VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

SROVNÁNÍ ANALYTICKÝCH METOD PRO VÝPOČET STABILITY SVAHU

A COMPARISON OF ANALYTICAL METHODS FOR SLOPE STABILITY ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE Ivana Líšková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Mirnela Džaferagić
SUPERVISOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ivana Líšková
Název	Srovnání analytických metod pro výpočet stability svahu
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Mirnela Džaferagič
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....	.....
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D. Vedoucí ústavu	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Podklady budou studentovi předávány průběžně.
Literatura:
WEIGLOVÁ, K. (2007): Mechanika zemin. - Akademické nakladatelství CERM, VUT.Brno.,
ATKINSON, J.H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis.,
DUNCAN, J. MICHAEL, W., STEPHEN G. (2005): Soil Strength and Slope Stability. - UC Berkeley Transportation Library.
PAVLÍK, J., AMBROŽ, J., (1987): Výpočtové metody stabilního posuzování sesuvu – MS. Univerzita Karlova. Praha.

Zásady pro vypracování

Úkolem autora bakalářské práce je popsat analytické metody výpočtu stability svahu (např. metoda: Pettersonova, Bishopova, Janbuova, Spencerova, Sarmova atd.). Při vypracovávání bakalářské práce (BP) vycházejte ze zadaných podkladů, pokynů vedoucího BP a odborné literatury. Při zpracování BP je nutno se držet následujících zásad:
1.Současný stav problematiky, rešerše odborné literatury.
2.Vliv podzemní vody na stabilitu svahu.
3.Výpočet stability svahu na konkrétním přikladu
4.Komparativní analýza uvedených metod

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

Ing. Mirnela Džaferagič
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Úlohou bakalářské práce je porovnat analytické metody výpočtu stability svahů.
V práci je provedená analýza stupně stability modelového svahu v programu GEO5 aj analýza bez použití softwaru. Výpočet stupně stability je realizovaný pomocí různých metod a následně sú výsledky jednotlivých metod porovnané.

Klíčová slova

Stabilita svahu, stupeň stability, smykové parametry, smyková plocha, sesuvy, Pettersonova metoda, Bishopova metoda, Janbuova metoda, program GEO5

Abstract

Main goal of this bachelor´s thesis is to compare analytical methods for calculation of slope stability. This work is analyzing safety level for model slope by using calculation software GEO5 and also without using a software. Analysis is realized by using different methods. Output of the work is comparison of results of safety factor.

Keywords

Slope stability, safety factor, shear parameters, slip surface, landslide, Petterson method, Bishop method, Janbu method, software GEO5

Bibliografická citace VŠKP

Ivana Líšková *Srovnání analytických metod pro výpočet stability svahu.* Brno, 2015. 43 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Mirnela Džaferagić.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2015

……

podpis autora
Ivana Líšková

Poďakovanie

Rada by som využila príležitosť a poďakovala sa vedúcej mojej bakalárskej práce pani Ing. Mirnele Džaferagić a pani Ing. Věře Glisníkovej, CSc. za poskytnuté materiály, rady a venovaný čas. Ďalej by som chcela poďakovať svojej rodine za pomoc a podporu a môjmu priateľovi za pevné nervy pri prebdených nociach, za to, že bol mojou bútľavou vŕbou a povzbudil ma, kedykoľvek som to potrebovala. Všetkým ďakujem za ich trpezlivosť počas štyroch rokov môjho štúdia, a za to, že to so mnou počas písania práce vydržali.

Táto bakalárska práca bola spracovaná s využitím infraštruktúry Centra AdMaS.

Ivana Líšková

OBSAH

1. Úvod - 9
   1.1. Cieľ bakalárskej práca - 10
2. Stabilita - 10
   2.1. Zosuvy - 10
   2.2. Stupeň stability - 16
   2.3. Parametre potrebné k výpočtu stability - 16
   2.4. Tvar šmykovej plochy - 18
3. Metódy výpočtu - 24
   3.1. Petterson - 24
   3.2. Bishop - 25
   3.3. Janbu - 26
   3.4. Sarma - 28
   3.5. Morgernsten-Pierce - 29
   3.6. Spencer - 30
   3.7. Porovnanie metód - 31
   3.8. Numerická analýza - 32
4. Praktická aplikácia - 33
   4.1. Geometria riešeného svahu - 33
   4.2. Petterson - 33
   4.3. Bishop - 34
   4.4. GEO 5 - 35
5. Záver - 37
6. Zoznam použitej literatúry - 38
7. Zoznam použitých skratiek - 40
8. Zoznam príloh - 43
9. Prílohy - 44

1. ÚVOD

1.1. Cieľ bakalárskej práce

Predkladaná bakalárska práca s názvom ,,Srovnání analytických metod pro výpočet stability svahu“ má snahu porovnať rôzne metódy výpočtu stability a ich výsledky. Popisuje, čo je to stabilita svahu, stupeň stability, aké sú základné tvary šmykových plôch, ale aj čo sú to zosuvy, ich rozdelenie, či základné príčiny vzniku zosuvov. V práci sú taktiež popísané jednotlivé metódy výpočtu stupňa stability. Výstupom práce je nájdenie stupňa stability zadaného svahu a následné porovnanie výsledkov jednotlivých metód. Riešenie je realizované pomocou výpočtu bez použitia počítačového softwaru aj pomocou softwaru GEO5.

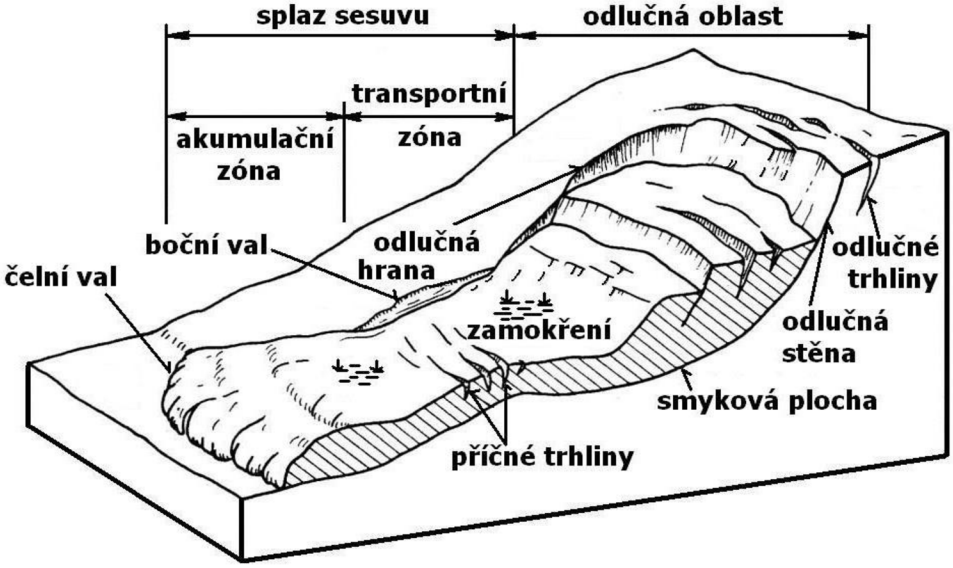
Zisťovanie stupňa stability na modelovom svahu bez použitia softwaru je v práci z dôvodu náročnosti výpočtu jednotlivých metód realizované len pomocou Pettersonovej a Bishopovej metódy. V programe GEO5 je stupeň stability spočítaný všetkými popisovanými metódami. Tými sú metóda Janbu, Sarma, Morgenstern-Price a Spencer ale aj jednoduchšie metódy Petterson a Bishop.

2. STABILITA SVAHU

Svahy predstavujú jeden z najčastejších terénnych prvkov. Pri hĺbení stavebných jám, budovaní násypov, zárezov a výkopoch sa často stretávame s problémom určenia sklonu svahu tak, aby nedošlo k jeho porušeniu. Stupeň stability svahov sa posudzuje hlavne z dôvodu optimalizácie návrhu sklonu svahu a to ako z hľadiska bezpečnosti, tak aj z hľadiska množstva výkopových prác, presunu zeminy a z hľadiska záberu pôdy. Sklon má byť čo najstrmší, aby sa minimalizovali objemy výkopov a aby bol minimalizovaný potrebný priestor v okolí stavby. Zároveň však svah musí byť stabilný, aby sa zabezpečila ochrana životov a zdravia pracovníkov. Pri porušení stability dochádza k zosuvu pôdy z dôvodu prekročenia šmykovej pevnosti zeminy.

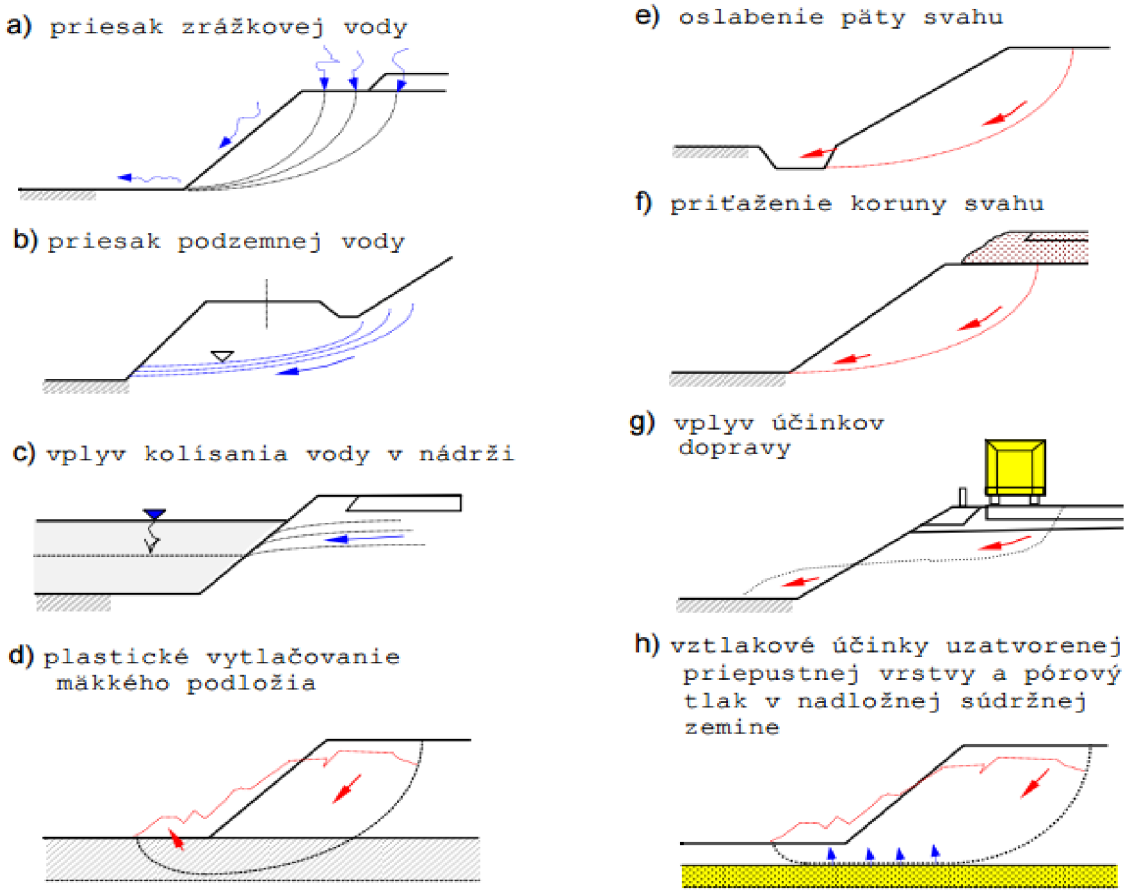
2.1. Zosuvy pôdy

K zosuvom dochádza, ak stupeň stability svahu klesne pod hodnotu určenú pre daný typ zeminy, z ktorej sa svah skladá, hlavne však, keď klesne pod hodnotu 1. Z geologického hľadiska žiadny svah nie je trvalo stabilný. Zosuv nemusí prebiehať jednorazovo, môže sa etapovito obnovovať. Svahovými zosuvmi sa rozumie premiestňovanie zemín a hornín z vyšších polôh svahu do nižších polôh svahu. Časti zosuvu sú zobrazené na obrázku 1. V zaľudnených oblastiach majú veľmi negatívne až tragické následky. Poškodzujú a ničia hospodársky majetok a poľnohospodárku pôdu, cestné komunikácie, železničné trate, poškodzujú lesy a menia hydrologické pomery postihnutej oblasti.



Obr.1: Časti zosuvu. [11]

Príčiny vzniku zosuvu sú rôzne (obr.2). Častým faktorom je vplyv vody. Zatekanie zrážkovej vody, kolísanie hladiny vody v nádržiach a korytách riek ale aj zamŕzanie vody v póroch, bobtnanie zeminy a podobne. Ďalšími faktormi sú vibrácie, sklon svahu ale aj zvetrávanie hornín a zmeny vo vegetačnom poraste svahu.



Obr.2: Príčiny vzniku zosuvu pôdy. [14]

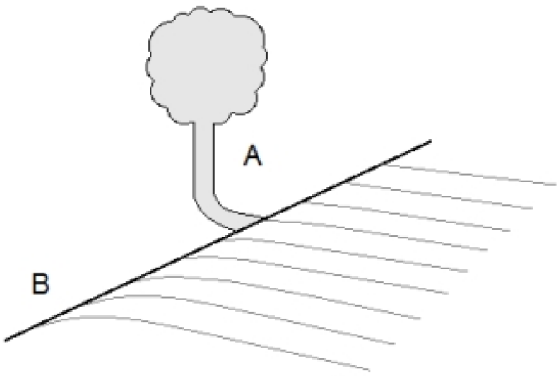
Svahové pohyby delíme podľa rýchlosti svahových pohybov na:

- plazenie (creep)
- zosúvanie (sliding)
- stekanie (flow)
- rútenie (fall)

2.1.1. Plazenie

Veľmi pomalý dlhodobý pohyb, pri ktorom je väčšinou hranica voči nezosunutému podložiu nezreteľná. Je prirodzeným procesom, ktorý prebieha takmer na všetkých svahoch. Samo o sebe nepredstavuje riziko, ale narúša štruktúru svahu. Je prípravnou fázou pre všetky druhy svahových pohybov. Rýchlosť plazenia sa pohybuje od 1 mm do 10 m za rok, preto sú výsledné formy plazenia málo výrazné. Rozlišujú sa dva hlavné typy

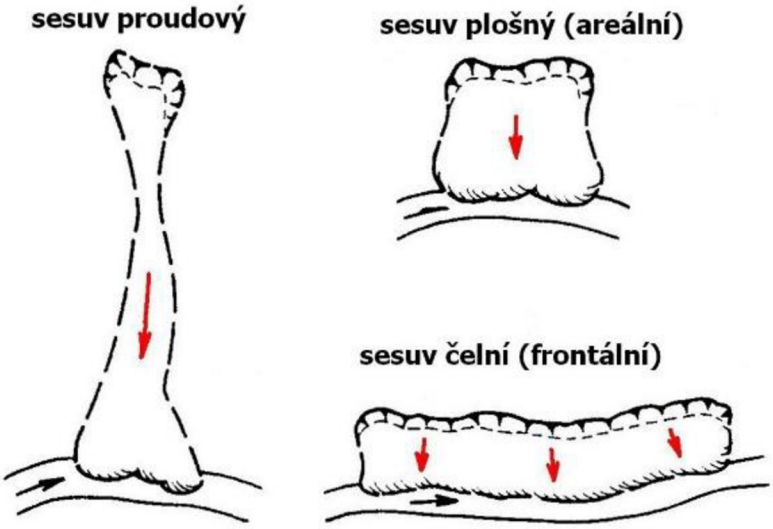
plazenie: *hlbinné* (deformovanie hornín v hĺbkach niekoľko desiatok až stoviek metrov) a *povrchové* (po svahu pomaly steká iba povrchová vrstva svahovín). Creep, teda plazenie, je možné určiť podľa dvoch charakteristických prejavov svahu (obr.3). Prvým sú tzv. *opité stromy* a druhým *hákovanie vrstiev*.



Obr.3: Dva prejavy plazenia. Opité stromy (A) a hákovanie vrstiev (B).

2.1.2. Zosúvanie

Zaraďuje sa medzi najčastejšie svahové poruchy. Relatívne rýchly krátkodobý kĺzavý pohyb horninových hmôt po svahu pozdĺž jednej zreteľnej alebo viacerých priebežných šmykových plôch. Rýchlosť zosuvu sú centimetre až metre za deň. Pre zosúvanie je charakteristické nasunutie časti hmôt na pôvodný terén v predpolí. Podľa tvaru šmykovej plochy určujeme tri hlavné druhy zosuvu, rotačný, planárny a kombinovaný (obr.4). Podľa pôdorysného tvaru na plošné, prúdové a frontálne zosúvanie.



Obr.4: Zosuvy podľa pôdorysu. [11]

2.1.3. Stekanie

Stekaním sú označované rýchle krátkodobé pohyby s rýchlosťou metre až kilometre za hodinu. Obvykle sú horninové hmoty vo viskóznom stave (mury, sely) avšak môže ísť aj o pohyb suchých úlomkov (suché mury, skalné lavíny). Podstatná časť hmôt vytečie z odlučného priestoru (odlučnej jamy) a premiestni sa po povrchu terénu do veľkých vzdialeností. Stekajúce hmoty sú ostro oddelené od neporušeného podložia. Výslednou formou stekania je prúd. V konečnej fáze vývoja môže prejsť do pomalého plazenia. Stekanie sa vyskytuje hlavne v období nadmerných zrážok alebo v období topenia sa snehu. Rozlišujeme zemné prúdy, bahenné prúdy, bahnotoky, balvanité prúdy, sneho-kamenité lavíny a podobne.

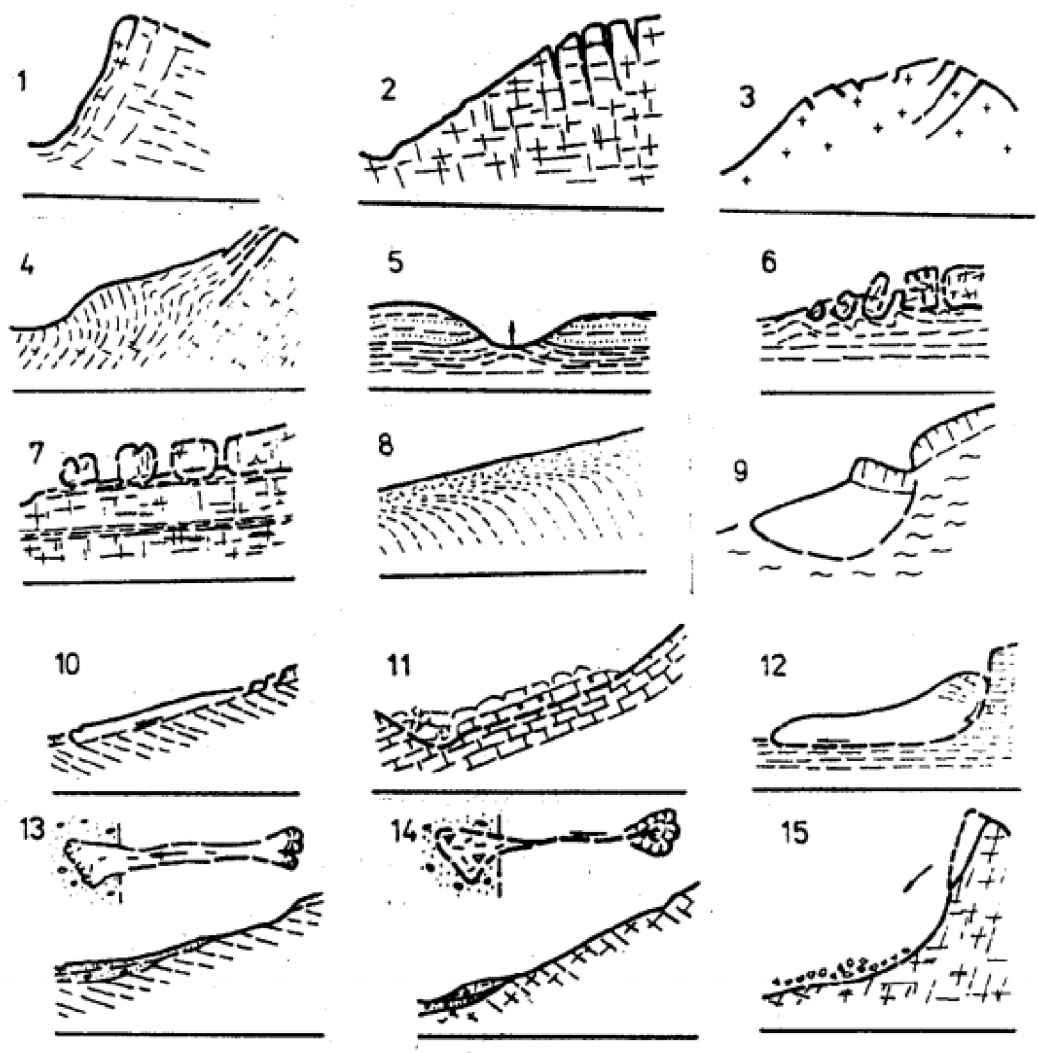
2.1.4. Rútenie

Rútením sa rozumie náhly krátkodobý svahový pohyb s rýchlosťou rádovo v metroch za sekundu, pri ktorom dochádza k voľnému pádu postihnutých hmôt, ktoré strácajú kontakt s terénom. Skôr ako hmota stratí kontakt s terénom, môže dochádzať k plazivým pohybom. Príčinou vzniku tohto svahového pohybu bývajú strmé svahy, erózia a prítomnosť puklín.

Rútenie najčastejšie vzniká na skalných stenách vysokých horských svahov (skalné rútenie). Sutinová lavína je podobná blokovo-bahennému prúdu s tým rozdielom, že nie je saturovaná vodou.

V závislosti na podobe rútenia sa rozlišujú nasledujúce typy:

- Zosypávanie - presun drobných suchých úlomkov hornín a zemín gúľaním a váľaním sa či poskakovaním po svahu.
- Opadávanie úlomkov - náhly presun zemín a úlomkov hornín voľným pádom, nasledované valením a posúvaním sa úlomkov po svahu.
- Odvalové rútenie - materiál najprv odpadá od materského masívu, po ktorom nasleduje voľný pád a hromadí sa pri päte svahu, odkiaľ sa ďalej pohybuje do údolia v podobe skalného prúdu.
- Planárne rútenie - začína ušmyknutím časti skalnej steny po planárnej ploche na okraji strmého svahu a pokračuje voľným pádom a kĺzaním.

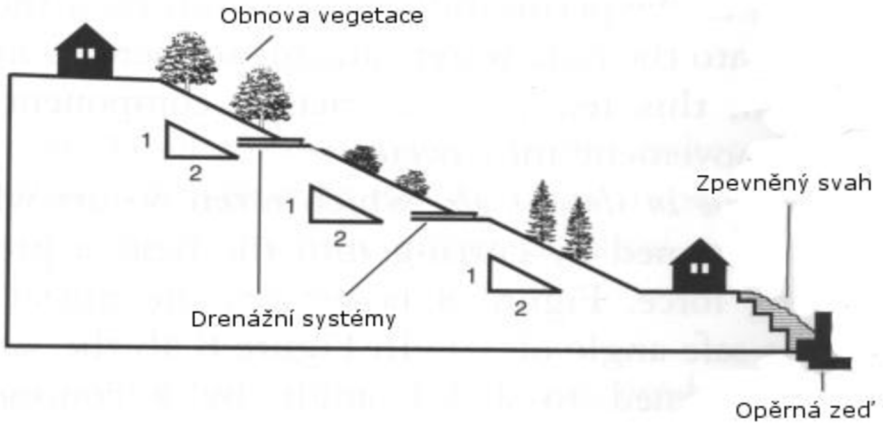


Obr.5: Typy svahových pohybov. 1, 2, 3- rozvoľňovanie horských masívov; 4- gravitačné zhrnutie; 5- údolná antiklinála; 6, 7- kerné deformácie; 8- povrchové plazenie; 9- rotačný zosuv; 10, 11- planárny zosuv; 12- rotačný planárny zosuv; 13- zemný prúd; 14- kamenitý prúd; 15- skalné rútenie. [9]

2.1.5. Prevencia svahových pohybov

K zabráneniu alebo obmedzeniu svahových pohybov používame rôzne metódy (obr.6).

- Úprava profilu svahu zmenšením sklonu.
- Odvodnenie svahu pomocou drenážnych systémov pre povrchovú aj podpovrchovú vodu.
- Obnovenie rastlinného pokryvu. Koreňový systém spevňuje svahový materiál a zároveň pôsobí ako prírodná drenáž.
- Bezpečnostné stavby ako sú piliere a ochranné steny môžu zabrzdiť posun hmôt.
- Iné metódy prevencie zahrňujúce napríklad chemickú stabilizáciu alebo spevňovanie svahu cementom a inými materiálmi.



Obr.6: Možnosti zaistenia svahu proti zosuvom. [4]

Obr.7: Zosuv svahu vo Vrátnej doline (SK) – 24. 7. 2014

príčina zosuvu - extrémne zrážky. [18]

Obr.8: Skalný zosuv na cestu pri Zell am See (A) – 14. 5. 2013

príčina zosuvu - dlhá zima, topiaci sa sneh, dažde. [17]

2.2. Stupeň stability

Cieľom každej analýzy stability svahu je nájdenie geometrického tvaru šmykovej plochy a zistenie stupňa stability Fs. Ten sa definuje ako pomer pasívnych síl brániacim zosuvu k aktívnym silám, ktoré zosuv vyvolávajú, respektíve ako pomer maximálnej šmykovej pevnosti τ a mobilizovanej šmykovej pevnosti τ_{red} na predom definovanej šmykovej ploche. $Fs = \frac{\tau}{\tau_{red}}$

Tab.1: Najmenší požadovaný stupeň bezpečnosti. [8]

ZÁREZ			
Zemina		**Šmykové parametre (efektívne)**	**Stupeň bezpečnosti**
Jemnozrnná		vrcholové kritické reziduálne	1,5 1,15 1,1
Hrubozrnná		vrcholové kritické	1,2 1,15
Skalná hornina		vrcholové kritické	1,3 1,15
NÁSYP			
Podložie násypu	**Sypanina**	**Šmykové parametre podložia**	**Stupeň bezpečnosti**
Únosné	jemnozrnná	efektívne vrcholové efektívne kritické	1,3 1,15
	hrubozrnná	efektívne vrcholové efektívne kritické	1,2 1,15
	kamenitá	efektívne vrcholové	1,2
Málo únosné	jenmozrnná	totálne efektívne kritické	1,5 1,2
	hrubozrnná	totálne efektívne kritické	1,5 1,2

Požadovaný stupeň stability pre stabilný svah je Fs>1.

Pre nesúdržné piesčité zeminy Fs≥1,2

Pre súdržné ílovité zeminy Fs≥1,5

Ak sa na svahu nachádza stavebný objekt Fs=2,2 až 3,0.

2.3. Parametre potrebné k výpočtu

Pre výpočet stability sú okrem geometrie potrebné hlavne 2 parametre charakterizujúce šmykovú pevnosť zeminy.

Uhol vnútorného trenia *φ* popisujúci odpor proti treniu a súdržnosť *c*.

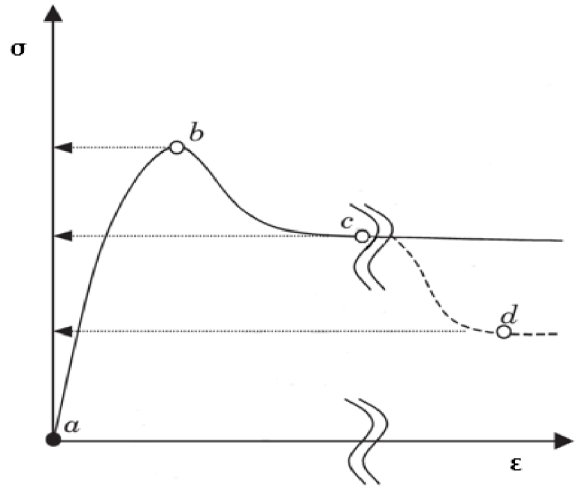
Stabilita veľmi úzko súvisí s rovnováhou pórových tlakov. Z časového hľadiska a z hľadiska vyrovnania pórových tlakov sa stabilita delí na krátkodobú a dlhodobú. Závisí hlavne na tom, či je svah zo zeminy priepustnej alebo zeminy nepriepustnej. Stabilita je ovplyvnená

vlastnosťami pôdy (hlavne jej šmykovou pevnosťou), prúdiacou vodou, zaťažením v blízkosti svahu, a taktiež výškou svahu.

Krátkodobá stabilita je daná totálnymi parametrami φ_u, c_u. Uvažujeme s ňou pri neodvodnených podmienkach, kedy nie sú vyrovnané pórové tlaky. Jedná sa o krátkodobé násypy, zárezy a stavebné jamy. Sklony svahu môžu byť strmšie.

Dlhodobá stabilita závisí na efektívnych parametroch φ_{ef}, c_{ef}. Určuje sa hlavne pri prirodzených svahoch, pri zárezoch a násypoch dopravných stavieb, vyžaduje sa taktiež pri vodohospodárskych stavbách.

Pri zeminách rozlišujeme šmykovú pevnosť vrcholovú, kritickú a reziduálnu, ktoré sú znázornené na nasledujúcom obrázku (obr.9), kde *b* označuje vrchlovú šmykovú pevnosť, *c* označuje kritickú pevnosť a bod *d* je charakteristický pre reziduálnu šmykovú pevnosť zeminy.



Obr.9: Charakteristické fázy šmykovej pevnosti. [12]

Pod šmykovou pevnosťou najčastejšie rozumieme vrcholovú šmykovú pevnosť zeminy τ_f, ktorú vieme určiť podľa vzorca

$$\tau_f = \sigma_f \cdot tg(\varphi) + c\,;$$

kde σ_f je normálové napätie pôsobiace kolmo na šmykovú plochu porušenia, φ uhol vnútorného trenia pre vrcholovú šmykovú pevnost a c je súdržnosť zeminy pre vrcholovú šmykovú pevnosť.

Reziduálnu pevnosť zisťujeme v prípade, keď riešime podmienky stability takého zemného telesa, na ktorom v minulosti došlo k dlhšiemu pohybu po šmykovej ploche. V takom prípade je vhodné vo výpočte uvažovať s hodnotou súdržnosti c=0.

Stav, kedy sú šmykové napätia v zemine $\tau < \tau_f$ považujeme za bezpečný.

2.4. Tvar šmykovej plochy

Pre výpočet stupňa stability je potrebné poznať tvar šmykovej plochy. Približný geometrický tvar dokážeme odhadnúť z geologického profilu posudzovaného svahu.

Tvar, aký môže šmyková plocha nadobudnúť:

a) rovinná šmyková plocha

b) zaktivená šmyková plocha - kruhová (valcová)

- obecná (polygonálna)

ROVINNÁ ŠMYKOVÁ PLOCHA

Rovinná šmyková plocha je typická pre sypké nesúdržné zeminy.

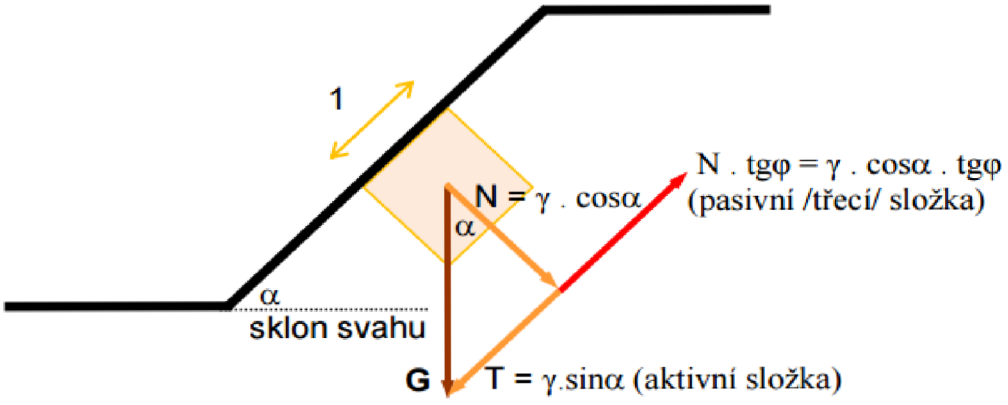
Svah bez pôsobenia vody sa považuje za stabilný, ak jeho sklon je menší ako uhol vnútorného trenia zeminy.

$$T \leq N.tg\varphi$$

$$\gamma.\sin\alpha \leq \gamma.\cos\alpha.\mathrm{tg}\,\varphi$$

$$tg\alpha \leq tg\varphi$$

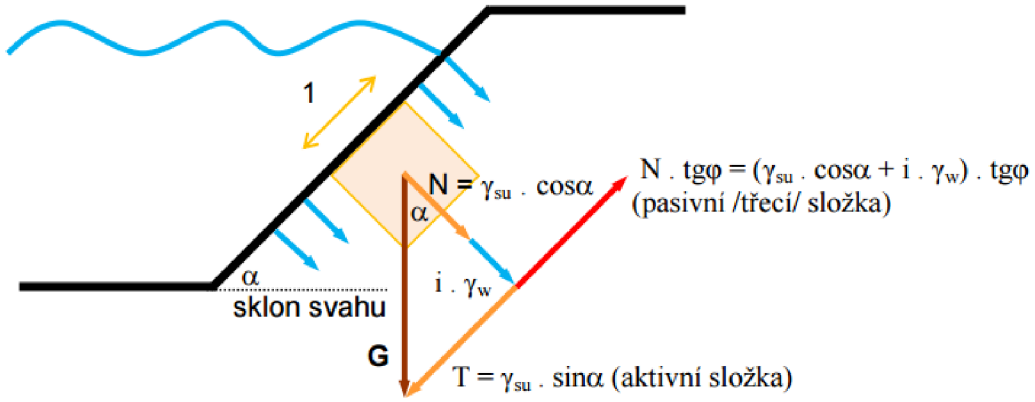
$$\alpha \leq \varphi$$



Obr.10: Svah z nesúdržných zemín bez pôsobenia vody. [13]

Ak voda presakuje kolmo do svahu (najstabilnejší prípad pre situáciu s vodou), je svah stabilný ak splňa podmienku:

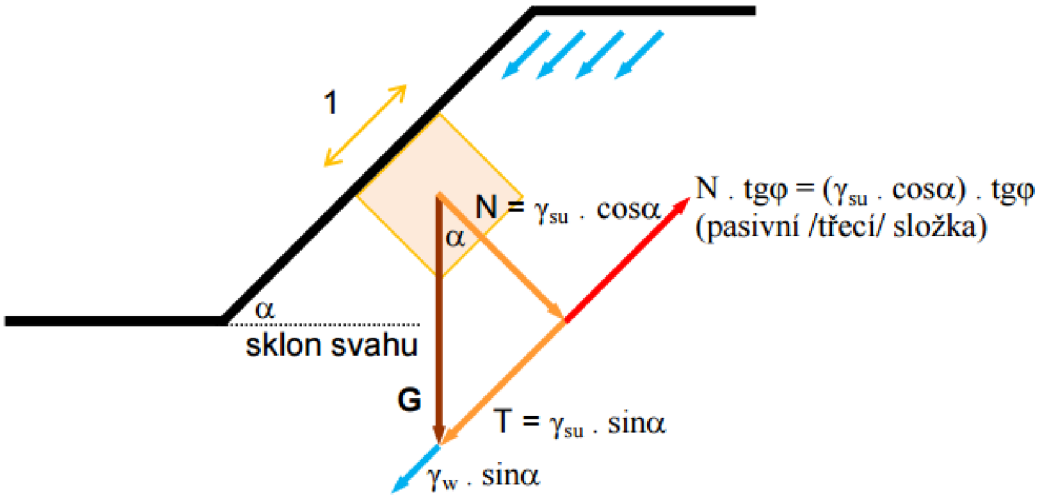
$$\gamma_{su}.\sin\alpha = (\gamma_{su}.\cos\alpha + \mathrm{i}.\gamma_w)tg\varphi$$



Obr11: Voda presakuje kolmo do svahu. [13]

Svah, ktorým presakuje voda rovnobežne s jeho sklonom bude stabilný pri zachovaní rovnosti:

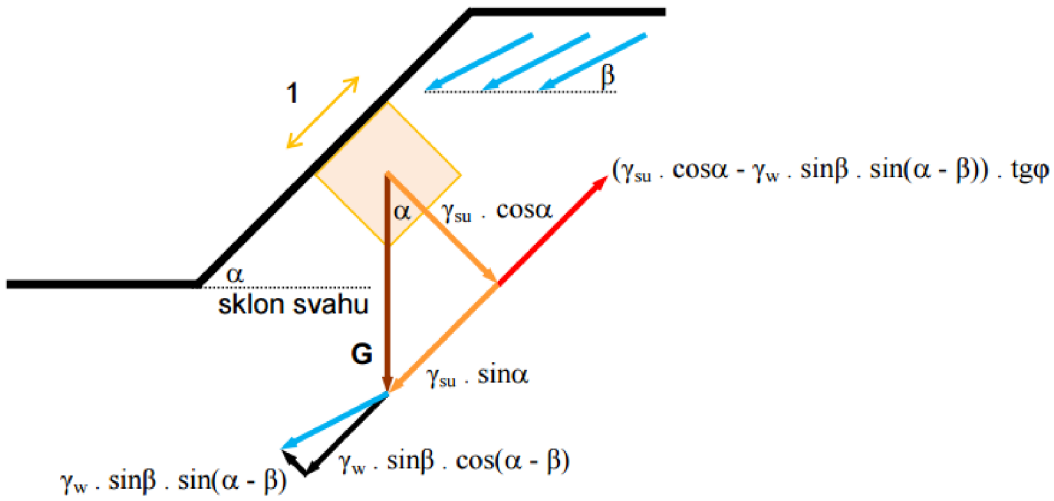
$$\gamma_{su}.\sin\alpha + \gamma_w.\sin\alpha = \gamma_{su}.\cos\alpha\, tg\varphi$$



Obr.12: Svahom presakuje voda, ktorá je rovnobežná s jeho sklonom. [13]

Ak svahom presakuje voda pod obecným uhlom, stabilita bude zachovaná po dodržaní podmienky:

$$\gamma_{su}.\sin\alpha + \gamma_w.\sin\beta.\cos(\alpha-\beta) \le [\gamma_{su}.\cos\alpha - \gamma_w.\sin\beta.\sin(\alpha-\beta)].tg\varphi$$



Obr.13: Svahom presakuje voda pod obecným uhlom. [13]

ZAKRIVENÁ ŠMYKOVÁ PLOCHA

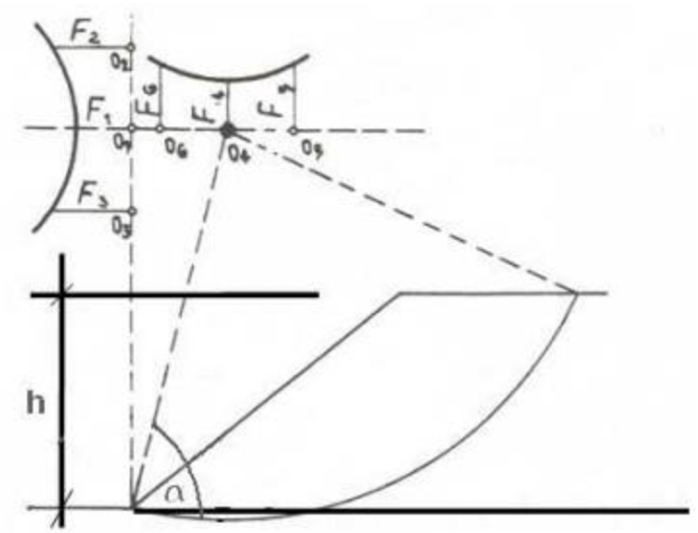
Pri svahoch zo súdržných zemín sa hovorí o zakrivenej tj. kruhovej alebo polygonálnej šmykovej ploche. Stupeň stability na týchto plochách sa väčšinou rieši pomocou prúžkových metód.

Pre posúdenie stability svahu musíme poznať tzv. nebezpečnú (kritickú) šmykovú plochu. Je to plocha, pri ktorej je pomer pasívnych síl k silám aktívnym minimálny, teda je to plocha, pri ktorej dostaneme najnižší stupeň stability.

Postup, ktorým zistíme kritickú šmykovú plochu sa nazýva optimalizácia. Na zistenie **kritickej kruhovej šmykovej plochy** existuje niekoľko metód. Nižšie je uvedený postup použitím troch rôznych spôsobov.

1) Podľa Pettersona

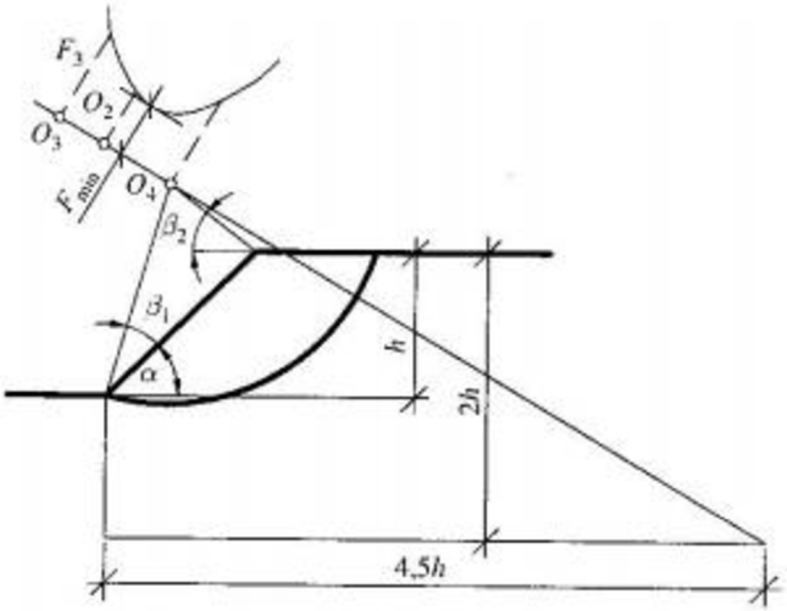
V prípade, že sa vlastnosti zeminy svahu v závislosti na výške menia, musíme hľadať najnebezpečnejšiu plochu postupným volením stredu otáčania a polomeru šmykovej plochy. Výsledný stred otáčania získame tak, že stredy hľadáme na dvoch navzájom kolmých priamkach (obr.14). Ku každému stredu vynesieme príslušný stupeň stability vypočítaný Pettersonovou metódou. Najprv preverujeme stupeň stability F pre stredy otáčania na zvislej priamke, ktorá prechádza pätou svahu. Vynesené hodnoty spojíme krivkou a v mieste vrcholu krivky vynesieme minimálny stupeň stability F. V tomto mieste vedieme vodorovnú priamku, na ktorej opäť volíme stredy otáčania. Takým istým spôsobom určíme minimálny stupeň stability a jemu odpovedajúci stred otáčania O. Tento bod je stredom kritickej šmykovej plochy.



Obr.14: Stanovenie kritickej šmykovej plochy podľa Pettersona. [1]

2) Podľa Fellenia

V závislosti na sklone α navrhovaného svahu odčítame z tabuľky 2 hodnoty β_1 a β_2. Pomocou týchto uhlov nájdeme bod, ktorým bude prechádzať priamka, na ktorej leží stred otáčania O. Druhý bod priamky je v hĺbke rovnej dvojnásobku výšky svahu meranej od vrchnej hrany svahu a vo vzdialenosti 4,5-násobku výšky svahu meranej od päty svahu.



Obr.15: Stanovenie kritickej šmykovej plochy podľa Fellenia. [1]

Tab.2: Uhly β_1 a β_2 pre rôzne sklony svahu α. [1]

tgα	1,73:1	1:1	1:1,5	1:2	1:3	1:5
α	60°	45°	33°41′	26°34′	18°25′	11°19′
β_1	29°	28°	26°	25°	25°	25°
β_2	40°	37°	35°	35°	35°	37°

Ak je uhol vnútorného trenia zeminy φ=0, stred otáčania šmykovej plochy je v priesečníku priamok vedených pod uhlami β_1 a β_2.

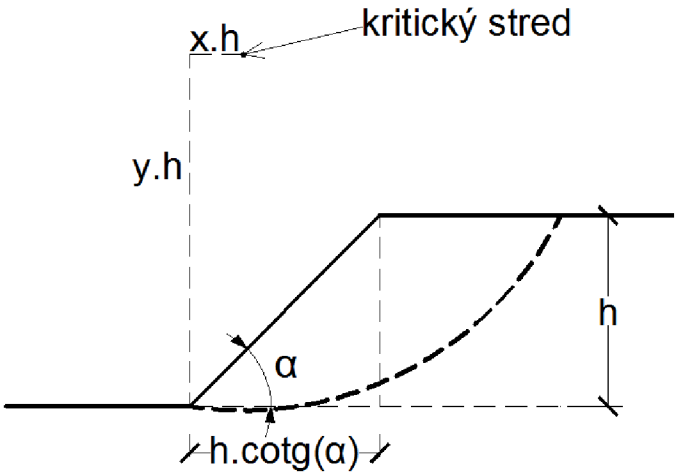
Keď je uhol vnútorného trenia zeminy φ>0, stred šmykovej plochy určíme obdobne ako pri Pettersonovi. K vynesenej krivke sa vedie dotyčnica rovnobežná s priamkou. V bode dotyku sa spustí kolmica na priamku a v mieste kríženia vznikne bod, ktorý je stred kritickej plochy (obr.15).

3) Podľa Rodrigueza

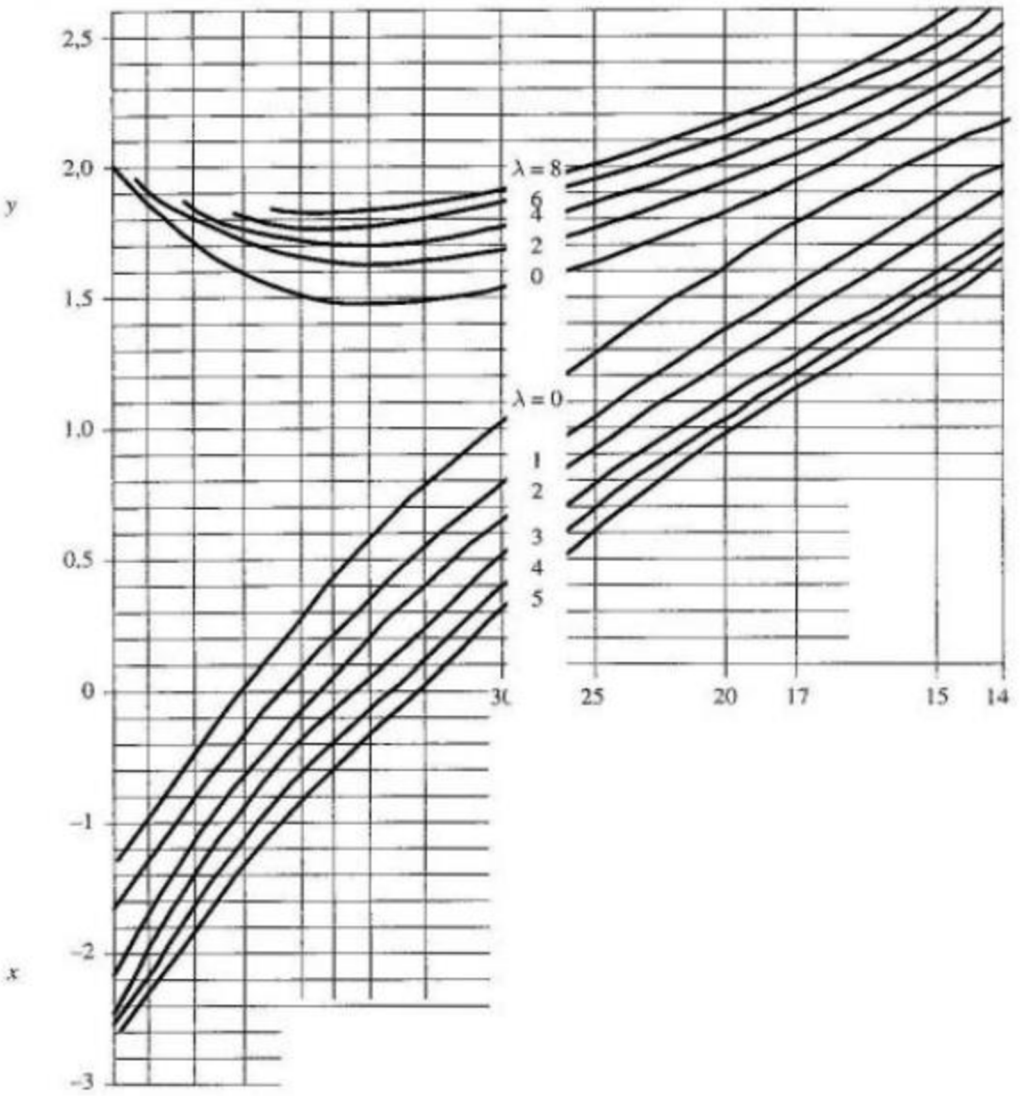
Používa sa na určenie kritickej plochy, iba keď sa nejedná o vrstvený svah. Stred kružnice je daný súradnicami x a y. Súradnice získame z grafu 1 podľa sklonu svahu a podľa vypočítanej hodnoty λ.

$$\lambda = \frac{\gamma . h . tg\varphi}{c}$$

Od päty svahu nanesieme hodnoty y·h a x·h a získame tak stred šmykovej plochy (obr.16).



Obr.16: Určenie stredu kružnice kritickej šmykovej plochy podľa Rodrigueza. [1]



Graf 1: Určenie veľkosti súradníc x, y, pre stanovenie stredu kritickej plochy podľa Rodrigueza. [1]

Optimalizácia kritickej **polygonálnej šmykovej plochy** prebieha postupným menením polohy jednotlivých bodov tejto plochy a zisťuje sa, ktorá zmena polohy daného bodu vedie k najväčšiemu zníženiu stupňa stability Fs. Krajné body sa pohybujú po povrchu terénu a vnútorné body menia polohu vo vodorovnom aj zvislom smere. Krok posunu je prvotne zvolený ako jedna desatina najmenšej vzdialenosti medzi susednými bodmi plochy. Každý ďalší krok sa zmenšuje na polovicu predchádzajúceho kroku.

3. METÓDY VÝPOČTU

Základná analýza stability svahov zahŕňa nájdenie kritickej šmykovej plochy a príslušného stupňa stability. V súčasnej dobe sú najviac používané metódy statickej analýzy svahu:

- ANALYTICKÉ – metódy medznej rovnováhy (LEM- Limit Equilibrium Methods)
  Petterson, Bishop, Janbu, atď.
- NUMERICKÉ – metóda redukcie pevnostných šmykových súčiniteľov
  (SRM- Strength Reduction Method)

3.1. Pettersonova metóda

Pettersonova metóda je najstaršia a najjednoduchšia metóda na výpočet stability svahu. V iných krajinách je známa ako Felleniova metóda, švédska metóda alebo tiež konvenčná prúžková metóda. Spočíva v nájdení kritického stredu šmykovej plochy, ktorá prechádza cez pätu svahu a následnom rozdelení plochy na zvolený počet prúžkov. Šmyková plocha má kruhový tvar. Počet prúžkov by sa mal pohybovať v rozmedzí 15-30 prúžkov. Základným predpokladom výpočtu je zjednodušenie. Okrem vlastnej tiaže zanedbávame všetky sily pôsobiace na prúžok. Úloha je riešená ako rovinná, na 1 meter dĺžky svahu.

V priesečníku šmykovej plochy so zvislou ťažiskovou osou pôsobí sila od vlastnej tiaže príslušného prúžku (obr.17). Tú vypočítame ako plochu prúžku vynásobenú objemovou tiažou zeminy. Túto vlastnú tiaž W následne rozdelíme na normálovú zložku N a tangenciálnu zložku T pomocou vzťahov:

$$W_i = \gamma * A_i$$

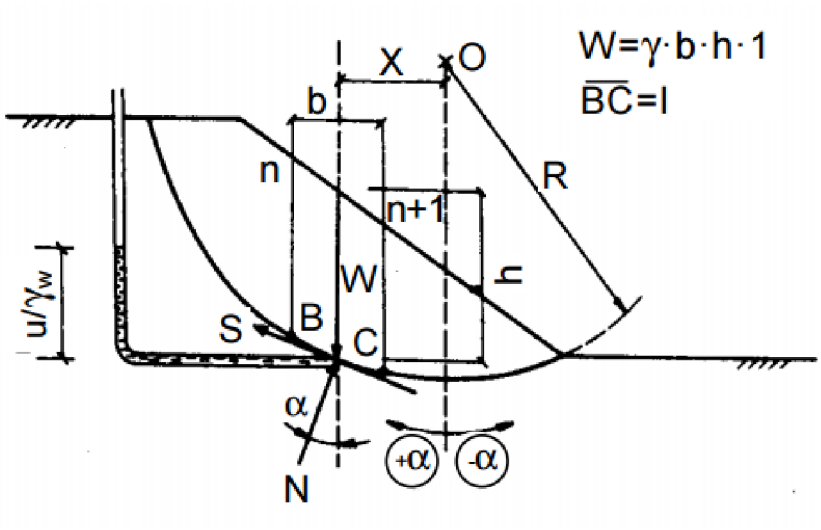
$$N_i = \frac{W_i}{\cos(\alpha_i)}$$

$$T_i = W_i * tg(\alpha_i)$$

Uhol *α* je uhol medzi spojnicou stredu šmykovej plochy s bodom pôsobenia vlastnej tiaže daného prúžku a zvislej osi daného prúžku.

Stupeň stability počítame ako pomer pasívnych momentov k aktívnym momentom.

$$Fs = \frac{M_p}{M_a}$$



Obr.17: Riešenie stupňa stability Pettersonovou metódou. [7]

Výsledný vzťah na výpočet stupňa stability je

$$Fs = \frac{\sum_i \left[(N_i - u_i \cdot l_i) \cdot tg(\varphi_i) + c_i \cdot l_i \right]}{\sum_i T_i} ,$$

kde N_i- normálové sily od jednotlivých prúžkov

φ_i - uhol vnútorného trenia zeminy daného prúžku,

c_i – súdržnosť zeminy daného prúžku

l_i - dĺžka šmykovej plochy daného prúžku

u_i – pórový tlak na prúžku

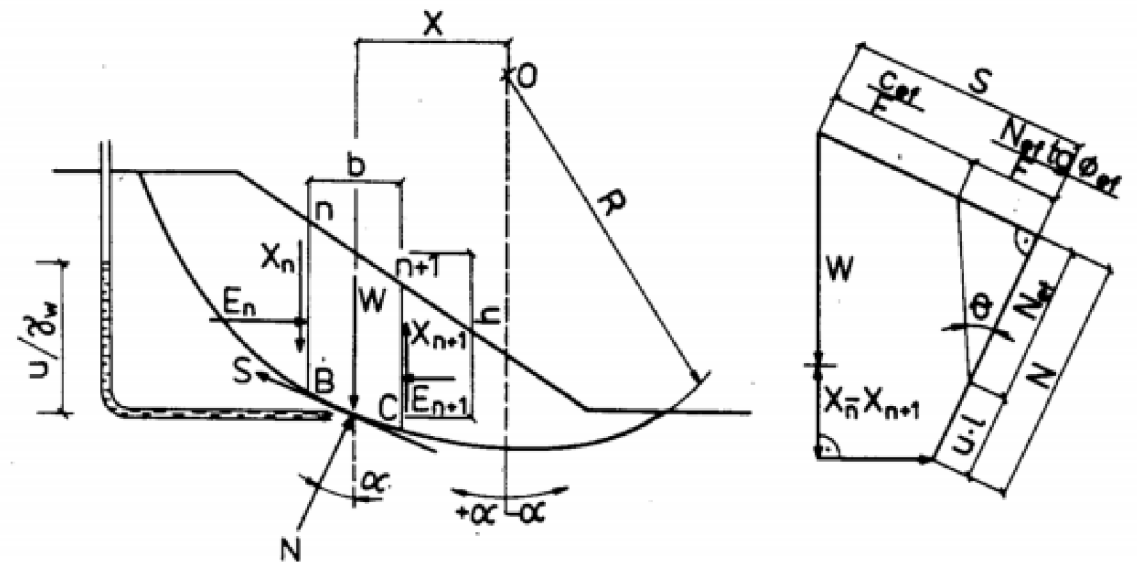
$\sum T_i$ - súčet všetkých tangenciálnych síl jednotlivých prúžkov.

Výhodou Pettersonovej metódy je priamy výpočet stupňa stability.

3.2. Bishopova metóda

Zjednodušená Bishopova metóda je taktiež založená na kruhovej šmykovej ploche a na jej rozdelení na prúžky. Vznikla úpravou Pettersonovej metódy, a to tak, že okrem momentovej podmienky zaviedla rovnováhu síl pre jednotlivé prúžky aj pôsobenie vodorovných síl od susedných prúžkov. Predpokladá nulové šmykové sily medzi prúžkami (obr.18).

Je odvodená pre homogénne teleso bez pôsobenia vodorovného zaťaženia. Táto metóda je vhodná pre výpočet stability všetkých typov svahov. Používa sa však hlavne v hydrotechnickom staviteľstve.



Obr.18: Riešenie stupňa stability Bishopovou metódou. [7]

Výpočet stupňa stability je zložitejší ako pri Petterson-ovej metóde, pretože na jeho získanie je potrebná iterácia Bishopovej rovnice.

$$Fs = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin\alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot tg\varphi_i}{\cos\alpha_i + \frac{tg\varphi_i \cdot \sin\alpha_i}{Fs}}$$

Kde: W_i – vlastná tiaž jednotlivých prúžkov

α_i – sklon úseku šmykovej plochy jednotlivých prúžkov

c_i – efektívna hodnota súdržnosti zeminy

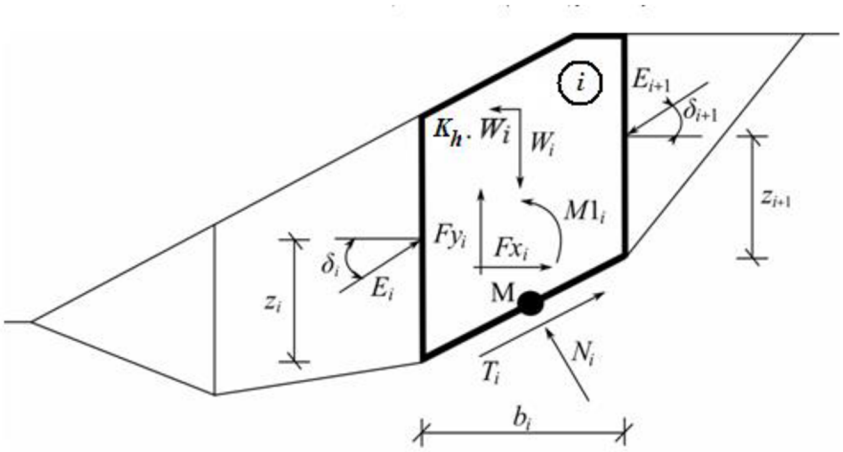
φ_i – efektívna hodnota uhlu vnútorného trenia zeminy

b_i – šírka jednotlivých prúžkov

u_i – pórový tlak na jednotlivých prúžkoch

3.3. Janbuova metóda

Janbuova metóda spadá do kategórie metód stanovujúcich stupeň stability na obecnej šmykovej ploche. Tá je opäť rozdelená na bloky. Rozdelením oblasti zeminy nad šmykovou plochou deliacimi rovinami vznikajú jednotlivé bloky (obr.19). Metóda uvažuje s nenulovými silami medzi blokmi a je založená na splnení rovnováhy síl a momentov na jednotlivých blokoch. Nie je splnená iba momentová podmienka na poslednom najvrchnejšom bloku.



Obr.19: Riešenie stupňa stability Janbuovou metódou. [7]

Pri výpočte rovnováhy síl a momentov na blokoch musia byt zavedené nasledovné predpoklady:

- deliace plochy medzi blokmi sú vždy zvislé
- výslednica tiaže bloku W_i prechádza stredom i-tého úseku šmykovej plochy, tj. bodom M
- normálová sila N_i pôsobí v strede i-tého úseku šmykovej plochy, tj. v bode M
- poloha medziblokových síl z_i je na každom bloku odhadnutá, na začiatku a na konci šmykovej plochy je z=0

Voľba medziblokových síl z_i výrazne ovplyvňuje výsledok. Ak je pre daný svah zle zvolená poloha síl, nie je možné splniť podmienku rovnováhy na blokoch.

Stupeň stability vypočítame iteráciou vzťahu medziblokových síl:

$$Fs = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{c_{ef} + \left(\frac{T_i - T_{i+1} + W_i}{\Delta x_i} - u_i \right) \cdot tg\varphi'}{1 + \frac{tg\varphi' \cdot tg\alpha_i}{FS}} \cdot \Delta x_i \cdot \left(1 + tg^2\alpha_i\right)}{E_i - E_{i+1} + \sum_{i=1}^{n} \left[\Delta Q_i + \left(T_i - T_{i+1} + W_i\right) \cdot tg\alpha_i \right]}$$

Kde: c_{ef} – efektívna hodnota súdržnosti zeminy

W_i – tiaž bloku, vrátane priťaženia, ktoré má charakter tiaže

T_i – šmyková sila na šmykovej ploche daného bloku

T_{i+1} – šmyková sila na šmykovej ploche vedľajšieho bloku

u_i – pórový tlak na danom bloku

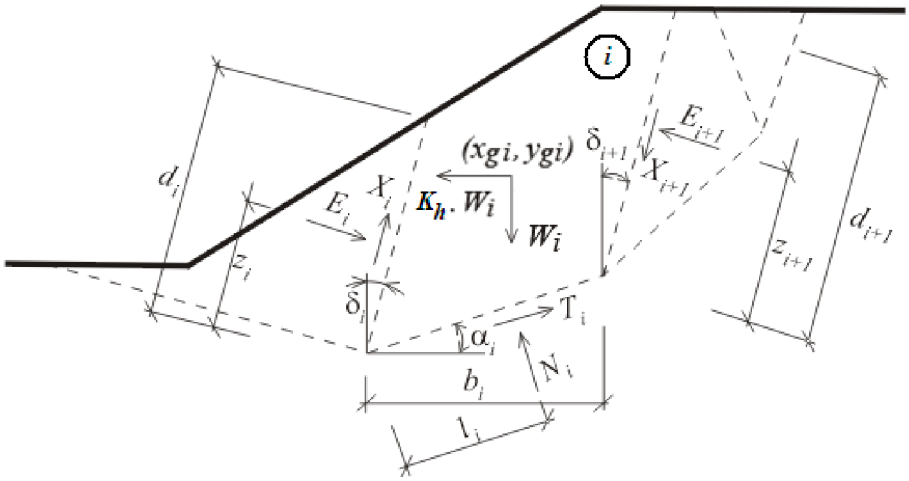
φ' – uhol vnútorného trenia zeminy

α_i – sklon šmykovej plochy daného bloku

E_i , E_{i+1} – sily, ktorými na seba pôsobia jednotlivé bloky

3.4. Sarmova metóda

Obecná prúžková metóda medznej rovnováhy založená na splnení rovnováhy síl a momentov na jednotlivých blokoch. Bloky vzniknú rozdelením oblasti zeminy nad šmykovou plochou rovinami, ktoré môžu mať rôzny sklon (obr.20).



Obr.20: Riešenie stupňa stability Sarmovou metódou. [7]

Do výpočtu limitnej rovnováhy vstupuje celkom 6n-1 neznámych, kde n je počet blokov, na ktorý sme šmykovú plochu rozdelili.

E_i – medziblokové sily

N_i – normálové sily na šmykovej ploche

T_i – šmykové sily na šmykovej ploche

X_i – šmykové sily medzi blokmi

z_i – polohy pôsobísk síl

l_i – polohy pôsobísk síl

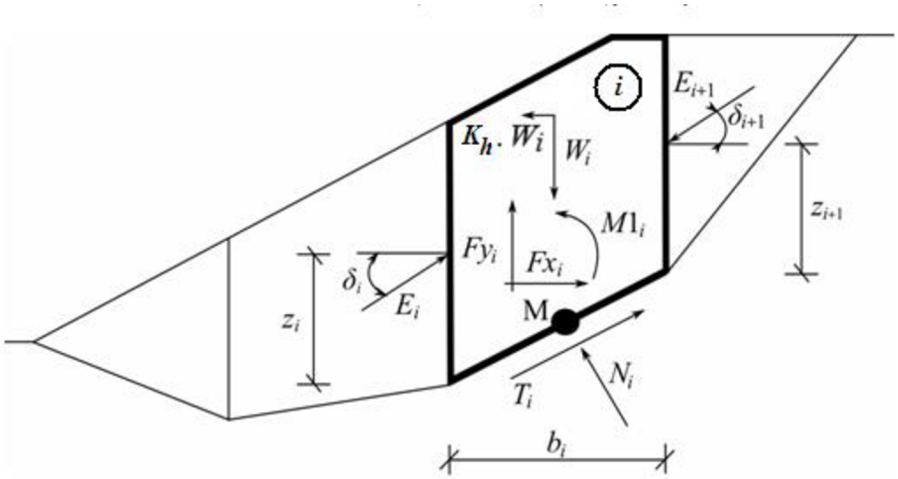
K_h – faktor vodorovného zrýchlenia

Pre výpočet týchto neznámych máme 5n-1 rovníc. Z toho vyplýva, že n-1 neznámych je potrebné odhadnúť. Pri odhade pôsobiska síl E_i dochádza k relatívne malej nepresnosti a vďaka tomuto odhadu sa problém stáva staticky určitým. To znamená, že vyriešením sústavy rovníc sa získajú ostatné neznáme. Hlavným výsledkom tohto riešenia je zistenie faktoru vodorovného zrýchlenia K_h.

Medzi faktorom vodorovného zrýchlenia a stupňom stability existuje závislosť, pomocou ktorej sa stupeň stability počíta. Do výpočtu sa zavedie tak, že sa ním redukujú parametre zeminy *c* a *tgφ*. Pre redukované parametre sa opätovne prevedie výpočet rovnováhy a tým sa získa faktor vodorovného zrýchlenia K_h. Táto iterácia sa opakuje tak dlho, kým sa tento zistený faktor K_h nerovná zadanej hodnote alebo nule. V bežnom prípade sa stupeň stability počíta pre nulovú hodnotu súčiniteľa K_h. Nenulová hodnota súčiniteľa K_h sa využíva pri vodorovnom zaťažení, napríklad pri zemetrasení.

3.5. Morgenstern-Priceova metóda

Táto metóda uvažuje s nenulovými silami medzi blokmi. Výslednice normálovej a šmykovej sily medzi blokmi majú rozdielny sklon na každom bloku. Priebeh uhlov na blokoch kopíruje polovičnú funkciu sínus. Morgenstern-Priceova metóda je rigorózna metóda, nakoľko spĺňa všetky tri podmienky rovnováhy.



Obr.21: Riešenie stupňa stability Morgenstern-Priceovou metódou. [7]

V každom bloku sa predpokladá pôsobenie síl:

W_i – tiaž bloku vrátane priťaženia

$K_h.W_i$ – vodorovná zotrvačná sila simulujúca účinky zemetrasenia

N_i – normálová sila na šmykovej ploche

T_i – šmyková sila na šmykovej ploche

E_i , E_{i+1} – sily, ktorými na seba pôsobia susedné bloky odklonené o uhol δ

Fx_i, Fy_i – ostatné vodorovné a zvislé sily pôsobiace na blok

Ml_i – moment od síl Fx_i a Fy_i, otáčajúci sa okolo stredu šmykovej plochy i-tého bloku – M

u_i – výslednica pórového tlaku na danom úseku šmykovej plochy

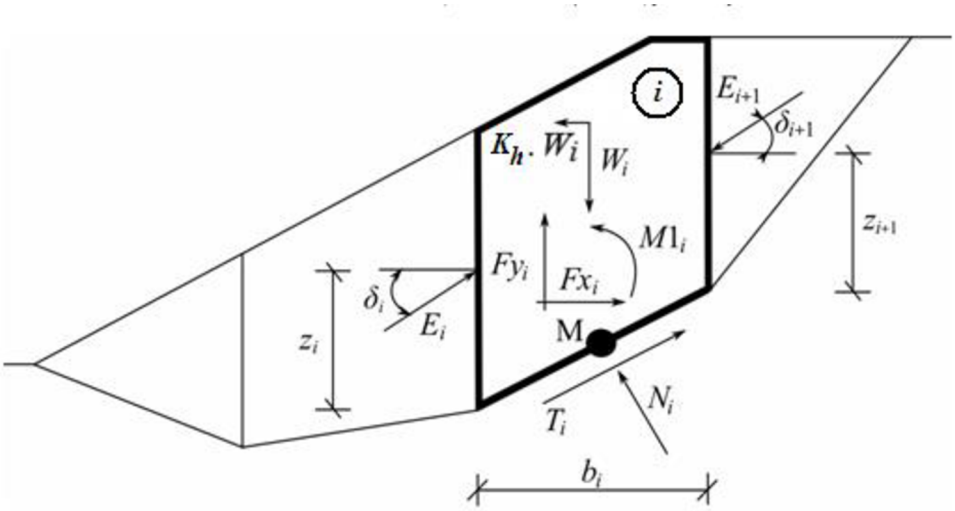
Pre výpočet limitnej rovnováhy síl a momentov na blokoch sa vychádza z nasledujúcich predpokladov:

- dielčie plochy medzi blokmi sú vždy zvislé
- výslednica tiaže bloku W_i prechádza stredom i-tého úseku šmykovej plochy, tj. bodom M
- normálová sila N_i pôsobí v strede i-tého úseku šmykovej plochy, tj. v bode M
- sklon medziblokových síl E_i je rozdielny na každom bloku a na začiatku a na konci δ=0

Výpočet stupňa stability Fs prebieha dvojnásobným iteračným postupom, iterovaním sklonu medziblokových síl a stupňa stability.

3.6. Spencerova metóda

Veľmi podobná Morgentern-Priceovej metóde. Taktiež vychádza z nenulových síl medzi blokmi, spĺňa všetky tri podmienky rovnováhy a stupeň stability sa získava iterovaním sklonu medziblokových síl a stupňa stability, avšak berie do úvahy konštantný sklon výsledníc šmykových a normálových síl medzi blokmi.



Obr.22: Riešenie stupňa stability Spencerovou metódou. [7]

Berieme do úvahy rovnaké sily pôsobiace na blok ako pri Morgernste-Priceovej metóde. Pri výpočte limitnej rovnováhy síl a momentov na blokoch sa vychádza z nasledujúcich predpokladov:

- dielčie plochy medzi blokmi sú vždy zvislé
- výslednica tiaže bloku W_i prechádza stredom i-tého úseku šmykovej plochy, tj. bodom M
- normálová sila N_i pôsobí v strede i-tého úseku šmykovej plochy, tj. bodom M
- sklon medziblokových síl E_i je konštantný pre všetky bloky, na začiatku a na konci $\delta=0$

Všeobecne platí, že rigorózne metódy ako Janbu, Sarma, Spencer a Morgenstern-Price konvergujú horšie ako jednoduchšie metódy, akými sú Petterson a Bishop. Problémy nastávajú pri príliš strmých úsekoch šmykovej plochy, pri zložitej geometrii, pri výraznom náraste zaťaženia. Jedným z riešení problémov pri výpočte je napríklad zadanie viacerých bodov do šmykovej plochy.

3.7. Porovnanie metód

Tab.3: Porovnanie metód 1.časť.

Metóda	Typ	Podmienka zvislých síl	Podmienka horizontálnych síl	Momentová podmienka	Prúžky
Petterson	zjednodušená	áno	nie	áno	vertikálne
Bishop	zjednodušená	áno	nie	áno	vertikálne
Janbu	zjednodušená	áno	áno	nie	vertikálne
Sarma	rigorózna	áno	áno	áno	vertikálne alebo ľubovoľne
Morgenstern-Price	rigorózna	áno	áno	áno	vertikálne
Spencer	rigorózna	áno	áno	áno	vertikálne

Tab.4: Porovnanie metód 2.časť.

Metóda	Podmienky rovnováhy	Tvar šmykovej plochy	Poznámka
Petterson	momentová	kruhový	neuvažuje vplyv susedných prúžkov
Bishop	momentová	kruhový	zanedbáva zvislé sily medzi prúžkami
Janbu	vodorovná	ľubovoľný	medziprúžkové sily sú nahradené opravným súčiniteľom
Sarma	všetky podmienky	polygonálny	pre seizmické zaťaženie, šmykové medziprúžkové sily sú f-ciou pevnosti zeminy
Morgenstern-Price	všetky podmienky	ľubovoľný	šmykové medziprúžkové sily sú f-ciou normálových síl
Spencer	všetky podmienky	ľubovoľný	všetky medziprúžkové sily sú navzájom rovnobežné

Metóda Sarma, Spencer, Janbu a Morgenstern-Price sú veľmi náročné na výpočet bez použitia softwaru, a to z dôvodu použitia zložitých dielčích výpočtov a náročnej optimalizácii šmykovej plochy.

3.8. Numerická analýza

Analýza je založená na metóde konečných prvkov (MKP), ktorá je v súčasnosti v geotechnike často používaná. V prípade problému analýzy stability svahov je používaná redukcia parametrov šmykovej pevnosti zeminy. Princípom tejto metódy je postupné znižovanie parametrov - uhlu vnútorného trenia φ a súdržnosti c, pokým nedôjde k porušeniu zeminy. Faktor Fs, pri ktorom je ešte zachovaný neporušený stav telesa je považovaný za stupeň stability svahu.

Nevýhodou numerického modelovania je, že sa nedajú určiť šmykové plochy, ktorých stupeň stability je v blízkosti kritického stupňa stability. Poznať polohu týchto plôch vyplýva z potreby docielenia čo najpresnejšej sanácie daného zosuvu. Ďalšou nevýhodou je modelácia hlavne v dvojrozmerných dimenziách. Výsledný stupeň stability taktiež závisí na zvolenom počte iterácií v programe a na počte konečných prvkov.

4. PRAKTICKÁ APLIKÁCIA

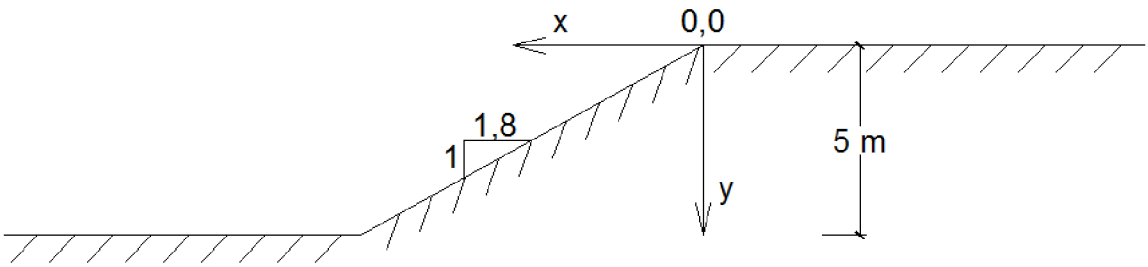
4.1 Geometria riešeného svahu

Stupeň stability na zadanom svahu je počítaný bez použitia softwaru pomocou Pettersonovej a Bishopovej metódy. V programe GEO5 je stupeň stability zisťovaný pre Pettersonovou, Bishopovou, Janbuovou, Spencerovou a Morgenster-Priceovou metódou. S podzemnými vodami sa v riešenom svahu neuvažuje.

Efektívne parametre zeminy:

Hlinitý íl

Objemová tiaž	$\gamma = 18,0$ kN/m^3
Súdržnosť	c_{ef}=10,0 kN/m^2
Uhol vnútorného trenia	φ_{ef}=26°



Obr.23: Geometrický tvar riešeného svahu. [zdroj: autorka BP]

4.2. Výpočet Pettersonovou metódou

Pre výpočet najnižšieho stupňa stability je potrebná optimalizácia šmykovej plochy. Tá bola určená optimalizáciou podľa Fellenia.

A) Prvá fáza výpočtu

Stred šmykovej plochy	x= -6,99
	y= 4,50
Polomer šmykovej plochy	R= 10,2 m
Dĺžka šmykovej plochy	L_i= 12,827 m
Veľkosť prúžkov	b= 0,436 m
Počet prúžkov	25
Vypočítaný stupeň stability	Fs= 1,87

B) Druhá fáza výpočtu

Stred šmykovej plochy	x= -9,467
	y= 6,816
Polomer šmykovej plochy	R= 11,825 m
Dĺžka šmykovej plochy	L_i= 10,844 m
Veľkosť prúžkov	b= 0,40 m
Počet prúžkov	23
Vypočítaný stupeň stability	Fs= 2,23

C) Tretia fáza výpočtu

Stred šmykovej plochy	x= -3,614
	y= 2,53
Polomer šmykovej plochy	R= 9,258 m
Dĺžka šmykovej plochy	L_i= 17,727 m
Veľkosť prúžkov	b= 0,55 m
Počet prúžkov	26
Vypočítaný stupeň stability	Fs= 2,15

D) Výsledná fáza výpočtu

Stred šmykovej plochy	x= -6,544
	y= 4,676
Polomer šmykovej plochy	R= 9,983 m
Dĺžka šmykovej plochy	L_i= 13,296 m
Veľkosť prúžkov	b= 0,47 m
Počet prúžkov	24
Výsledný stupeň stability	**Fs= 1,86**

4.3. Výpočet Bishopovou metódou

Poloha stredu optimalizovanej šmykovej plochy bol prevzatý z výpočtu z programu GEO5 a bola overená optimalizáciou podľa Rodrigueza.

Hodnota lambda	λ = 4,4
Stred šmykovej plochy	x= -6,90
	y= 4,25
Polomer šmykovej plochy	R= 9,485 m
Dĺžka šmykovej plochy	L_i= 12,610 m

Veľkosť prúžkov	b= 0,423 m
Počet prúžkov	25
Vypočítaný stupeň stability	Fs= 2,09

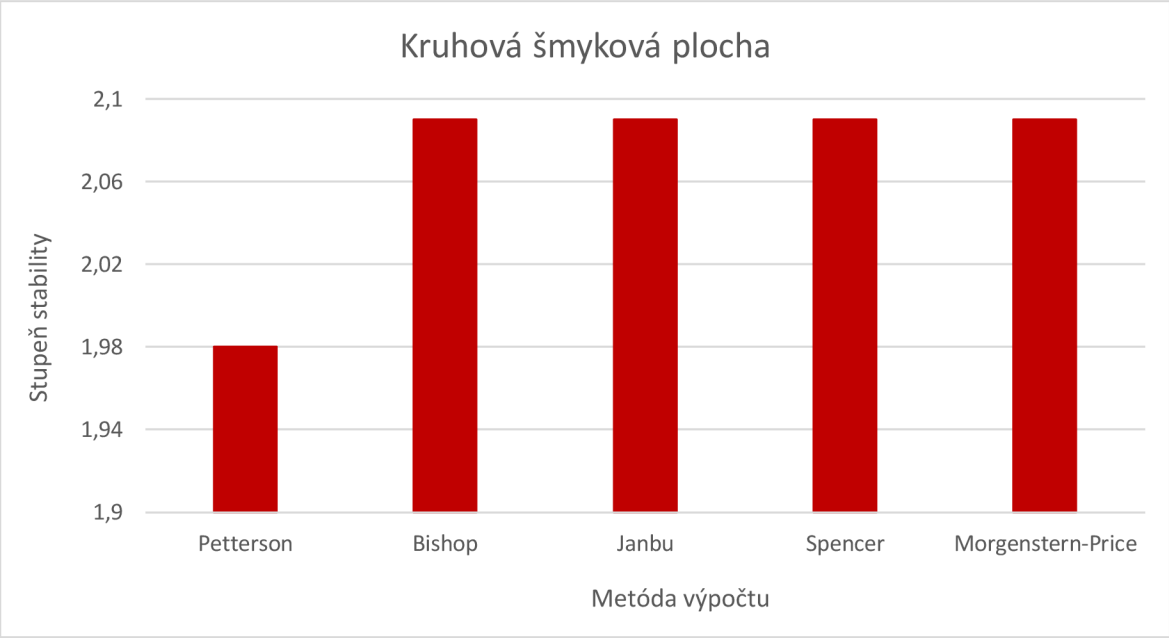
4.4. Výpočet pomocou programu GEO5

Vo všetkých metódach výpočtu bol stupeň stability zisťovaný s použitím optimalizácie kritickej šmykovej plochy.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené údaje pre súradnice stredu šmykovej plochy, polomer kružnice šmykovej plochy a výsledný stupeň stability pre jednotlivé použité metódy výpočtu s použitím kruhovej šmykovej plochy.

Tab.5: Stupne stability spočítané jednotlivými metódami pre kruhovú šmykovú plochu.

Metóda	Súradnice stredu šmykovej plochy [m]		Polomer [m]	Stupeň stability [-]
	x	y		
Petterson	-6,52	3,36	8,72	1,98
Bishop	-7,16	4,86	10,03	2,09
Janbu	-7,03	4,61	9,81	2,09
Spencer	-7,03	4,61	9,81	2,09
Morgenstern-Price	-7,02	4,69	9,89	2,09

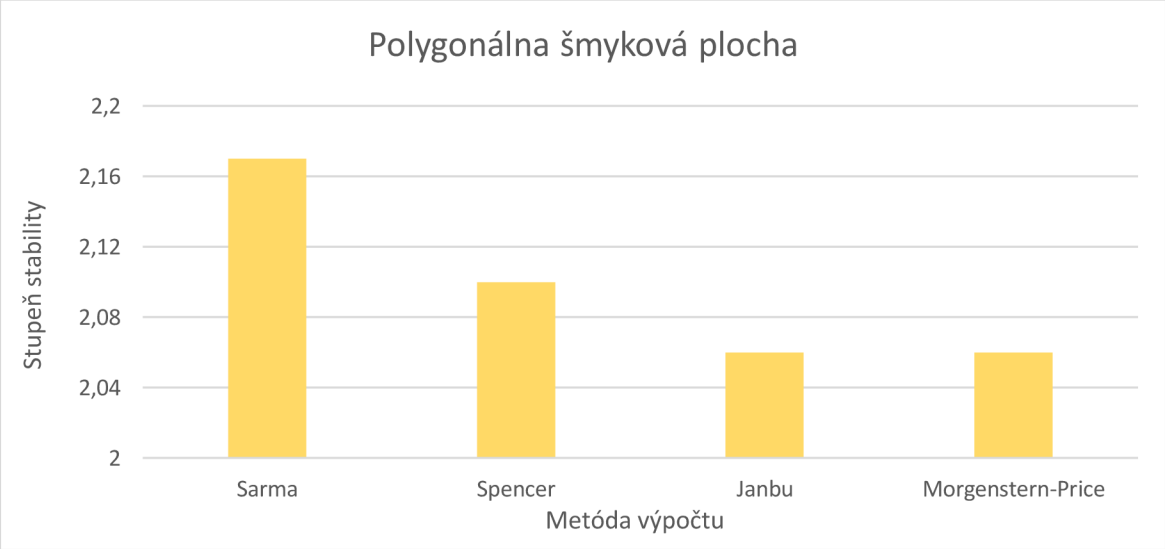


Graf.2: Stupne stability pre kruhovú plochu. [zdroj: autorka BP]

Stupeň stability pre ten istý svah bol pre metódy Sarma, Janbu, Morgentern-Price, a Spencer, spočítaný aj s polygonálnou šmykovou plochou, ktorá bola taktiež optimalizovaná. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené súradnice bodov šmykovej plochy a zistené stupne stability.

Tab.6: Stupne stability spočítané jednotlivými metódami pre polygonálnu šmykovú plochu.

		Metóda výpočtu			
Číslo bodu	**Súradnice [m]**	**Sarma**	**Spencer**	**Janbu**	**Morgenstern-Price**
1	x	-9,00	-9,00	-9,00	-9,00
	y	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00
2	x	-7,29	-7,37	-7,65	-7,65
	y	-5,34	-5,38	-5,60	-5,60
3	x	-4,44	-5,21	-5,33	-5,38
	y	-5,13	-5,16	-5,23	-5,24
4	x	2,83	-2,94	-3,03	-3,13
	y	-4,36	-4,38	-4,36	-4,38
5	x	1,12	-1,10	-1,10	-1,15
	y	-3,39	-3,33	-3,38	-3,38
6	x	0,44	0,32	0,42	0,35
	y	-2,12	-2,12	-2,12	-2,12
7	x	2,21	1,71	1,70	1,65
	y	-0,66	-0,66	-0,66	-0,66
8	x	2,98	2,18	2,28	2,21
	y	0,00	0,00	0,00	0,00
Stupeň stability		2,17	2,10	2,06	2,00



Graf 3: Stupne stability s polygonálnou šmykovou plochou. [zdroj: autorka BP]

5. ZÁVER

Predmetom bakalárskej práce je porovnanie rôznych analytických metód výpočtu stupňa stability. Jednotlivé metódy boli podrobne teoreticky popísané a taktiež boli použité v riešeniach stupňa stability realizovaných na zadanom svahu.

Hlavným výstupom práce je porovnanie metód. Porovnávaných bolo šesť najznámejších. Pettersonova, Bishopova, Janbuova, Sarmova, Morgenstern-Priceova a Spencerova. Prvé tri menované sú zjednodušené a ostatné sú rigorózne. To znamená, že uplatňujú všetky tri podmienky rovnováhy. Pettersonova metóda ako jediná neuvažuje vzájomný vplyv medzi susednými prúžkami. Ďalším rozdielom je tvar šmykovej plochy. Pettersonova a Bishopova metóda používajú kruhovú šmykovú plochu, metóda Sarma používa polygonálnu šmykovú plochu a metódy Janbu, Spencer a Morgenstern-Price môžu byť počítané na šmykovej ploche s ľubovoľným tvarom.

Pri výpočte, ktorý bol realizovaný v programe GEO5 bolo zistené, že stupeň stability spočítaný pre kruhovú šmykovú plochu je pre všetky metódy výpočtu rovnaký, líši sa len hodnota spočítaná pomocou Pettersonovej metódy a to približne o 5%. V prípade riešenia s použitím polygonálnej šmykovej plochy sa jednotlivé stupne stability líšia o približne 2% až 5%. V každom z týchto prípadov je však stupeň stability vyhovujúci, čo znamená, že zadaný svah je stabilný.

Stupeň stability bol tiež overený výpočtom bez použitia softwaru a to pomocou dvoch metód. Pettersonovej a Bishopovej metódy. Zistené hodnoty sa líšili približne o 10%, obe však vyhovovali podmienkam minimálneho stupňa stability. Na základe týchto výpočtov sa dá tvrdiť, že modelový svah je stabilný.

6. ZOZNAM POUŽITEJ LITARETÚRY

[1] WEIGLOVÁ, Kamila. Mechanika zemin. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. ISBN 978-80-7204-507-5.

[2] BUDHU, M. Soil mechanics and foundations. 3rd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2011, 761 s. ISBN 978-0-470-55684-9.

[3] geologie.vsb.cz/svadef/. Maschalko, Marian, doc. Ing. Ph.D. [online]. [cit. 2015-05-17]. © Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/svadef/.

[4] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. Sesuvy a zabezpečování svahů. 2., přeprac. a dopln. vyd. Praha: Academia, 1987, 338 s.

[5] geology.cz/svahovenestability. Moravcová, Olga [online]. © [2007 - 2012]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z http://www.geology.cz/svahovenestability/pojmy.

[6] VERRUIJT, Arnold. DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. SOIL MECHANICS [online]. 2001 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/DredgingProcesses/res00020/embedded/SoilMechBook.pdf

[7] GEO 5 – software od firmy FINE, učební texty k softwaru a nápověda. [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.fine.cz/napoveda/geo5/

[8] ČSN 73 6133. Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 65 l.

[9] FAST v Brne. Ústav geotechniky. Geológia. [online] [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/geologie/skripta/GEODYNP.htm

[10] Web.natur.cuni.cz/~bohac/. Boháč, Jan, Ing. [online]. © 2013 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/mz2/.

[11] FAST v Brne. Ústav geotechniky. Mechanika hornín. [online] [cit. 2015-05-17] Dostupné z: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/mech_hornin/mhig_8.pdf

[12] MITCHELL, J. K., SOGA, K. Fundamentals of soil behavior. 3rd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005, 577 s. ISBN 9780471463023.

[13] VŠB-TU Ostrava. Mechanika hornin a zemin. [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-cviko-05.pdf

[14] Svf UNIZA. Katedra geotechniky. [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://svf.uniza.sk/kgt/zakladanie/GM_4.pdf

[15] SMITH, K., Environmental Hazards: Assesing Risk And Reducing Disaster. Routledge. Londýn, 2002.

[16] Nemčok, A. - Pašek, J. - Rybář, J. Dělení svahových pohybů. Praha: Sborník Geol. věd., č. 11. 1974. 97 s.

[17] Felbertauern Straße. Wikipedia: the free encyclopedia. [online]. 2001. [cit. 2015-05-7]. Dostupné z: http://de.wikipedia.org/wiki/Felbertauern_Straße

[18] aktuality.sk. [online]. 24.7.2014 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.aktuality.sk/clanok/258101/foto-vratna-dolina-sa-spamatava-odstranovanie-skod-je-v-plnom-prude/

7. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

Stabilita svahu

Fs	stupeň stability zeminy
τ	maximálna šmyková pevnosť
τ_{red}	mobilizovaná šmyková pevnosť

Parametre potrebné k výpočtu

φ_{ef}	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
φ_u	totálny uhol vnútorného trenia zeminy
c_{ef}	efektívna súdržnosť zeminy
c_u	totálna súdržnosť zeminy
τ_f	vrcholová šmyková pevnosť
σ_f	normálové napätie pôsobiace kolmo na šmykovú plochu porušenia

TVAR ŠMYKOVEJ PLOCHY

Rovinná šmyková plocha

N	normálová sila kolmá na šmykovú plochu
T	šmyková sila
α	sklon svahu
β	odklon vody od vodorovnej roviny
φ	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
γ	objemová tiaž zeminy
γ_w	objemová tiaž vody

Zakrivená šmyková plocha

β_1	uhol odklonu pomocnej priamky od svahu
β_2	uhol odklonu pomocnej priamky od vodorovnej roviny
O	stred otáčania
x, y	súradnice stredu šmykovej plochy
h	výška svahu

λ	hodnota na určenie stredu šmykovej plochy
γ	objemová tiaž zeminy
φ	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
c	súdržnosť zeminy

Pettersonova metóda

γ	objemová tiaž zeminy
α	odklon spojnice stredu šmykovej plochy daného prúžku so stredom šmykovej plochy od zvislej roviny
W_i	sila od vlastnej tiaže prúžku
N_i	normálová sila prúžku
T_i	šmyková sila prúžku
φ	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
c	súdržnosť zeminy
l_i	dĺžka šmykovej plochy prúžku
u_i	pórový tlak na prúžku

Bishopova metóda

W_i	sila od vlastnej tiaže prúžku
φ	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
α	odklon spojnice stredu šmykovej plochy daného prúžku so stredom šmykovej plochy od zvislej roviny
c	súdržnosť zeminy
b_i	šírka prúžku
u_i	pórový tlak na prúžku

Janbuova metóda

c_{ef}	efektívna hodnota súdržnosti zeminy
W_i	tiaž bloku, vrátane priťaženia, ktoré má charakter tiaže
T_i	šmyková sila na šmykovej ploche daného bloku
T_{i+1}	šmyková sila na šmykovej ploche vedľajšieho bloku
u_i	pórový tlak na danom bloku
φ	uhol vnútorného trenia zeminy

α_i	sklon šmykovej plochy daného bloku
E_i, E_{i+1}	sily, ktorými na seba pôsobia jednotlivé bloky

Sarmova metóda

E_i	medziblokové sily
N_i	normálové sily na šmykovej ploche
T_i	šmykové sily na šmykovej ploche
X_i	šmykové sily medzi blokmi
z_i	polohy pôsobísk síl
l_i	polohy pôsobísk síl
K_h	faktor vodorovného zrýchlenia

Morgensterg-Priceova metóda

W_i	tiaž bloku vrátane priťaženia
$K_h.W_i$	vodorovná zotrvačná sila simulujúca účinky zemetrasenia
N_i	normálová sila na šmykovej ploche
T_i	šmyková sila na šmykovej ploche
E_i , E_{i+1}	sily, ktorými na seba pôsobia susedné bloky odklonené o uhol δ
Fx_i, Fy_i	ostatné vodorovné a zvislé sily pôsobiace na blok
Ml_i	moment od síl Fx_i a Fy_i, otáčajúci sa okolo stredu šmykovej plochy i-tého bloku – M
u_i	výslednica pórového tlaku na danom úseku šmykovej plochy

PRAKTICKÁ APLIKÁCIA

Geometria riešeného svahu

φ_{ef}	efektívny uhol vnútorného trenia zeminy
c_{ef}	efektívna súdržnosť zeminy
γ	objemová tiaž zeminy
x, y	súradnice stredu šmykovej plochy
R	polomer šmykovej plochy
L	dĺžka šmykovej plochy
b	šírka prúžkov
Fs	stupeň stability

8. ZOZNAM PRÍLOH

A. Výpočet stupňa stability svahu v programe GEO5

B. Výpočet stupňa stability Pettersonovou metódou bez použitia softwaru

C. Výpočet stupňa stability Bishopovou metódou bez použitia softwaru

9. PRÍLOHY