je geometrie svahu dána jeho sklonem, čím je sklon menší, tím je příznivější. V půdorysu je v důsledku klenbového efektu nejstabilnější konkávní (vypuklý) svah a nejméně výhodný konvexní (vydutý).

Vliv reziduální napjatosti. Napjatost masívu má velký vliv na tvar smykové plochy. Nejnepříznivější příklad pak představují úzké hluboké zářezy vyhloubené v místě s vysokým reziduálním tlakem. V takto namáhaných masívech rozlišujeme tři typy poruch, a to hranové a patní poruchy, případně dochází ke zvedání dna zářezu.

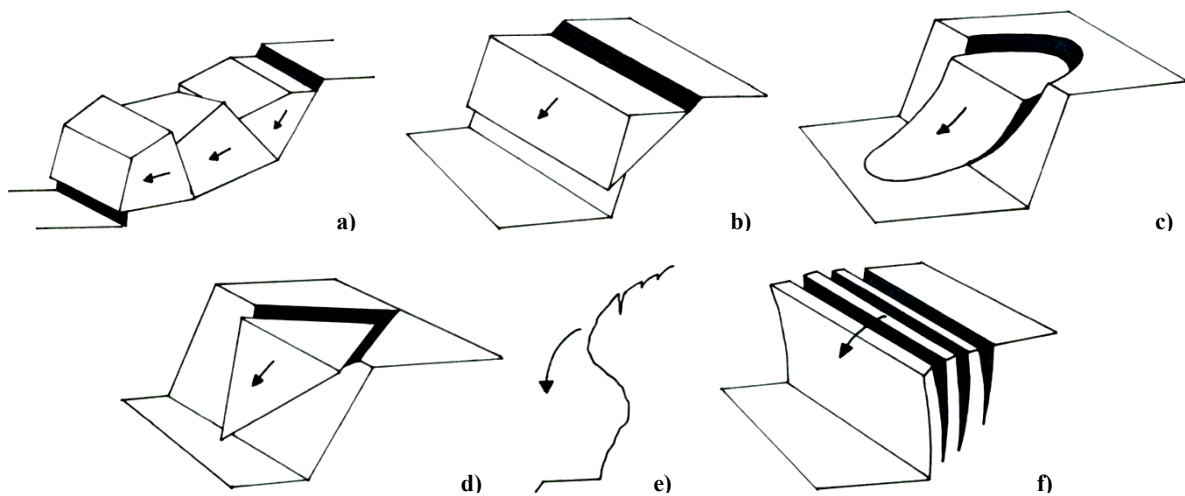
Vliv času. Většina zde uvedených činitelů závisí na době jejich působení, proto je potřeba vždy uvážit životnost svahu. Časový činitel se do výpočtu stability svahu zavádí jednak určitou hodnotou stupně bezpečnosti, danou délkou trvání svahu, ale i uvažováním různého počtu činitelů.

Klínový účinek sousedních bloků. Jestliže díky prostorovému rozmístění ploch nespojitosti dochází ke vzniku horninových klínů, vyvozují pak aktivní zatížení horninových bloků. Tyto klíny mohou pouze svou vlastní tíhou zapříčinit značné odklonění výslednice zatížení vedlejšího horninového bloku, a sice nepříznivým směrem k líci svahu. Klínový účinek je tím větší, čím je větší tíha daného vytlačujícího bloku, čím je ostřejší úhel sevření jeho klínu a čím je nižší tření na plochách.

2.3. Typy porušení stability skalních svahů

V In-situ jsou zaznamenány následující typy porušení skalních svahů:

- porušení smykem po polygonální smykové ploše
- porušení smykem po rovinné smykové ploše
- porušení smykem po kruhové smykové ploše
- porušení sesunutím horninového klínu
- porušení odtržením převisu
- porušení překlopením bloků



Obr. 1 Porušení skalního svahu: a) porušení smykem po polygonální smykové ploše, b) porušení smykem po rovinné smykové ploše, c) porušení smykem po kruhové smykové ploše, d) porušení sesunutím horninového klínu, e) porušení odtržením převisu, f) porušení překlopením bloků

2.4. Řešení stability skalních svahů jako soustavy tuhých horninových bloků

Tyto metody řešení stability skalních svahů předpokládají, že masív se může deformovat jen v určitých plochách po překročení určitého mezního zatížení. Plochy, v nichž dochází k porušení, jsou obvykle dány plochami nespojitosti, které oddělují jednotlivé horninové bloky.

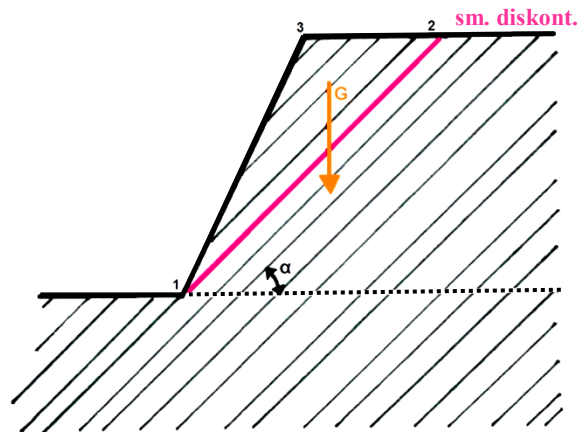
Tento předpoklad ale platí jen v oboru nižších napětí, kdy skutečné deformace vlastní horniny uvnitř horninových bloků jsou zanedbatelné proti významu dělicích ploch.

Řešení je možné použít pro nízké svahy nebo vysoké vytvořené v horninových masívech s vysokým modulem přetvárnosti vlastní horniny (nad 10 000 MPa), eventuelně i pro horniny s nižším modulem, pokud jsou horninové bloky odděleny od sebe rozevřenými spárami.

2.4.1. Systém rovnoběžných ploch nespojitosti ze svahu vycházejících

Masív s hlavními odlučnými plochami sklánějícími se k lici svahu se většinou může porušit, pouze posunem jeho části po rovnoběžných plochách. K překlopení dochází jen zřídka, a to při větších úklonech směru výslednice zatížení, jestliže smykový odpor ve spárách je větší než tangenciální složka výslednice nebo pokud jsou ve svahu převisy.

Řešení rovnoběžných ploch diskontinuity vycházejících ze svahu je pak následující:



Obr. 2 Řešení rovnoběžných ploch diskontinuity vycházejících ze svahu

$$\text{Vlastní tíha bloku: } G = \gamma \cdot S \quad (2)$$

Tangenciální síla aktivně porušující klín podél předurčené plochy:

$$S = G \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \quad (3)$$

Tření na předurčené smykové ploše (pasivní síla):

$$T = G \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

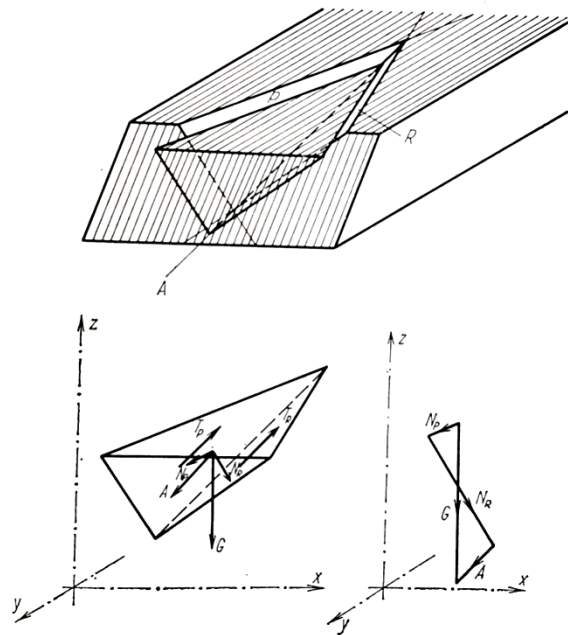
$$\text{Případný deficit pasivních sil, pak vyplývá z výpočtu sil na smykové ploše: } Q = (S - T) \quad (5)$$

- Kde: γ objemová tíha horniny
 α sklon ploch diskontinuity
 φ úhel tření na plochách diskontinuity
 Q deficit pasivních sil

2.4.2. Stabilita horninových klínů

Stabilita horninových klínů se řeší tehdy, pokud plochy nespojitosti tvoří úžlabí s průsečnicí sklánějící se do výlomu, přičemž spádnice obou ploch musí směřovat k průsečnici. Stabilita horninového klínu proti jeho posunutí se řeší poměrem sil pasivního tření a aktivní složky tíhy působící ve směru průsečnice.

Jestliže se smykový odpor vyjádří na plochách obvyklým lineárním způsobem, je možné stabilitu vyčíslit vztahem:



Obr. 3 Pohyb horninového klínu a jeho silové působení, [2]

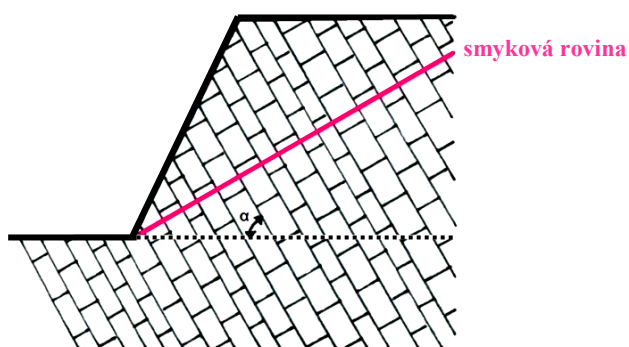
$$F = \frac{\tau_{0P}F_P + N_P \tan \varphi_P + \tau_{0R}F_R + N_R \tan \varphi_R}{A} \quad (6)$$

- Kde: τ_{0P} , τ_{0R} počáteční smyková pevnost na plochách P a R
 F_P , F_R velikost ploch P a R
 N_P , N_R normálové složky výslednice sil G (= vlastní tíha bloku + další zatížení)
 φ_P , φ_R tření na plochách P a R
 A aktivní složka od výslednice sil G, působící posun bloku

2.4.3. Stabilita svahů se strmě zapadajícími plochami

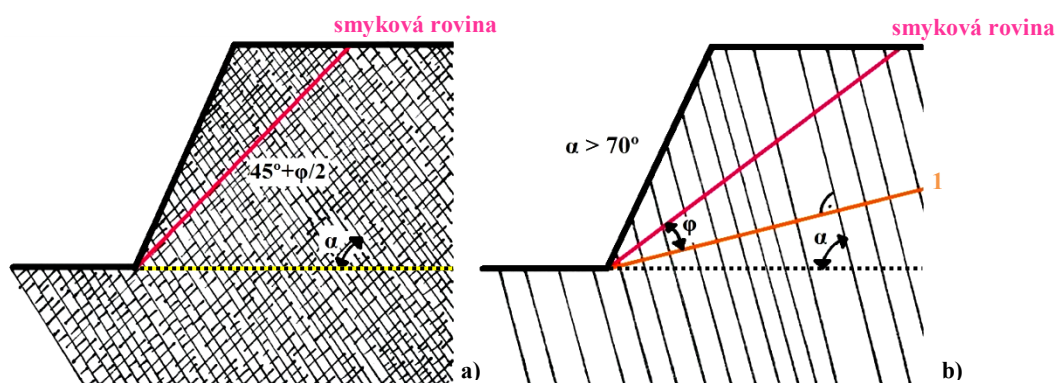
V horninovém tělese se strmě zapadajícími plochami, nevzniká smyková plocha, na níž se vyčerpá smyková pevnost horniny. Dojde ale k porušení masívu překročením normálních pevností, a to zejména pevnosti v tahu, ale i v tlaku.

Díky tomu dochází k překlopení části horninového tělesa. Stejným způsobem se poruší i skalní svahy vytvořené v masívu prostoupeném strmými plochami, jež se sklánějí k patě svahu při působení vodorovné složky zatížení.



Obr. 4 Určení nebezpečné smykové plochy při diskontinuitách zapadajících do masívu

Pro řešení je nejdříve potřeba určit nebezpečné smykové plochy. Jestliže je v masívu vedle průběžného systému ploch nespojitosti i systém příčných ploch neprůběžných, je nejnebezpečnější smyková plocha obvykle s ním rovnoběžná a prochází patou svahu (obr. 4).



Obr. 5 a) Smyková plocha při prostoupení masívu více systémy ploch nespojitosti, b) Smyková plocha při velmi strmě zapadajících plochách nespojitosti, l- normála e směru ploch diskontinuity

Pokud je masív prostoupen více systémy ploch nespojitosti a bločky horniny omezené těmito plochami diskontinuity jsou při porovnávání s objemem masívu relativně malé, je vhodné sklon smykové plochy stanovit odvozením z klínu aktivního horninového tlaku (při odklonu od horizontály o úhel $(45^\circ + \varphi/2)$ – obr. 5a)).

Při velmi strmě zapadajících plochách diskontinuity ($\alpha > 70^\circ$) se obvykle uvažuje smyková plocha jako tzv. teoretická rovina přirozeného sklonu (obr. 5b).

Určení nebezpečné smykové plochy je ale u skalních hornin prakticky ve všech případech obtížné až velmi obtížné. Je proto v takových případech vždy nezbytná úzká spolupráce inženýrského geologa a projektanta – statika.

2.4.4. Svahy masívů s nepravidelným systémem odlučných ploch

Řešení stability svahů masívů s nepravidelným systémem odlučných ploch, je poměrně výjimečné. Většinou lze takový svah rozdělit podélně na několik dílčích částí, v nichž je možno nalézt určitý převažující systém ploch odlučnosti, umožňující výběr některé z předchozích uvedených metod stanovení stability svahu.

Pokud ani v dílčích částech se nenalezne žádný systém, který by umožňoval užití předchozích metod, musíme použít obecné řešení (kap. 2.5), které je ale pro svahy menších výšek neekonomické. [2]

2.4.5. Řešení stereometrických úloh v azimutálních sítích pólového zobrazení

Vzhledem k často obtížnému řešení (zejména při zavádění směrů a sklonů ploch diskontinuity do výpočtu) se používá pro posouzení stability skalních svahů řada metod využívajících prostorové orientace ploch nespojitosti ověřených přímým měřením v terénu a jejich zobrazení v tektonogramech a sítích. Jedná se o tzv. stereografické metody.

Podstatou řešení pomocí stereografických metod je transformace prostorových úloh na rovinné, k čemuž slouží promítání orientace rovin a přímků znázorněných různým způsobem na kouli do rovinných obrazců – diagramů.

2.5. Obecné řešení stability skalních svahů

Obecný způsob řešení stability skalních svahů vychází z určení napjatosti skalního tělesa. Řešení stability na základě stanovení napjatosti je nutné u svahů větších výšek. Za minimální mezní výšku, při které je vhodné použít tento způsob, považujeme 20 m, nad 80 m se pak obecný způsob řešení použije vždy.

Napjatost skalního tělesa můžeme určit přímým měřením nebo výpočtem zahrnujícím všechny možné vlivy.

Měření napjatosti představuje stále jeden z nejtěžších úkolů mechaniky hornin. V současné době je v podstatě nemožné zjistit napjatost celé řešené části tělesa pouze měřením. Jestliže se vůbec povede zjistit napjatost alespoň v některém místě tělesa, použije se pro kontrolu výpočtu, zda byly správně voleny okrajové podmínky. Pokud nesouhlasí, je zapotřebí nového výpočtu se změněnými vstupními údaji.

Výpočet napětí v tělese je také velmi složitý, většinou je třeba využít samočinného počítače. Kvůli obecnosti tvaru skalních těles, nejsme schopni docílit přesného analytického řešení. Musíme tedy využít metod přibližných, řešících stav napjatosti v určitých bodech z rovnic rovnováhy a spojitosti se sousedními body, což ale vede k řešení soustav mnoha rovnic. [2]

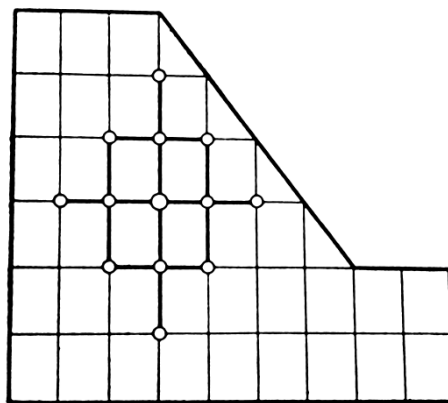
2.5.1. Metoda sítí

Metoda sítí je nejstarší, ale také nejméně vhodný způsob řešení, užívaná pro řešení nosných svahů. Tato metoda řeší v uzlech sítě hodnoty Airyho funkce, z nichž je možno přímo určit normální a smyková napětí. Rovnice kompatibility rovinného přetvoření, odvozená z teorie pružnosti, psaná v Airyho funkci má tvar:

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (7)$$

Diferenční náhradou této rovnice, kterou je třeba psát pro každý prvek uvnitř tělesa, je třináctičlenný operátor, který váže k danému prvku jak body vedlejší, tak i body dvojnásobně vzdálené.

Soustava rovnic je sice lineární, ale je dost složitá a její řešení bez pomoci počítače je v podstatě nemožné.



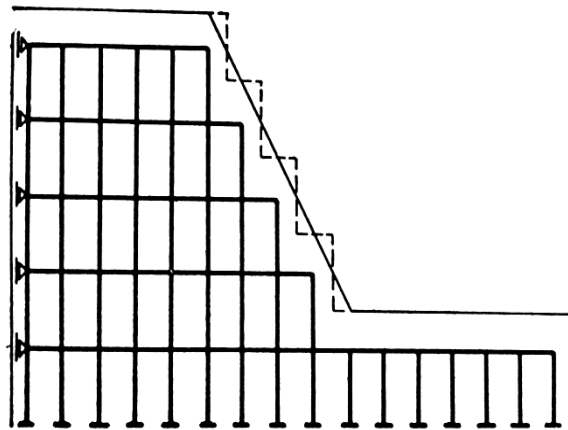
Obr. 6 Řešení napjatosti metodou sítí, [2]

Do rovnice (7) je zatížení možné vnášet pouze okrajovými podmínkami, a sice vztahy pro normální a smykové napětí. Účinek vlastní tíhy se musí zavést superpozicí dvou zatěžovacích stavů.

Metoda sítí je použitelná pro řešení napjatosti masívu, řídicího se podle zákonů teorie pružnosti. Jelikož pro zavedení vlastní tíhy je třeba užít uvedený postup, musí být povrch horninového tělesa vodorovný. Vliv šikmého svahu daného tělesa se musí řešit odebráním části masívu. Další podmínkou pro užití této metody je, aby masív byl homogenní a izotropní, takže její užití je celkem omezené. [2]

2.5.2. Folberthova rámová metoda

Folberthova rámová metoda spočívá v nahrazení skalního tělesa prostorovým patrovým rámem. Jedná se o jednoduchý způsob řešení napjatosti pro účely stability skalních svahů. Tento způsob řešení je odvozen z nauky o pružnosti, takže je méně teoreticky správný než metoda sítí. Umožňuje však zavádět do výpočtu vliv heterogenity masívu uvažováním různých tuhostí rámových prutů. Pokud je tato metoda zjednodušena na rovinné řešení, je jedinou metodou prakticky realizovatelnou bez použití samočinného počítače.



Obr. 7 Nahrazení skalního tělesa patrovým rámem při řešení napjatosti podle Folbertha, [2]

Poměr délek sloupů a příčlí rámu je dán tangentou sklonu svahu. Příčné rozměry prutů jsou rovny jejich délkám v příslušném směru. Primární momenty se určí z rozdílu stlačení jednotlivých prutů působením normálního zatížení vyvolávajícího ohyb příčných prutů. Napětí ve směrech souřadných os pak můžeme jednoduše vyhodnotit z vypočtených hodnot vnitřních sil, velikosti a směry hlavních napětí pak z Mohrovy kružnice.

Folberthova metoda se používá jen pro přibližné zjištění napjatosti, jelikož výpočet obsahuje chybu vyplývající ze zjednodušení. Nahrazení vícerozměrového tělesa, v němž se vnitřní síly přenášejí všemi směry, prutovou konstrukcí s možností přenášet tyto síly jen ve směrech prutů, tj. ve směru souřadných os. [2]

2.5.3. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků odstraňuje nedostatky obou předchozích metod. Jedná se o metodu pro matematické modelování skutečných vlastností horninových masívů a procesů v nich probíhajících.

Tato metoda v podstatě přenáší řešení kontinua na řešení soustavy prvků s konečným počtem vazeb. Dané těleso se rozdělí na určitý počet prvků různé konečné velikosti. Sousední prvky jsou navzájem spojeny společnými uzlovými body, jejichž posunutí jsou základní neznámé parametry úlohy. Pro definici deformace prvků v závislosti na posunech jeho uzlových bodů se vybere vhodná funkce. Z přetvoření prvků a okrajových deformací lze potom určit napjatost každého prvku, a tím i celého tělesa.

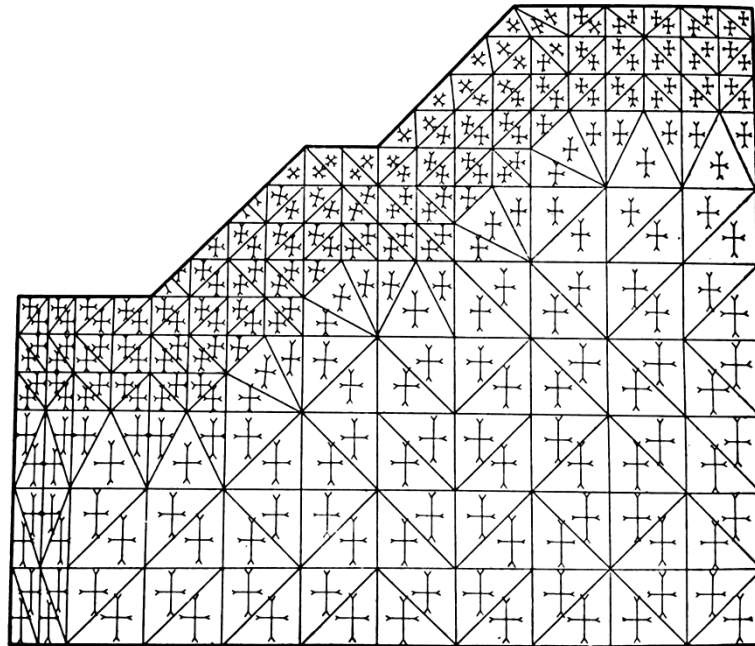
Rozdělení kontinua na jednotlivé samostatně řešitelné prvky umožňuje přiřazovat každému prvku jiné deformační a pevnostní parametry, takže lze dobře respektovat nehomogenitu a anizotropii horninového masívu.

Řešením geotechnických úloh pomocí MKP se u nás zabývá několik pracovišť (např. Fine spol. s r.o. – program GEO5), mající vypracované své programy, které umožňující řešení jak rovinných lineárních úloh podle teorie pružnosti, tak i rovinných nelineárních úloh. V programech se například vyskytují závislosti deformačních vlastností na stavu napjatosti, možnosti uvažování nulové pevnosti v tahu a omezeného přenášení smyků, možnosti zavedení dilatance a kontraktance, možnosti zavedení postupného nárůstu zatížení či vlivu podzemní vody.

Prostorové úlohy lze touto metodou rovněž řešit, avšak pokud je to možné, snažíme se vždy prostorovou úlohu převést na rovinnou, úpravou hodnot modulů přetvárnosti. Každým prvkem vedeme přímkou kolmou k rovině řezu a moduly v těchto prvcích násobíme poměrem délek úseků vyřatých přímkami v tělese v jednotlivých prvcích k maximální délce úseku v tělese.

V každém programu se geometrické a fyzikální podmínky zadávají jiným způsobem. Je tedy potřeba zaměřovat geotechnický průzkum podle požadavků zvoleného programu již v jeho počátečních etapách, aby bylo možno co nejvíce hodnot získat přímým měřením.

Požadované hodnoty geotechnických vlastností se většinou zjišťují polními zatěžovacími a smykovými zkouškami.



Obr. 8 Řešení napjatosti skalního tělesa metodou konečných prvků, [2]

Obr. 8 znázorňuje skalní těleso, nerovnoměrně dělené, v místech kde je předpokládána koncentrace napětí. V blízkosti povrchu je rozčlenění hustší, proto je velikost prvků menší než v nitru masívu. V každém prvku úsečky znázorňují velikost a směr hlavních napětí. Horní vodorovná plocha tělesa byla též rovnoměrně zatížena. Zatížení vyvodilo spolu s vlastní tíhou masívu napjatost, vyznačenou na obrázku úsečkami znázorňujícími velikost a směr hlavních napětí v každém prvku. [2]

2.6. Vyšetřování stability skalních svahů na fyzikálních modelech

Fyzikální modelování je založeno na podobnosti fyzikálních jevů, přičemž zkoumání konkrétního originálu (konstrukce) je nahrazeno zkoumáním fyzikálně podobného systému a dimenzionální analýzy menšího měřítka (lépe realizovatelného).

2.6.1. Fotoelasticimetrie

Jedná se o metodu k vyšetřování napjatostního stavu (na modelech, ale i na povrchu konstrukcí). Fotoelastický model musí být u této metody zhotoven z průhledného, opticky citlivého materiálu (sklo, organické sklo, celuloid, atd.). Takovýto materiál se z optického hlediska chová jako izotropní látka při nulovém zatížení a po přetížení pak jako látka krystalická. Tato takzvaná „vlastnost dočasného dvojlomu paprsků“ je v přímé závislosti na rozdílu hlavních napětí v jednotlivých místech zatíženého modelu.

U zatíženého modelu, prosvěcovaného ve fotoelasticimetrickém přístroji polarizovaným světlem, pozorujeme dva druhy čar. Izokliny a izochromy (interferenční pruhy) dávají při rovinném stavu napjatosti směry a rozdíly hlavních napětí (poněvadž směr optických os dočasných krystalů je totožný se směrem hlavního napětí a konstantní hodnota dvojlomu paprsků vzniká v místech se stejným rozdílem hlavních napětí). Pro stanovení velikosti hlavních napětí, je třeba sestavit ještě izopachy (čáry znázorňující součet hlavních napětí).

Velkou výhodou fotoelasticimetrie je relativní jednoduchost a rychlost získání výsledků. K nevýhodám lze přičíst nutnost opatřit si měřicí zařízení (fotoelasticimetr) a skutečnost, že platnost získaných údajů je omezena na obor teorie pružnosti. [4]

2.6.2. Modely z ekvivalentních materiálů

Modely z ekvivalentních materiálů (realizované jako rovinné i prostorové) vycházejí z principů fyzikální podobnosti a dimenzionální analýzy. Při výrobě musí být zachována geometrická podobnost modelu se skutečností, úměrnost fyzikálních konstant a časová posloupnost modelovaných jevů. Kromě toho musí být po celou dobu modelového měření zachovány okrajové podmínky.

Největší výhodou této metody je možnost realistického napodobení chování horninového masívu při vytváření skalních svahů. Měření na těchto modelech jsou přímá a umožňují vizuální kontrolu probíhajících procesů. Nevýhodou je pak velmi náročná příprava modelů a daná metoda vyžaduje použití speciálních měřicích elementů. Tato metoda se využívá pouze zřídka pro svou náročnost. [4]

3. Způsoby a konkrétní příklady sanací nestabilních skalních svahů

Účelem sanace skalních svahů je vyloučení nebo alespoň minimalizace rizika pádu kamenů, sesuvu svahu, překlopení bloků či odtržení převisů do okolí daného svahu. Provádí se jak na nově vytvořených svazích tak i na dříve vzniklých vyžadujících sanaci.

Při rozsáhlých sanačních opatřeních je potřeba inženýrskogeologický průzkum, na jehož základě se vypracuje projekt sanačních prací, který musí odpovídat závažnosti porušení svahu. Obvykle se používá kombinace několika druhů sanačních opatření.

U uměle vytvořených svahů je třeba myslet na to, že skalní svah obvykle pokračuje i nad uměle vytvořeným svahem. Je tedy nutné věnovat pozornost i výše situovaným polohám a posoudit pravděpodobnost zasažení okolí daného svahu i z těchto míst.

Součástí každého sanačního opatření je odstranění zvětralých a nestabilních částí skalního svahu. A to postupným rozebíráním ať už manuálně, trhacími pracemi, strojně nebo hydraulickými klíny. Je však nezbytné postupovat velice obezřetně, musí se dávat pozor, aby se odstraněním daných částí nezhoršila stabilita okolních skalních celků nebo dokonce celého svahu.

Dále, pokud je svah porostlý dřevinami, je nutné provést jejich vyřezání, aby se skalní svah zpřístupnil pro ostatní práce a hlavně aby dále nerozrušoval horninu.

Způsoby sanace skalních svahů lze obecně rozdělit na dvě skupiny dle míry jejich spolupůsobení s horninovým masívem.

První skupinou jsou aktivní ochranné metody, kde dochází k významnému spolupůsobení vnášených technických prvků s horninovým prostředím. Zajišťují jednak ochranu před dopady zvětrávání, ale i zvyšují stabilitu svahu. Zástupci této skupiny jsou kotvení (použité samostatně, nebo v kombinaci například se sítováním), gabionové konstrukce, podezdívky a plomby nebo injektáž.

Druhou skupinou je skupina pasivních metod, která zajišťuje pouze odstínění vlivu padajících kamenů či balvanů, ale stabilitu vlastních skalních svahů nezvyšují. Jedná se zejména o sítování skalních svahů, záchytné konstrukce, opěrné zdi, stříkané betony či torkretové omítky.

U některých technologiích se ale tyto dvě skupiny překrývají a musí se posoudit individuálně, zda se jedná o metodu aktivní či pasivní.

3.1. Aktivní metody ochrany

3.1.1. Kotvení

Sanace skalního svahu kotvením spočívá v zachycení povrchových rozrušených vrstev skalního masívu soustavou kotev. Síly způsobující pohyb skalních vrstev před předpokládanou smykovou plochou se tak přenášejí do neporušeného stabilního skalního masívu za touto smykovou plochou. Vnesením předpětí do kotvy dojde též ke zvýšení tření na potenciální smykové ploše. Kotvení líce horniny tak přispívá k vyrovnání napjatosti v hornině při povrchu skalního svahu.

Termín kotva se používá pouze pro předpjaté prvky. Ke kotvení se ale používají i prvky nepředpjaté (hřebíky) a proto jsou zde uvedeny taktéž. Nepředpjaté prvky působí proti pohybu kotveného bloku pouze vlastní smykovou pevností.

Z hlediska konstrukce rozdělujeme kotvy na tyčové (laminát, ocel) a lanové (ocel). Délka kotvy závisí na mechanických vlastnostech dané horniny, především pevnosti ve smyku na plochách nespojitosti.

Důležitá je orientace osy kotvy k těmto plochám nespojitosti, jelikož je na ní závislý odpor proti vytržení kotvy. Pro kotvení jsou nejlepší horniny s plochami nespojitosti kolmými na směr osy kotev, nejhorší pak s hojnými odlučnými plochami rovnoběžnými s osou kotev. Směr kotev nepředpjatých se obvykle volí ve sklonu 45° od smykové roviny nebo hlavní diskontinuity masívu. Směr kotev předpjatých se volí ve sklonu kolmém na smykovou rovinu.

Pro lepší účinnost lze kotvení kombinovat s injektáží, čímž dojde ke stmelení jednotlivých horninových bloků. [3]

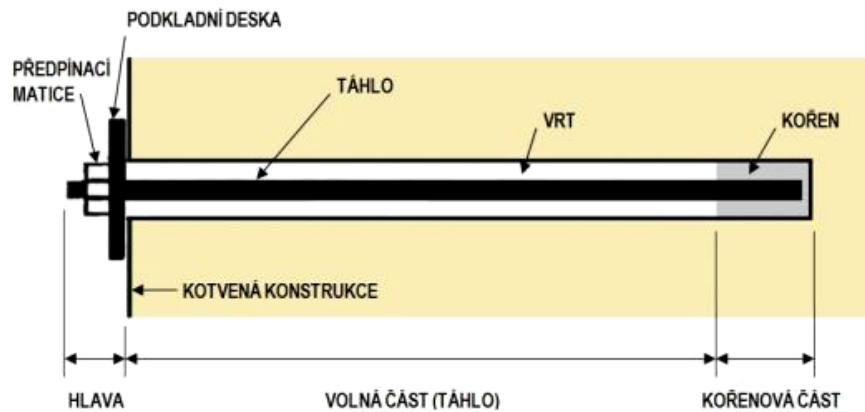


Obr. 9 Kotvení skalního svahu, Budčice I

a) Kotvy

Jedná se o předpjatý kotevní prvek běžně délky větší než 5 metrů. Upnutí kotev je provedeno jen v oblasti kotevní délky.

Obecně je kotva složena ze tří hlavních částí: hlavy, táhla a kořene. Tahová síla, vyvozovaná na hlavě kotvy, se přenáší táhlem do kořene, který je injektáží upnut v horninovém prostředí.



Obr. 10 Schéma a pojmenování částí kotvy

Rozlišujeme kotvící prvky trvalé a dočasné. Trvalé kotvy jsou takové prvky, jejichž životnost přesahuje dva roky. Dočasné kotvy jsou pak takové prvky, jejichž životnost je navržena na dobu kratší dvou let.

Všechny namáhané ocelové součásti kotvy musí být po dobu jejich návrhové životnosti chráněny proti korozi, a to protikorozní ochranou (cementový kámen, potažení plasty, galvanické pokovení, atd.) nebo musí být vyrobeny z nekorodujících materiálů (kompozity a plasty, nerezová ocel, atd.)

Jako materiál pro výrobu kotev se využívají většinou tyče z profilované oceli, drátové kotvy, nebo pramencové kotvy ze dvou a více pramenců ocelových lan. Volná část táhla kotvy, která není zainjektována v cementové zálivce, nebo pryskyřici, je chráněna polyetylenovými trubkami.

Předepnutí kotvy se zhotoví upnutím kořene kotvy do vývrtu a po jeho zatuhnutí se předpíná speciálním lisem. Po dosažení předpínacího tlaku a uklidnění síly se celý zbytek vývrtu zainjektuje buď středovým otvorem kotevní tyče nebo trubičkou připevněnou k táhlu kotvy či vedoucí středem lana. Kotvení se často využívá v kombinaci s dalšími metodami, například se stříkaným betonem nebo síťováním.

Nevýhodou předpjatých kotev je, že kvalita zhotovení je závislá na přístupnosti lokality

pro speciální techniku (vrtací, injektážní a předpínací zařízení).

Předpjaté kotvy jsou citlivé na otřesy, protože jejich působením dochází k postupnému vymizení předpětí.

Rozlišujeme několik způsobů upnutí kotev:

- *bodové mechanické upnutí různými způsoby*
- *injektáž kořene cementovou směsí*
- *injektáž kořene syntetickými pryskyřicemi*

Bodově mechanicky upínané kotvy jsou fixovány do únosné horniny pomocí rozpínání kořene kotvy.

Kotvy mající na konci rozštěp s vloženým klínem, který je při instalaci do rozštěpu zaražen, čímž dojde k rozšíření kořene. Jsou vhodné pouze pro dočasnou výztuž. Jejich nosnost činí okolo 90 kN.

U kotev s tahovou upínací patkou se rozšíření a upnutí konce tyče dosahuje pomocí kuželové hlavy na konci tyče zatahované do rozštěpu zatížením hlavy kotvy. Po zatažení kuželové hlavy do rozštěpu dojde k upnutí kotvy. Jejich nosnost je kolem 150 kN.

K upnutí kotvy s fixací kořene pomocí šroubové patky dojde při otáčení kotevní tyče pomocí matice na jejím vnějším konci. Tím dojde k zatažení kuželového klínu do čelistí na konci tyče a upnutí kořene ve vývrtnu. Jejich nosnost se pohybuje kolem 200 kN.

Pokud situace vyžaduje, je možné všechny typy bodově upínaných kotev po předepnutí v celé volné délce zaplnit injekční směsí. Takovéto kotvy se užívají pouze jako dočasné kotvící prvky.

Kotvy upnuté injektáží kořene cementovou směsí či syntetickými pryskyřicemi dosahují ale největších zatížení. Upnutí se provádí na relativně velké vzdálenosti, takže je zatížení horniny poměrně nízké.

b) Hřebíky

Jedná se o nepředpjatý kotvící prvek. Postrádá volnou délku. Upnutí hřebíků je provedeno po celé délce vrtu, na konci jsou opatřeny podložkou a maticí. Jejich délka se pohybuje do 5-6 metrů.

Používají se zejména kovové prvky. V případě výskytu agresivního prostředí se užívají laminátové prvky. Laminátové prvky mají přibližně 1,4 krát vyšší únosnost, než obdobné ocelové prvky a vývoj těchto materiálů se stále zrychluje. Při instalaci dynamických bariér či fixaci horního vodícího lana sítě se někdy užívají lanové hřebíky využívající ohebnosti výztužného prvku k jeho ideálnímu přizpůsobení do směru působení sil.

Hřebíky obecně slouží ke zpevnění povrchové vrstvy skalního svahu. Větší síly při stabilizaci rozsáhlých svahových poruch je vhodné přenášet kotvami.

Nevýhodou hřebíků je, že od určité délky je nelze vrtat ručními pneumatickými kladivy, ale je potřeba větších speciálních zařízení, jejichž použití ve vysokých a strmých svazích je problematické.

Podle konstrukce a způsobu ukotvení lze nejpoužívanější typy rozdělit na:

- *lepené pomocí cementové malty*
- *syntetické pryskyřice*
- *frikční (třecí) hydraulicky upínané hřebíky (např. Swellex)*
- *hřebíky Split Set*

Lepené hřebíky pomocí cementové malty mají vysokou únosnost až kolem 1000 kN. Pro co nejlepší funkci je potřeba použít maltu o nízkém vodním součiniteli, protože se zvětšující se velikostí vodního součinitele klesá pevnost malty.

Lepené hřebíky pomocí syntetické pryskyřice jsou dnes využívány více. Do vývrtní ampule je zasunuta ampule s dvousložkovým lepidlem, které je následně rozmícháno a vytlačeno na celou délku vrtu zatlačováním rotující tyčí hřebíku. Prvek zatuhne po několika minutách, dle teploty a typu použitého lepidla. Únosnost těchto hřebíků se pohybuje kolem 2 000 kN.

V nesoudržných materiálech se užívá zvláštního typu lepených hřebíků. Jedná se o zavrtávací kotevní tyč. Její výhodou je možnost vrtání a instalace výztužného prvku najednou bez nutnosti vysouvání vrtacího nástroje z vrtu. Vrtacím nástrojem je vlastní výztužný prvek, osazený ztracenou vrtací korunkou. Po zavrtání tyče do konečné hloubky je středovým kanálem přivedena injekční směs a ode dna vrtu je postupně vrt zaplněn.

Frikčně upínané hřebíky, někdy nazývané třecí, se používají jako dočasné zpevnění výrubu, antikorozi ochrana není tedy požadována, navíc je obtížně proveditelná.

U tzv. *Split Setu* se v podstatě jedná o svinutý pružný svitek plechu do tvaru tyče, jehož průměr je o trochu větší, než vývrt. Svitek plechu je svinut a vsunut do otvoru a po rozvinutí mobilizuje tření po celé své délce.

U *hydraulicky upínaných hřebíků* (např. Swellex) se principiálně jedná o vaky vytvořené z plechu, svinuté do tvaru tyče. Po instalaci svitku do vrtu se naplní pod tlakem vodou, tím dojde k rozpínání vaku a mobilizaci tření podél prvku. [3]

3.1.2. Gabionové konstrukce

Jedná se o drátokamenný prvek využívající se pro stabilizaci svahu. Má tvar krychle nebo kvádrů a skládá se ze dvou základních částí a to z drátěného koše (dna, bočních stěn, víka a přepážek) a výplňového materiálu.

Koš je vyroben z dvouzákrutové (splétané) ocelové sítě s oky velikosti 10 až 12 cm nebo ze svařovaných ocelových sítí s oky 5 až 10 cm. Průměr drátu je přibližně 2,5 až 4 mm.

U gabionů svařovaných se musí koš sestavit z jednotlivých panelů, zatímco koš ze splétaných sítí je dodáván jako jeden kus a jen je potřeba naohýbat do potřebných tvarů tak, aby bylo třeba co nejméně dodatečného spojování jednotlivých stěn gabionu. Gabiony ze splétaných sítí jsou pevnější, protože originálně vyrobené pletivo má lepší pevnostní parametry, než ručně vytvořený spoj v hraně gabionového koše. Jako spojovací materiál se užívá vázací drát, háčky, spirály a kroužky.

Uvnitř koše gabionu jsou potřeba pevnostní výztuhy sloužící k rovnoměrnému rozložení tlaků kameniva uvnitř gabionu, a tím k pevnosti celé gabionové zdi.

Koš gabionu je chráněn proti korozi žárovým pozinkováním ocelových drátů, nebo opatřením drátů slitinou AlZn, případně navíc potažených PVC.

Rozměry košů se mohou lišit, ale jako základní tvar se používá koš o šířce i výšce 1 m s délkou v násobcích celých metrů. Při výškách do 0,5 m hovoříme o tzv. matracích.

V průběhu montáže a plnění koše se jednotlivé koše ve spojích provazují spirálami, které se vtočí do spojů košů a tím se zajistí jejich spojení.

Jako výplňový materiál se používají hlavně horniny, které jsou dostupné z místních zdrojů a odolné proti zvětrávání. Přednost mají horniny s vyšší měrnou hmotností a nízkou pórovitostí. Vhodným materiálem je např. čedič, žula či vápenec. Frakce výplňového materiálu musí být větší než průměr ok pletiva, aby se zamezilo vypadávání kamene. Prázdné otvory tvoří 25% z celkového objemu koše, je tedy možné použít 10 až 15% kamene menší frakce, aby se snížila mezerovitost.

Z estetických důvodů je možno pohledovou stranu vyskládat ručně z hladkého lomového kamene, zbytek je možno zasypat strojově méně kvalitním kamenivem s jemnější frakcí nebo se též používá betonová drť, keramika, tvrdé dřevo nebo jiný recyklovatelný materiál. Výplňový materiál v koších ve vrchních vrstvách je možno prosypat zeminou eventuálně osázet vegetací. Kořenový systém přispívá ke zpevnění konstrukce. V případě plnění koše zeminou je nutné po stěnách umístit geotextilii. Je důležité plnit koše stejným druhem zeminy, která se musí po určitých vrstvách zhutňovat.

Před osazením drátokošů je třeba vyrovnat základovou spáru štěrkem, pokud se nepožaduje úprava vyrovnávacím podkladním betonem. V případě velkých nerovností nebo zvodnělé základové spáry je možné k založení použít drátomatrice. Základová spára se řádně vyčistí, případné nerovnosti se vyrovnají štěrkokodrtí nebo hubeným betonem, do něhož se osadí ocelové trny. Díky vysoké mezerovitosti a vodopropustnosti gabionové konstrukce není riziko narušení díla vlivem mrazu a obvykle tedy není třeba zakládat do nezámrazné hloubky.

Gabionové konstrukce mohou být určeny k sestavení až na stavbě nebo jsou k dispozici i gabiony sestavené a naplněné přímo z výroby, což zvyšuje rychlost výstavby.

Výhodou této metody je možnost přizpůsobení tvaru konstrukce k povrchu terénu, rychlá a suchá montáž i demontáž, velký odpor proti tahům a tlakům, přírodní vzhled (vhodné do CHKO, NP), nenarušují přírodní vodní režim (absorbují energii vody, propouští vodu) a díky použití přírodních a recyklovatelných materiálů z místních zdrojů jsou cenově dostupné.



Obr. 11 Gabionová konstrukce, Silnice I/11 Mokré Lazce – Ostrava, [17]

3.1.3. Podezdívky a plomby

Podezdívání a plombování patří mezi lokální sanační zásahy. Využívají se pro zvýšení stability a zabránění pohybu uvolněných skalních bloků či jako ochrana skalního masívu před nepříznivými účinky vody a mrazu.

Při plombování se vyplňují povrchové dutiny odolnějším materiálem (např. vyzdívkou z kamenů, mrazuvzdorných cihel či prostého betonu, čerpaného za jednostranné bednění). Plomby mají funkci podepření lokálních převisů a zamezení pokračování zvětrávání.

Před plombováním dutin se povrch horniny očistí od vegetace a zvětralých částí horniny a ložná plocha se zdrsní. Bezprostředně před betonáží nebo zděním se styčná plocha navlhčí a postříká cementovým mlékem. Spolupůsobení plomby s horninou je možné zvýšit osazením krátkých trnů z betonářské oceli do předvrtaných otvorů.



Obr. 12 Plomba Lázně Kynžvart, [15]

Při podezdívání se vytváří zděné nebo železobetonové konstrukce mimo reliéf skalního svahu. Podezdívka má funkci nosného pilíře, je třeba ji založit na neporušené hornině a dozdit těsně do horniny, očištěné od vegetace a zvětralých částí horniny. Pro zvýšení účinnosti podpěrných konstrukcí je účelné metodu kombinovat s kotvením. Materiál potřebný na podezdívání je totožný jako u plombování.



Obr. 13 Podezdívka Dolní Žleb, [15]

Při sanování je nutné zvážit, zda uvolněné bloky jsou klíčové a je potřeba je skutečně podezdít, nebo zda bude vhodnější uvolněné bloky zcela odstranit. Odstranění bloku je obvykle i ekonomicky výhodnější.

Zároveň použití této metody není vhodné v místech, kde by odolnost horninového masívu byla výrazně nižší než vybudovaná podezdívka / plomba, jelikož by hrozilo nebezpečí jejího brzkého uvolnění a vypadnutí. Ve zvodněných poruchách je nutno ponechat volný výtok těchto vod mimo podezdívku / plombu.

3.1.4. Injektáž

Injektáž se užívá pro zpevnění a opětovné spojení silně porušeného skalního masívu s většími trhlinami nebo dutinami, které jsou hlouběji ve skalním svahu. Současně injektované výplně zabraňují pronikání povrchové vody do skalních puklin.

Injektáž se musí provádět jako nízkotlaká. Směs je transportována do dutin v podstatě jen gravitací nebo jen s minimálním tlakem, aby vlivem vhnání injekční směsi nedošlo k pohybům nestabilních bloků.

Používají se cementové injekční směsi, pokud je ale požadavek na rychlé zatuhnutí, při havarijních sanacích, používají se k injektáži rychle reagující syntetické umělé pryskyřice.

Při sanaci značně rozevřených a průběžných trhlin je dobré do trhlin před injektáží vložit výztužnou síť, případně utěsnit spáru tak, aby nedošlo k úniku injekční směsi mimo danou puklinu. Tam, kde není možné injektovat přímo, se musí provést šikmý vrt do pukliny. [3]

3.2. Pasivní metody sanace

3.2.1. Stříkaný beton a torkretové omítky

Cílem těchto metod je ochránit povrch skalního svahu před zvětráváním a zároveň zamezení opadávání horninových úlomků. Skalní podklad pod ochrannou vrstvou musí být co nejméně narušen. Před aplikací je nutné řádně očistit povrch svahu od vegetace, zvětralin a omýt vodou či otryskat pískem a nakonec bezprostředně před aplikací nástřiku povrch svahu zvlhčit.

a) Torkretová omítka

Torkretové omítky nejsou moc odolné vůči změnám teplot a jejich použití je nevhodné v místech s výskytem výronů podzemní vody. Jsou používány jako dočasné opatření nebo v místech, kde je přibližně stálá teplota. Torkretová omítka může být využita i jako podklad pro definitivní ochrannou vrstvu.

b) Stříkaný beton

Metoda stříkaného betonu patří do skupiny pasivních metod, ale někdy jsou kotvy výztužného prvku betonu fixovány dostatečně hluboko v masívu a pak se jedná o metodu aktivní.

Aplikace stříkaného betonu sestává z nanášení betonové směsi nástřikem na horninový podklad jednak samostatně, ale častěji ve spojení s výztužnou ocelovou sítí. Účelem nástřiku je zpevnění a ochrana povrchu porušené horniny zvětráváním. Minimální tloušťka vrstvy stříkaného betonu pro dočasné konstrukce je 10 cm, u trvalých konstrukcí se přidává výztuž ocelovou sítí a minimální tloušťka vrstvy je 20 cm. Pokud nástřikovaný betonový plášť má plnit i statickou funkci, musí se jeho síla zvýšit na zhruba 30 cm a řádně vyztužit ocelovými výztužnými sítěmi kotvenými do horninového masívu.

U nástřiku ve spojení s výztužnou ocelovou sítí, se síť připevní ke skalnímu podkladu kotvičkami z betonářské oceli obvykle profilu 10 mm. Kotvičky se osazují do předem předvrtaných otvorů vyplněných cementovou maltou.

Složení směsi je z cementu, kameniva do 8 mm, vody a aditiv (urychlovače, plastifikátory, vlákna, drátky aj.), která zajišťují dobrou zpracovatelnost směsi a následné mechanické vlastnosti.

Při aplikaci stříkaného betonu na skalní svah se provádí nástřik v jedné či více vrstvách o tloušťce každé z nich od 5 cm do 7,5 cm. Aplikace se provádí ručně nebo strojně.

Strojní způsob aplikace zahrnuje dva technologické postupy, a to suchý nebo mokry proces. U sanací skalních svahů, které jsou většinou špatně dostupné a stačí zde menší objemy nanášených směsí, převažuje aplikace suchého procesu.

Při suchém procesu je suchá směs pneumaticky hnána pomocí nenáročného zařízení až do trysky stříkací pistole, kde dochází k řízenému zvlhčování vodou, případně aditivou. Díky stlačenému vzduchu pak nanášíme zvlhčenou směs na líc svahu, ke kterému v ideálním případě zcela přilne. Při tomto procesu ale dochází ke značnému odpadu, zhruba 30 – 60 %. Je to způsobeno tím, že při dopadu směsi na svah jsou některá zrnka písku odražena od svahu. Nevýhodou je i vysoká prašnost.

Při mokrém procesu je do zařízení dávkována již hotová maltová směs včetně vody. Používají se speciální cementové směsi mechanicky (mletím cementu za mokra) či chemicky (použití speciálních činidel) aktivované, což přispívá k urychlení hydratace cementových částic a ke zlepšení vazné schopnosti cementu. Namíchaná směs je hydraulicky hnána hadicí do stříkací trysky, kde je, pomocí trysek se stlačeným vzduchem, nanášena na líc svahu. Konečný výsledek je velmi podobný jako při suchém procesu

Je nutno vybudovat drenáže pro vodu. Pod podkladní vrstvu, před nástřikem betonové směsi, se položí geodrény, které vodu odvedou mimo prostor mezi svahem a vrstvou stříkaného betonu. Voda se nesmí hromadit za pláštěm stříkaného betonu a působit na něj hydrostatickým tlakem.

V ČR komplikuje použití této ochrany fakt, že poměrně tenké vrstvy stříkaného betonu snadno promrzají a praskají. Tomu by mělo pomoci použití příměsí puzzolánu nebo tzv. drátkobetonu či vláken. Přísada z jemně mletých puzzolánů reaguje s cementem v době jeho hydratace a zvyšuje pevnost betonu dvakrát až třikrát oproti obyčejným směsím písku s cementem.

Metoda tzv. drátkobetonu ve světě postupně nahrazuje kombinaci stříkaného betonu s výztužnými sítěmi. Drátky jsou slepeny k sobě lepidlem, které je vodou rozpustné a po vhození slepených drátků do betonové směsi dojde k rovnoměrnému rozptýlení jednotlivých drátků. Tato metoda se využívá zejména při mokrém procesu.

Nevýhodou metody stříkaného betonu je velmi omezená možnost oprav případných trhlin.

Výhodou je možnost aplikace na poměrně malé oblasti skalních svahů, na rozdíl od jiných metod, kdy aplikace na menší plochy je ekonomicky nevýhodná. U silně zvětralých povrchů se jedná o jednu z mála bezúdržbových a dlouhodobě účinných metod.



Obr. 14 Optimalizace traťového úseku Krasíkov - Česká Třebová, tunel krasíkov 2, [19]

3.2.2. Obkladní zdi

Ochrana skalních svahů obkladními zdmi se provádí tam, kde je ohrožena stabilita líce svahu zvětráváním na větších souvislých plochách. Obkladní zdi nezachycují horninový tlak objektu ani nezajišťují statickou podporu, jsou v podstatě obdobou stříkaného betonu.

Rozlišujeme několik druhů obkladních zdí:

- *Obkladní zeď monolitická* je souvislá konstrukce z jednotného stavebního materiálu, budovaná v celém rozsahu na daném místě.
- *Obkladní zeď polomontovaná* se skládá z monolitické nebo prefabrikované nosné konstrukce a prefabrikátů, které tvoří ztracené bednění. Prostor mezi horninou a bednicími prefabrikáty se vyplňuje betonem.
- *Obkladní zeď montovaná* je budovaná v celém rozsahu z prefabrikovaných dílců, které se na místě smontují. Zeď musí těsně přiléhat k hornině, čehož se docílí dozděním do horniny, injektáží nebo kotvením.

Obkladní zdi je třeba založit minimálně 0,50 m pode dnem příkopu. Sklon rubu zdi se určí na základě geotechnického posudku, nesmí ale být strmější než 10:1. Sklon líce zdi se volí u zdí monolitických maximálně 5:1, u zdí polomontovaných a montovaných může být shodný se sklonem rubu zdi.

Obkladní zdi monolitické se zdi nebo betonují až po úplném dokončení výlomu zatímco zdi polomontované a montované, kombinované s kotvením je možné budovat současně s výlomem.

Největším rizikem je zadržaná voda za zdí. A proto v případě výskytu horninové vody je nutné vždy vystavět dlouhodobě funkční drenáž za rubem zdi, kterou bude možné v rámci údržby pravidelně revidovat a čistit.



Obr. 15 Obkladní zeď, ŽST Praha Bubeneč 4 SK, [16]

3.2.3. Ochranné sítě

Sítování je jedna z nejpoužívanějších ochranných metod. Používají se hlavně jako ochrana před opadáváním horninových úlomků ze strmých svahů. Sítě jsou tvarovatelné, takže se dají dobře pokládat na nerovný povrch skalního svahu. Dále jsou vyráběné z materiálů s velkou pevností, malou tažností a dlouhou životností.

Pro výrobu sítí se užívá různých materiálů, například kovových, plastových případně i kompozitních. Kovové sítě se vyrábějí jako drátěné sítě s hexagonálním dvouzákrutovým okem a jako sítě s obdélníkovým okem. Dále existuje řada speciálních vysokopevnostních sítí z ocelových lan s různým způsobem spojení na křížení lan, sítě z drátěných splétaných prstenců nebo sítě kombinované z drátů a lan. Na trhu se vyskytují i plastové sítě (většinou různá geosyntetika), jejich použití není ale široce užíváno. Protože nejsou odolné vůči požárům, spojování pásů je obtížné, hůře kopírují nerovnosti a nejsou příliš estetické.

Vlastnosti materiálu a typ oka určují chování sítě na skalním svahu.

Sítě z hexagonálního pletiva nejsou pružné, ale jsou snadno tvarovatelné díky použité pevnosti drátu. Používají se na svahy tvořené zpravidla pevnějšími horninami, které tvoří členité morfologické tvary. Obvykle jsou sítě vyráběny z drátu pevnosti 350 až 550 N/mm².

Výhodou je jejich nízká deformace při zatížení a zvýšená odolnost dvouzákrutových spojů, kdy se při přerušení drátu nešíří tato porucha do okolí porušeného místa a síť zůstává nadále funkční.

Sítě z pletiva obdélníkového jsou pružné a lze je částečně předeprnout. Ale nejsou v jednom směru snadno tvarovatelné díky použité vysoké pevnosti drátu. Používají se zejména v oblasti velmi až zcela zvětralých hornin, které je možné před aplikací vytvarovat do příznivého tvaru a zároveň kde je žádoucí a technicky možné předeprnutí sítě na povrchu. Součástí systému jsou i speciální podložky zajišťující spolu s hřebíky optimální uchycení a předeprnutí sítě na svahu. Sítě tohoto typu jsou vyráběny ze speciálních sítí z drátu pevnosti 1 770 N/mm².

Ochrana proti korozi je řešena pokovením (Zn, AlZn), často v kombinaci s potažením síťoviny plastem.

Pásky sítí, instalované paralelně svise vedle sebe se k sobě spojují obyčejným drátem, speciálními drátěnými sponami nebo ocelovými články. Konstruktivní řešení upnutí ochranných sítí na skalní svah a plošný rozsah zasítovaných ploch vždy vychází z geologické situace. Způsob aplikace ochranných sítí nezávisí v zásadě na daném druhu horniny, ale především na míře tektonického porušení a zvětrání horniny. Se zvyšující se intenzitou tektonického porušení a hlubším dosahem zvětrání je provedení ochranných sítí obtížnější.

Sítě rozlišujeme na dočasné a trvalé. Dočasné ochranné sítě jsou sítě během stavebních prací (například zajištění bezpečného provozu pod svahem během její sanace). Trvalé ochranné sítě je pak nutné kotvit ke svahu hřebíky či kotvami odpovídajících délek. Délka kotevních prvků musí zajišťovat protnutí potenciálně nestabilní vrstvy hornin a bezpečné zakotvení ve stabilních horninách. Sítě bývají zpravidla v okrajových úsecích vybaveny vodícími ocelovými lany, která zajišťují dostatečný přítlak sítě na skalní svah.

Pokud existuje reálná možnost poškození sítí při uvolnění větších objemů hornin pod nimi, lze lokálně zesílit síť ocelovými lany. Vždy je potřeba navrhnout velikost ok sítě pro konkrétní lokalitu, aby se zamezilo propadu nejmenší frakce horninových úlomků, které se v daném místě vyskytují. Pokud je třeba zachytit kamenivo natolik rozdílných frakcí, že nestačí jedna velikost oka, je nutné položit na svah síť, o různých velikostech ok, na sebe přičemž kotvení se provádí najednou. Jestliže ani to není možné, musí se použít speciální geokompozity plastových trojrozměrných matrací a sítí.

Ochranné sítě se ukládají na svah očištěný od uvolněných kusů horniny a zvětralých částí svahu, včetně odstranění vegetace a přichytí se k hřebíkům deskovými podložkami (rozměry v návaznosti na velikost ok sítě) a matkami. Vyčnívající části hřebíků se po osazení opatří

antikoročním nátěrem.

K trvalé stabilizaci povrchově rozrušeného skalního svahu se mohou ochranné sítě doplnit vegetační vrstvou, která snižuje možnost dalšího zvětrávání horniny. Vegetační vrstva se na skalní povrch zřídí hydroosevem.

Sítě lze na svah instalovat jak v provedení aktivním, tak pasivním. Při aktivním způsobu sítování je potřeba docílit co nejdokonalejšího kopírování tvaru líce svahu sítí. Kotvení sítě k povrchu skalního svahu se zajišťuje pomocí hřebíků či kotev odpovídajících délek. Tyto prvky zajišťují nejen fixaci vlastní sítě, ale i hlavní stabilizační prvek skalního svahu. Hlavním požadavkem je co nejmenší deformace sítě při potenciálním vypadnutí horninových úlomků do sítě a minimální prostor mezi sítí a lícem svahu.

Aktivní způsob instalace je vhodný pro svahy se sklonem menším než 50°, dále je potřebný nízký stupeň zvětrání (pro umožnění vrtání kotevních prvků) a maximální velikost bloků by neměla být větší než 0,6 m.



Obr. 16 Ochranné síť – aktivní, sanace skalního svahu Budčice II

Pasivní způsob instalace sítě na svah spočívá v kotvení pletiva ke svahu pouze na horním a někdy i spodním okraji. Kotvení na horním okraji může být provedeno přímo na horní hraně sítě, nebo může být horní hrana sítě napojena lanovými smyčkami na kotvy výše ve svahu, případně je hrana sítě kotvena ke sloupkům plotu. Síť v podstatě vytváří jakýsi závěs. Na spodním okraji sítě je občas využíváno pouze zatížení sítě, například betonovým závažím. Mezi napnutou sítí a lícem svahu vznikne mezera pro propad uvolněných kamenů.

Pasivní způsob instalace pouze zajišťuje vedení padajícího úlomku mimo chráněné

objekty. Je zde tedy nutná navazující údržba akumulčního prostoru při patě svahu.

Pasivní způsob síťování se využívá pouze, pokud dochází k postupnému opadávání drobných úlomků hornin. Sítě nejsou schopny zachytit více než 5–10 m³ sutě. Nevýhodou této metody je, že nijak nezabraňuje další erozi.



Obr. 17 Ochranné sítě – pasivní, sanace skalního svahu Budčice I

3.2.4. Záchytné konstrukce

Záchytné konstrukce se budují na úsecích, kde hrozí potenciální riziko pádu horninových úlomků či bloků ze skalních svahů. Svahy musí mít příznivý sklon pro tuto ochrannou metodu, nebo jsou tak rozlehlé, že sanace jiným způsobem není možná.

Mezi záchytné konstrukce patří celá řada technických prvků. Jejich užití záleží na velikosti kinetické energie horninového materiálu, který má daná konstrukce zachytit. Nejméně odolnými konstrukcemi jsou záchytné ploty, k odolnějším patří dynamické bariéry nebo galerie.

Navrhování jednotlivých záchytných konstrukcí se provádí na základě rozboru vyskytujících se horninových úlomků a bloků na dané ploše, vyšetření možných drah pádu tohoto horninového materiálu na základě znalosti morfologie a materiálové skladby území.

Dnes už existuje spousta počítačových programů, které simulují pád bloků po svahu dle zadaných vlastností, například program Geostru, Rockfall a další.

Při projektování záchytných konstrukcí jsou dále potřeba testy dezintegrace bloků při jejich kontaktu s podložím. Menší a nepravidelné úlomky hornin mohou totiž vytvořit na záchytných konstrukcích větší škody, než pravidelné tvary větších bloků. Bylo zjištěno, že na

rozpad hornin nemá tolik vliv velikost kinetické energie, ale spíše orientace foliace vůči dopadové ploše. Takže jde především o deskovité úlomky, které mohou při pádu získat na rychlosti během jejich rotace ve směru spádnice.

a) Záchytné ploty

Záchytné ploty se budují na horním či spodním okraji svahu, případně v jeho blízkosti. Odolnost konstrukce záleží na použitých materiálech, ale pohybuje se okolo 15 kJ. Ochranné ploty mohou být plnostěnné nebo s otvory.

Plnostěnné ploty se budují ze zabetonovaných ocelových nebo železobetonových I profilů. Jako výplň se pak používají železobetonové či dřevěné pražce, trámy, kulatiny, betonové desky nebo prefabrikáty z recyklovaných plastů.

Ploty s otvory mají sloupky vyrobeny z prutů betonářské oceli, ocelových zavrtávacích tyčí či ocelových bezešvých trubek. Jako výplň se používá pletivo dvouzákrutových ocelových sítí nebo sítí s obdélníkovým okem. Ploty jsou vyztuženy vodícími ocelovými lany v několika úrovních a sloupky jsou kotveny do svahu pomocí hřebíků.

Při pádu bloků na tvrdý podklad může dojít k jejich rozbití a odlétnutí úlomků. Proto ploty musí být dostatečně vysoké a drátěná oka dostatečně malá. Pro instalaci záchytných plotů obecně je vhodné využít svahů do 30°, nebo je nutné zajistit správný odklon sloupků od svislice, aby nebyla snižována účinná výška plotu a tedy jeho funkčnost. Je důležité znát horninové podloží, protože ploty je potřeba vhodně fixovat do podloží.



Obr. 18 Ochranné záchytné ploty, sanace skalního svahu Budčice II

b) Dynamické bariéry

Dynamické bariéry jsou oproti plotům navrhovány na pád větších skalních bloků. Odolnost poměrně lehké konstrukce může dosahovat až 5000 kJ díky elastoplastickému charakteru deformace záchytných prvků.

Bariéry se skládají ze základových patek, fixované pomocí hřebíků či mikropilot, z kyvně uchycených sloupků, elastické sítě a soustavy ocelových lan s absorbéry kinetické energie.

Sloupky jsou vyrobeny z ocelových profilů, nebo trubek a na svah se instalují v intervalu okolo 10–12 m.

Rozlišujeme několik druhů dynamických bariér. Například elastická síť pro malé pádové energie do 500 kJ se vyrábí z obdélníkové vysoce odolné sítě nebo z tzv. HEA panelů, což jsou panely, splétané z ocelových lan. Pro větší pádové energie se vyrábí síť z prstenců drátu, nebo ze speciálně pletených lanových panelů

Důležitým prvkem dynamických bariér je však absorbér energie. Princip je založen na principu tření nebo na užívanějším principu deformace vložených elementů. Absorbéry jsou uchyceny na soustavě podpůrných a kotevních lan kotvených zpravidla lanovými nebo tyčovými hřebíky do podloží. Lanové hřebíky jsou ale vhodnější, neboť se při zatížení přizpůsobí směru působení síly a nejsou namáhány na stříh, na rozdíl od tyčových.

V České republice se tyto konstrukce staví zatím jen zřídka, hojně využívány jsou spíše v alpských zemích.



Obr. 19 Polodynamická bariéra, Sanace skalního svahu Budčice I

c) Galerie

Galerie je prvek velmi se podobající tunelu. Buduje se nad silnicemi či železnicemi v místech, kde je riziko pádu kamenů.

Na stropu železobetonové konstrukce je zpravidla tlumící vrstva zeminy, přiměřená očekávané kinetické energii. Aby bylo dosaženo co nejvyšší absorpce kinetické energie, jsou mechanické vlastnosti různých násypových tlumících hmot testovány laboratorně. V ČR se galerií vůbec nevyužívá, vyskytují se převážně v alpských zemích.



Obr. 20 Galerie, Bormio, [18]

d) Záchytné zdi

Záchytné zdi zabraňují pádu kamenů a balvanů do prostoru pod skalním svahem. Záchytné zdi se budují u paty svahu. Mezi skalním svahem a například tratí nebo komunikací musí být akumulací prostor. Zdi mohou být vybudované z betonu, železobetonu, prefabrikátů nebo gabionů. Při pravidelné údržbě je potřeba vyklízet prostor za záchytnou zdí.

4. Praktický příklad zajištění stability skalního svahu

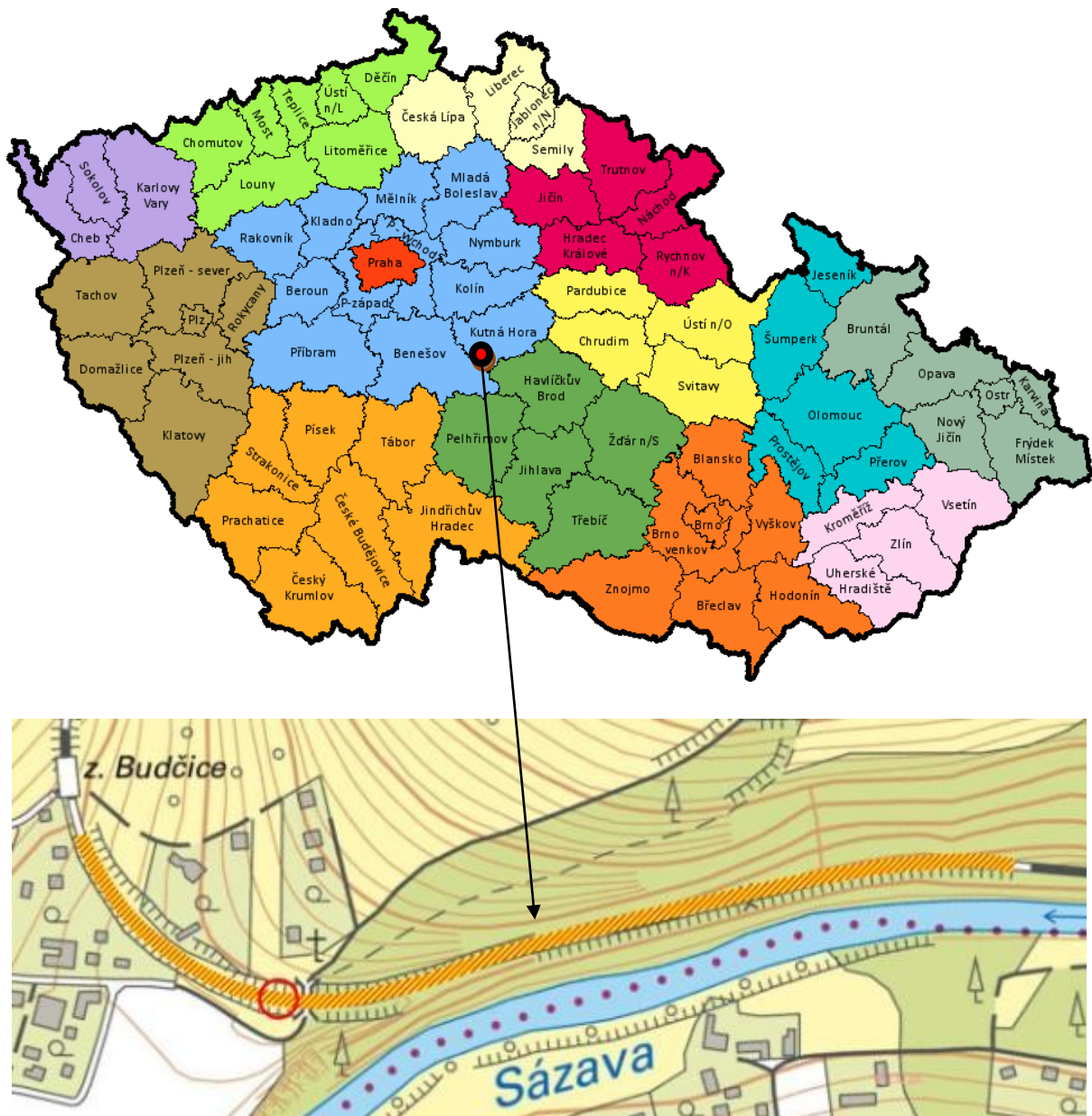
4.1. Identifikační údaje stavby

Název stavby: Sanace skalních svahů Budčice II v km 21,800 – 22,300 v úseku Vlastějovice - Ledeč nad Sázavou

Název akce: Sanace skalního svahu Budčice II v km 21,933 - levá strana zářezu

Lokalita: kraj Středočeský, okres Kutná Hora

Účel stavby: Zajištění bezpečnosti provozu na železniční trati ve vazbě na skalní zářezy



Obr. 21 Lokalizace stavby Budčice II v km 21,800 – 22,300/300 v úseku Vlastějovice - Ledeč nad Sázavou
(////) a zaznačení km 21,933 (o)

4.2. Geotechnické podmínky stavby

V úseku Budčice II v km 21,800 – 22,300 je trať vedena v oboustranném zářezu svahů hloubky 1,5 - 6 m. Přibližně v km 21,947 je tento zářez překlenut malým silničním mostem. Klíčovým faktorem u tohoto úseku byla vysoká přítomnost puklinové vody - lokální výrony pramenů. Dále v blízkosti mostu v km 21,935 bylo zaznamenáno silné erozní působení vody.

Skalní zářez má jednotnou morfologickou stavbu. Pata skalního svahu byla silně kryta svahovinami, napadávkami nebo zbytky drážní stezky. Na horních hranách skalní svah přechází v zemní svah, který byl pokryt zvětralým pokryvem v mocnosti 0,25 - 0,85 m.

Vegetační kryt byl v zářezu velmi hustý. Hlavní narušení skalního svahu od vegetace bylo v podobě hluboce kořenících křovin a náletových stromů.

Vlastní skalní masív byl v plošném rozsahu silně až zcela zvětralý. Skalní svah měl charakter opadu gravitační transport po šikmé ploše či volným pádem, sesypávání s odtržením a odlamováním.

Akumulační prostor u paty svahu byl v tomto úseku velmi omezen. Během dokumentace skalních svahů bylo obtížné odlišit vlastní těleso železničního svršku, který plynule přecházelo v rovině v patu skalního svahu.

Dle hodnocení stability skalních svahů byl úsek Budčice II v km 21,933 zařazen do stavu havarijního. [20]

Pro optimální zajištění v daném místě bylo navrženo vzhledem k podmínkám stavby:

- *provést odstranění narušující vegetace a odstranění zvětralých a volných částí*
- *zajistit erozní rýhy gabionovou konstrukcí*
- *obnovit podélný příkop a drážní stezku, obnovit akumulací prostor*

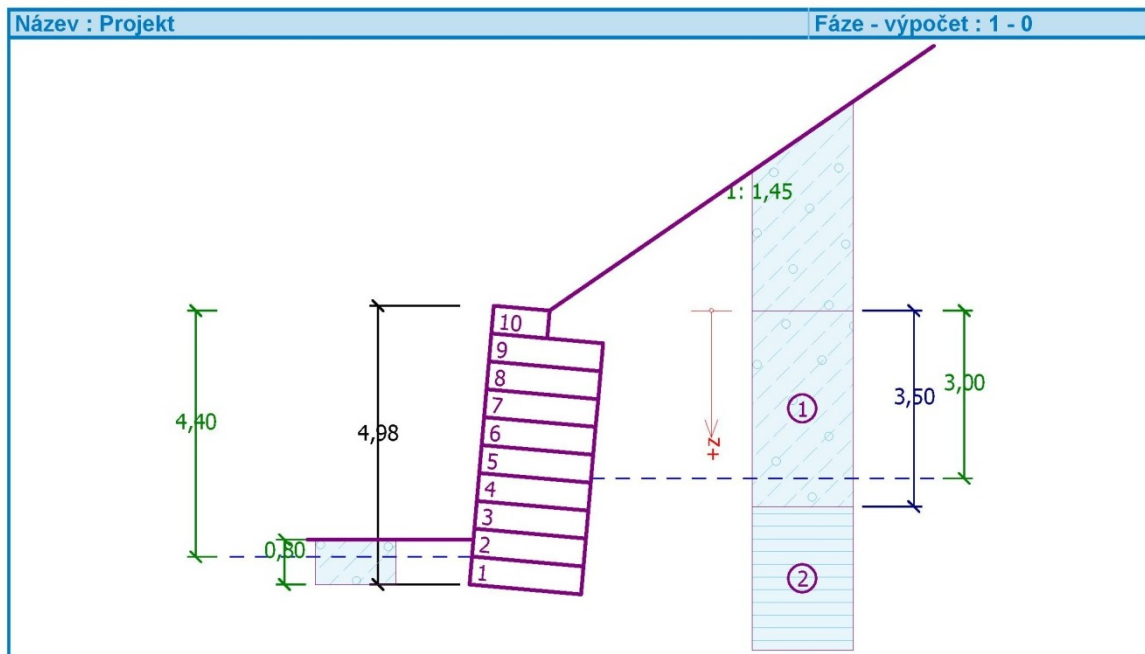
4.3. Stanovení stability skalního svahu v km 21,933

Stav stability skalního svahu v km 21,933 byl hodnocen na základě základních hodnotících geotechnických kritérií, která popisují stav a míru narušení skalního svahu. Hodnotící kritéria byla definována a strukturována metodikou hodnocení stavu stability RSR – Rock Slope Rating, která byla pro potřeby kategorizace vytvořena pro podmínky České republiky. Na základě hodnocení stavu stability dle RSR byl stav daného svahu určen jako havarijní a bylo třeba navrhnout zajištění.

Pro skalní svah v úseku km 21,933 bylo navrženo zajištění pomocí gabionové konstrukce.

4.4. Návrh zajištění stability skalního svahu v km 21,933 v programu GEO5

V programu GEO5 bylo zjišťováno, zda zajištěním svahu navrhovanou gabionovou konstrukcí dojde ke stabilizaci svahu či nikoli.



Obr. 22 Geometrie gabionové konstrukce

Vstupní data

Parametry gabionové konstrukce

Objemová tíha kameniva: $\gamma = 17,5 \text{ kN/m}^3$

Úhel vnitřního tření kameniva: $\varphi = 36,00^\circ$

Soudržnost kameniva: $c = 0,00 \text{ kPa}$

Pevnost sítě: $R_t = 40,00 \text{ kN/m}$

Vzdálenost svislých sítí: $v = 1,00 \text{ m}$

Únosnost čelního spoje: $R_s = 40,00 \text{ kN/m}$

Výška gabionu: $h = 0,50 \text{ m}$

Šířka gabionu (čís.1 - 9): $b = 2,00 \text{ m}$

Šířka gabionu (čís.10): $b = 1,00 \text{ m}$

Sklon gabionu: $\alpha = 5^\circ$

Zadané parametry zemin

Původní zemina (1):

Objemová tíha:	$\gamma = 22,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření:	$\varphi_{ef} = 26,00^\circ$
Soudržnost zeminy:	$c_{ef} = 30,00 \text{ kPa}$
Třecí úhel kce-zemina:	$\delta = 22,00^\circ$
Poissonovo číslo:	$\nu = 0,30$
Obj. tíha sat. zeminy:	$\gamma_{sat} = 22,00 \text{ kN/m}^3$

Podloží (2):

Objemová tíha:	$\gamma = 24,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření:	$\varphi_{ef} = 45,00^\circ$
Soudržnost zeminy:	$c_{ef} = 40,00 \text{ kPa}$
Třecí úhel kce-zemina:	$\delta = 30,00^\circ$
Obj. tíha sat. zeminy:	$\gamma_{sat} = 24,00 \text{ kN/m}^3$

Tvar terénu

Terén za konstrukcí je ve sklonu 1: 1,45 (úhel sklonu je $34,59^\circ$).

Vliv vody

Hladina podzemní vody je za konstrukcí v hloubce 3,00 m a před konstrukcí v hloubce 4,40 m. Podloží u paty konstrukce je nepropustné a vztlak v základové spáře od rozdílných tlaků je uvažován lineární.

Odpor na líci konstrukce

Odpor na líci konstrukce je klidový. Před zdí je původní zemina výšky $h = 0,80 \text{ m}$. Terén před konstrukcí je rovný.

Síly působící na konstrukci

Číslo	Název	Působení	F _x [kN/m]	F _z [kN/m]	M [kN/m]	x [m]	z [m]
1	Kotevní prvek 1	stálé	20,00	5,00	0,00	0,80	1,00
2	Kotevní prvek 2	stálé	30,00	5,00	0,00	0,80	2,00

Tabulka 1 Síly působící na konstrukci

Nastavení výpočtu

Metodika posouzení: stupně bezpečnosti

Výsledky

Posouzení stability svahu (Bishop):

Posouzením stability svahu zajištěného gabionovou konstrukcí bylo zjištěno, že tento svah na stupeň bezpečnosti 1,50, optimalizací smykové plochy, vyhoví. (viz. Příloha 1)

Stupeň bezpečnosti = 2,26 > 1,50 → Stabilita svahu VYHOVUJE

Posouzení stability svahu (Fellenius / Petterson):

Posouzením stability svahu zajištěného gabionovou konstrukcí bylo zjištěno, že tento svah na stupeň bezpečnosti 1,50, optimalizací smykové plochy, vyhoví. (viz. Příloha 2)

Stupeň bezpečnosti = 2,12 > 1,50 → Stabilita svahu VYHOVUJE

4.5. Skutečné provedení sanace

V úseku Budčice II v km 21,933 bylo provedeno odstranění narušující vegetace a odstranění zvětralých a volných částí, obnovení podélného příkopu a drážní stezky, obnovení akumulčního prostoru. Erozní rýhy v km 21,933 byly nakonec zajištěny kamennou zdí, místo původně zamýšlené gabionové konstrukce. Kamenná zeď byla dále překryta sítí doplněnou systémem kotevních prvků, která byla aplikována pro zajištění zbylého okolního svahu úseku Budčice II v km 21,800 – 22,300. Jelikož v daném úseku byly zaznamenány úlomky skalního svahu v řádu cm, byly navíc navrženy 3D PP struktury pro zachycení tohoto drobného opadu.

Každé z ochranných opatření vyžaduje pravidelnou údržbu v četnosti 1x za rok, bezúdržbové řešení v tomto úseku nelze aplikovat.



Obr. 23 Skutečné provedení sanace, Budčice II

Další fotografie zajištění svahu v úseku Budčice II v km 21,933 a okolí viz. Příloha 3.

5. Závěr

Bakalářská práce obsahuje souhrn problematiky stability skalního svahu. Jelikož skalní svahy jsou vystaveny nepříznivým účinkům okolního prostředí, není jejich stav neměnný a podléhají procesům zvětrávání, které mají za následek různé poruchy svahů. To velice ohrožuje bezpečnost v okolí svahu. Je tedy potřeba u svahů zajistit stabilitu, aby došlo k vyloučení pádu kamenů, sesuvu svahu, překlopení bloků či odtržení převisů.

Úvodní část práce se zabývá stanovením stability skalních svahů. Jsou zde uvedeny činitele ovlivňující stabilitu svahů, typy porušení svahů, postup při zjišťování stability svahů, ale zejména tu jsou uvedeny metody stanovení stability svahů.

Další část je pak věnována popisu metod zajištění skalních svahů, a to metod aktivních i pasivních. Některé druhy ochrany se používají méně, některé více, ale ať už chceme nebo ne, musíme uznat, že ochrana skalních svahů je velmi důležitá. Za žádných okolností nesmí dojít k ohrožení bezpečnosti v okolí.

Poslední část obsahuje praktický příklad návrhu zajištění skalního svahu pomocí programu GEO 5. Jedná se o konkrétní příklad skalního svahu v lokalitě Budčice II v km 21,933 v úseku Vlastějovice - Ledec nad Sázavou. Na dané stavbě bylo, vzhledem ke geotechnickým podmínkám, navrženo pro zajištění skalního svahu 1) odstranění narušující vegetace, 2) odstranění zvětralých a volných částí, 3) vytvoření gabionové konstrukce jako prostředek stabilizačního opatření, 4) obnovení podélného příkopu a drenážní stezky a 5) obnovení akumulčního prostoru. Návrh gabionové konstrukce byl vypracován v programu GEO 5. Stabilita svahu zajištěného gabionovou konstrukcí pak byla v programu GEO5 vypočtena a posuzována dle Bishopovy i Pettersonovy metody. Daný svah vyhověl pro obě metody.

Cílem bakalářské práce bylo zejména představit několik metod stanovení stability skalních svahů a způsoby zajištění svahů nestabilních. Tyto cíle byly naplněny v kapitolách.

6. Seznam použité literatury a podkladů

Odborná literatura a články

- [1] BUŘIČ Petr; BŮŽEK Jan. *Údržba skalních zářezů a svahů*. Praha
- [2] PAVLÍK Jiří. *Geotechnické způsoby určování stability skalních stěn*. Praha, 1981
- [3] OLIŠAR Petr. *Přehled sanačních metod, eliminujících skalní řízení a jejich limitní podmínky aplikace*. Brno, 2010
- [4] HORÁK Vladislav. *Mechanika hornin, modul BF05-M004, laboratoř mechaniky hornin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006
- [5] RADIMSKÝ, Michal. *Projektování pozemních komunikací, modul 5*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007
- [6] BÍBA Tomáš. *Posouzení stability skalní stěny*. Brno 2013
- [7] Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah, Kapitola 5, Ochrana zemního tělesa*. Praha, 2008
- [8] Strix Comutov. *Program Nemeton 2013*. 2013
- [9] ŠTÁBL Stanislav. *Metodika pro hodnocení stavu skalních svahů*

Internetové podklady

- [10] Strix Chomutov [online]. Dostupné z <http://www.strixchomutov.cz/>
- [11] Minova Bohemia s.r.o. [online]. Dostupné z <http://www.minova.cz/>
- [12] Geobrugg, [online]. Dostupné z <http://www.geobrugg.com/en/home-en>
- [13] The RIX Group [online]. Dostupné z <http://www.therixgroup.com.au/>
- [14] FINE s.r.o. [online]. Dostupné z <http://www.fine.cz/geotechnicky-software/>
- [15] Program NEMETON 2013 [online]. Dostupné z <http://www.skalniriceni.cz/>
- [16] Správa železniční dopravní cesty [online]. Dostupné z <http://www.szdc.cz/index.html>
- [17] GABIONY TOMIS s.r.o. [online]. Dostupné z <http://www.gabionytomis.cz/>
- [18] Galerie, Bormio [online]. Dostupné z <http://www.eupatrid.cz/foto%20z%20cest/11/passo/37.jpg>
- [19] Stříkaný beton [online]. Dostupné z http://zeleznice.hrabalovi.name/img_lhd/krt_6628.jpg

Podklady firmy Minova Bohemia s.r.o.

- [20] Geotechnický průzkum, Sanace skalního svahu Budčice II v km 21,800 – 22,300 v úseku Vlastějovice - Ledec nad Sázavou

Použitý software

Geotechnický software GEO5

7. Seznam obrázků

Obr. 1	Porušení skalního svahu: a) porušení smykem po polygonální smykové ploše, b) porušení smykem po rovinné smykové ploše, c) porušení smykem po kruhové smykové ploše, d) porušení sesunutím horninového klínu, e) porušení odtržením převisu, f) porušení překlopením bloků	7
Obr. 2	Řešení rovnoběžných ploch diskontinuity vycházejících ze svahu	8
Obr. 3	Pohyb horninového klínu a jeho silové působení, [2]	9
Obr. 4	Určení nebezpečné smykové plochy při diskontinuitách zapadajících do masívu	10
Obr. 5	a) Smyková plocha při prostoupení masívu více systémy ploch nespojitosti, b) Smyková plocha při velmi strmě zapadajících plochách nespojitosti, l - normála e směru ploch diskontinuity ..	10
Obr. 6	Řešení napjatosti metodou sítí, [2]	12
Obr. 7	Nahrazení skalního tělesa patrovým rámem při řešení napjatosti podle Folbertha, [2] ..	13
Obr. 8	Řešení napjatosti skalního tělesa metodou konečných prvků, [2]	15
Obr. 9	Kotvení skalního svahu, Budčice I	18
Obr. 10	Schéma a pojmenování částí kotvy	19
Obr. 11	Gabionová konstrukce, Silnice I/11 Mokré Lazce – Ostrava, [17]	23
Obr. 12	Plomba Lázně Kynžvart, [15]	24
Obr. 13	Podezdívka Dolní Žleb, [15]	25
Obr. 14	Optimalizace traťového úseku Krasíkov - Česká Třebová, tunel krasíkov 2, [19]	28
Obr. 15	Obkladní zeď, ŽST Praha Bubeneč 4 SK, [16]	29
Obr. 16	Ochranné sítě – aktivní, sanace skalního svahu Budčice II	31
Obr. 17	Ochranné sítě – pasivní, sanace skalního svahu Budčice I	32
Obr. 18	Ochranné záchytné ploty, sanace skalního svahu Budčice II	33
Obr. 19	Polodynamická bariéra, Sanace skalního svahu Budčice I	34
Obr. 20	Galerie, Bormio, [18]	35
Obr. 21	Lokalizace stavby Budčice II v km 21,800 – 22,300300 v úseku Vlastějovice - Ledec nad Sázavou (//////) a zaznačení km 21,933 (o)	36
Obr. 22	Geometrie gabionové konstrukce	38
Obr. 23	Skutečné provedení sanace, Budčice II	41

8. Seznam vzorců

Vzorec (1)	Stupeň bezpečnosti
Vzorec (2)	Vlastní tíha bloku
Vzorec (3)	Tangenciální síla aktivně porušující klín podél předurčené plochy
Vzorec (4)	Tření na předurčené smykové ploše
Vzorec (5)	Síly na smykové ploše
Vzorec (6)	Stabilita horninových klínů
Vzorec (7)	Airyho funkce

9. Seznam tabulek

Tabulka 2	Síly působící na konstrukci
-----------	-----------------------------

10.Seznam příloh

Příloha 1 Výstup z programu GEO5: Výpočet dle Bishopovy metody (smyková plocha po optimalizaci)

Příloha 2 Výstup z programu GEO5: Výpočet dle Pettersonovy metody (smyková plocha po optimalizaci)

Příloha 3 Fotodokumentace zajištění stability skalního svahu v úseku Budčice II v km 21,933