



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

ALGORITMIZACE METODY ELSM PRO POKROČILOU STABILITNÍ ANALÝZU

PROGRAMMING OF THE ELSM METHOD FOR THE ADVANCED STABILITY ANALYSIS OF GEOTECHNICAL
STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juraj Štetiar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geotechniky
Student: **Bc. Juraj Štetiar**
Vedoucí práce: **Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Algoritmizace metody ELSM pro pokročilou stabilitní analýzu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metoda ELSM umožňuje vyčíslení stupně stability pro předepsanou smykovou plochu na základě stavu napjatosti získaného výpočtem pomocí metody konečných prvků. Jsou tedy zachovány všechny výhody použití MKP (fázování, materiálové modely, řešení proudění vody atd.) a zároveň lze regulovat pozici a tvar smykové plochy. Druhý zmíněný aspekt vytváří určitou výhodu ve srovnání s běžně používanou metodou redukce parametrů smykové pevnosti (SRM). Zde není možné tvar smykové plochy ovlivnit. Její pozice tedy může být zkreslena např. nepřesnostmi ve tvaru terénu (lokální smykové plochy) nebo nevhodně zvolenými hodnotami parametrů smykové pevnosti (mělké smykové plochy). V případě vodních děl také není možné při použití SRM metody vyčísřit samostatně stabilitu návodního a vzdušného svahu.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je vytvoření základního algoritmu metody ELSM ("Enhanced Limit Strength Method") jako samostatné nástavby komerčně dostupného řešiče na bázi MKP. Algoritmizace bude rozčleněna do několika dílčích částí: a) parametrická definice počátečního tvaru smykové plochy; b) stanovení stavu napjatosti na definované smykové ploše; c) integrace lokálních složek napjatosti na smykové ploše; d) vyčíslení stupně stability; e) stanovení/nalezení kritického stupně stability.

Seznam doporučené literatury a podklady:

LIU, S. Y.; SHAO, L. T.; LI, H. J. Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63: 291-298.

FREDLUND, Delwyn G.; SCOULAR, R. E. G. Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis. In: *Int. Symp. on Slope Stability Engineering*, Matsuyama, Shikoku, Japan. 1999. p. 31-47.

KRAHN, John; LAM, Leonard; FREDLUND, D. G. The use of finite element computed pore-water pressures in a slope stability analysis. Rotterdam: Balkema, 1996, 2: 1277-1282.

CHENG, Yung Ming, et al. Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two-dimensional slope stability analysis. Computers and Geotechnics, 2007, 34.2: 92-103.

LI, Hongjun, et al. Particle swarm optimization algorithm coupled with finite element limit equilibrium method for geotechnical practices. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012.

Další podklady budou poskytnuty v průběhu řešení práce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 24. 3. 2023

L. S.

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou stability svahu, ktorá predstavuje kľúčovú úlohu pri návrhu geotechnických konštrukcií. V práci sa skúma Enhanced Limit Strength Method (ELSM), ktorá využíva výhody metódy konečných prvkov (MKP) a zároveň umožňuje regulovať pozíciu a tvar šmykovej plochy. ELSM je preto výhodná pre riešenie stability návodných a vzdušných svahov sypaných zemných vodných nádrží. Cieľom práce je vytvoriť algoritmus pre metódu ELSM ako prídavný modul pre existujúce MKP riešiče.

Teoretická časť práce sa venuje vysvetleniu princípov bežne používaných metód výpočtu stability svahu, ako sú metóda medznej rovnováhy (Limit Equilibrium Method - LEM) a metóda redukcie šmykovej pevnosti (Strength Reduction Method - SRM). Následne je predstavený princíp metódy ELSM (stanovenia stupňa bezpečnosti pre kritickú šmykovú plochu) a stručne popísaný optimalizačný algoritmus rojom častíc (Particle Swarm Optimization - PSO).

V praktickej časti práce je vysvetlený naprogramovaný algoritmus pre výpočet stability svahu pomocou metódy ELSM s využitím Particle Swarm Optimization (PSO). Overenie správnosti algoritmu a porovnanie s metódami SRM a LEM prebehlo na troch overovacích štúdiách, vrátane jednoduchého homogénneho svahu, heterogénneho svahu s horizontálnym materiálovým rozhraním a reálnej úlohy posúdenia vonkajšej stability zemného telesa vodného diela Vlachovice.

KĹÚČOVÉ SLOVÁ

stabilita svahu, metóda medznej rovnováhy, metóda redukcie šmykovej pevnosti, prúžkové metódy, algoritmizácia, optimalizácia rojom častíc, python, stabilitná analýza

ABSTRACT

This master's thesis addresses the issue of slope stability, which is a key task in the design of geotechnical structures. The study focuses on the Enhanced Limit Strength Method (ELSM), which leverages the advantages of the Finite Element Method (FEM) while allowing the control of the position and shape of the slip surface. ELSM is particularly advantageous for addressing the stability of embankments and aerial slopes of earth-filled water reservoirs. The objective of the thesis is to develop an algorithm for the ELSM method as an additional module for existing FEM solvers.

The theoretical part of the thesis explains the principles of commonly used slope stability calculation methods, such as the Limit Equilibrium Method (LEM) and the Strength Reduction Method (SRM). Subsequently, the principles of the ELSM method (determining the factor of safety for the critical slip surface) are introduced, and the optimization algorithm Particle Swarm Optimization (PSO) is briefly described.

In the practical section of the thesis, the programmed algorithm for slope stability calculation using the ELSM method with the utilization of the Particle Swarm Optimization (PSO) optimization module is explained. The correctness of the algorithm is verified, and a comparison with the SRM and LEM methods is conducted through three verification studies, including a simple homogeneous slope, a heterogeneous slope with a horizontal material interface, and a real case study assessing the external stability of the dam structure at the Vlachovice waterworks.

KEYWORDS

slope stability, Limit Equilibrium Method, Strength Reduction Method, slice methods, algorithmization, Particle Swarm Optimisation, python, stability analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

Citácia práce v tlačenej podobe:

ŠTETIAR, Juraj. *Algoritmizace metody ELSM pro pokročilou stabilitní analýzu*. Brno, 2024. Dostupné tiež z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152946>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brne, Fakulta stavebná, Ústav geotechniky. Vedúci práce Juraj Chalmovský.

Citácia elektronického zdroja:

ŠTETIAR, Juraj. *Algoritmizace metody ELSM pro pokročilou stabilitní analýzu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-01-12]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152946>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brne, Fakulta stavebná, Ústav geotechniky. Vedúci práce Juraj Chalmovský.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval v prvom rade p. Ing. Jurajovi Chalmovskému, PhD. za nadšenie pre tému, veľmi zodpovedný a profesionálny prístup, obrovské množstvo času stráveného pri konzultáciách, odborné a profesné rady, rozšírenie obzorov a predovšetkým za motiváciu zaoberať sa touto problematikou aj na doktorskom štúdiu.

Veľmi ďakujem aj mojej rodine, kolegom a priateľom za podporu, trpezlivosť a toleranciu v priebehu krátkeho a intenzívneho inžinierskeho štúdia.

PREHLÁSENIE AUTORA O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej diplomovej práce s názvom *Algoritmizace metody ELSM pro pokročilou stabilitní analýzu* je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brne dňa 12. 1. 2024

Bc. Juraj Štetiar
autor práce

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu s názvom *Algoritmizace metody ELSM pro pokročilou stabilitní analýzu* som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Juraja Chalmovského, PhD. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 12. 1. 2024

Bc. Juraj Štetiar

autor práce

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	ROZDELENIE METÓD PRE ANALÝZU STABILITY SVAHOV	15
2.1	Modelovanie stability svahu	15
2.2	Metódy medznej rovnováhy (LEM)	15
2.2.1	Prúžkové metódy s polygonálnou šmykovou plochou	16
2.2.2	Prúžkové metódy s kruhovou šmykovou plochou	20
2.3	Numerické metódy modelovania stability svahu	21
2.3.1	Metóda konečných prvkov (MKP)	22
2.3.2	Metóda redukcie šmykovej pevnosti (SRM)	23
3	POPIS METÓDY ELSM	26
3.1	Úvod	26
3.2	Generovanie počiatočnej šmykovej plochy (Trial Slip Surface)	26
3.3	Výpočet stupňa bezpečnosti (FoS)	28
3.4	Vplyv Poissonovho čísla μ na ELSM	30
3.5	Vplyv uhlu dilatancie ψ na ELSM	31
3.6	Vplyv sania na ELSM	33
4	POPIS OPTIMALIZAČNEJ PROCEDÚRY PSO (PARTICLE SWARM OPTIMISATION)	35
4.1	Definícia	35
4.2	Základné modely PSO	39
4.3	Nastaviteľné parametre PSO	42
5	VÝVOJ ALGORITMU ELSM-PSO	44
5.1	Programovací jazyk Python	44
5.2	Vývoj algoritmu	45
5.2.1	Import dát	45
5.2.2	Generovanie skúšobnej šmykovej plochy (TSS)	46
5.2.3	Diskretizácia šmykovej plochy	46
5.2.4	Priradenie napätí do bodov šmykovej plochy	47
5.2.5	Výpočet šmykových napätí a stupňa bezpečnosti	51



5.2.6	Implementácia PSO	53
5.2.7	Schéma algoritmu ELSM-PSO	55
6	OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.1: HOMOGÉNNY SVAH	56
6.1	Úvodný komentár k riešenej úlohe	56
6.2	Porovnanie na hranici straty stability	59
6.2.1	Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)	59
6.2.2	Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha	61
6.2.3	Vplyv uhlu dilatancie ψ	64
6.2.4	Porovnanie PSO modelov LBEST a GBEST	65
6.3	Porovnanie pri dostatočnej rezerve stability	72
6.3.1	Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)	72
6.3.2	Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha	73
6.3.3	Vplyv uhlu dilatancie ψ	75
6.4	Vyhodnotenie výsledkov	76
7	OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.2: HETEROGÉNNY SVAH	78
7.1	Úvodný komentár k riešenej úlohe	78
7.2	Porovnanie pre rôzne hustoty siete MKP	80
7.2.1	Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)	80
7.2.2	Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha	81
7.3	Vplyv uhlu dilatancie ψ	85
7.4	Vyhodnotenie výsledkov	86
8	OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.3: REÁLNA OKRAJOVÁ ÚLOHA	87
8.1	Úvodný komentár k riešenej úlohe	87
8.1.1	Geologické pomery	87
8.1.2	Hydrogeologické pomery	88
8.1.3	Konštrukcia vodného diela	89
8.1.4	Materiál hrádze a materiálové modely	90
8.1.5	Hodnoty vstupných parametrov	92
8.1.6	Výpočtový model	93
8.2	Analýza stability nádrže v prázdnom stave po ukončení výstavby (ZS 1)	94
8.2.1	Úvodný komentár k riešenej úlohe	94
8.2.2	Analýza s vplyvom sania	95
8.2.3	Analýza bez vplyvu sania	97



8.3	Analýza stability nádrže v stave ustáleného prúdenia (ZS 2)	100
8.3.1	Úvodný komentár k riešenej úlohe	100
8.3.2	Analýza s vplyvom sania	100
8.3.3	Analýza bez vplyvu sania	102
8.4	Vyhodnotenie výsledkov	105
9	ZÁVER	106
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	108
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	114
	ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV	118
	ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV	121
	ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK	123



1 ÚVOD

Stabilita svahu je základná geotechnická úloha^[1], ktorá je súčasťou pomerne veľkej časti výpočtov pri návrhu geotechnických konštrukcií. Pre výpočet stability svahu existuje mnoho metód, založených na rozdielnych fyzikálnych princípoch, pričom vhodnosť ich použitia sa môže líšiť v závislosti od konkrétnej riešenej praktickej aplikácie.

Jedným z takýchto postupov je **Enhanced Limit Strength Method (ELSM)**, ktorá predstavuje metódu zameranú na stanovenie stupňa stability pre zvolenú šmykovú plochu, zohľadňujúc stav napätosti získaný z metódy konečných prvkov (MKP). Významnou výhodou tejto metódy je zachovanie všetkých benefitov MKP, ako sú fázové analýzy, materiálové modely a riešenie hydraulických procesov (prúdenia vody). Týmto spôsobom môžeme dosiahnuť presnejšie výsledky v porovnaní s konvenčnými prístupmi.

V prípade vodných diel je ELSM odozvou na obmedzenia najčastejšie používanej metódy na bázi MKP, a to SRM (metóda redukcie parametrov šmykovej pevnosti), ktorá nedokáže oddelene kvantitatívne vyčíslieť stabilitu návodných a vzdušných svahov sypaných zemných vodných nádrží.

Cieľom tejto diplomovej práce je vytvoriť základný algoritmus metódy **ELSM** (Enhanced Limit Strength Method) ako samostatný prídavný modul pre existujúce komerčne dostupné MKP riešiče. Tvorba samotného algoritmu bude rozčlenená do niekoľkých krokov:

- a) Parametrická definícia počiatočného tvaru šmykovej plochy
- b) Stanovenie stavu napätosti na definovanej šmykovej ploche
- c) Integrácia lokálnych zložiek napätosti na šmykovej ploche
- d) Vyčíslenie stupňa stability
- e) Stanovenie kritického stupňa stability (FoS – Factor of Safety) pomocou vybranej optimalizačnej metódy

Po zostavení algoritmu v programovacom jazyku *Python* bude skúmané správanie a citlivosť metódy ELSM v troch overovacích štúdiách, zahŕňajúc jednoduchý homogénny svah s dvomi rôznymi sadami vstupných parametrov šmykovej pevnosti, heterogénny svah s horizontálnym materiálovým rozhraním a reálnu úlohu posúdenia vonkajšej stability zemného telesa vodného diela Vlachovice.

2 ROZDELENIE METÓD PRE ANALÝZU STABILITY SVAHOV

2.1 Modelovanie stability svahu

Metódy matematického modelovania stability^[W6] svahových telies je možné rozdeliť do dvoch skupín:

1. Metódy medznej rovnováhy
2. Numerické metódy modelovania stability

Líšia sa najmä možnosťami zahrnutia rôznych reálnych faktorov do výpočtu, v požiadavkách na zjednodušenie modelovej situácie, v časovej náročnosti prípravy modelu a modelového výpočtu a taktiež v požiadavkách na vstupné dáta. Výstižnosť matematického modelu a výsledky získané modelovým výpočtom je vždy nutné kriticky kontrolovať.

2.2 Metódy medznej rovnováhy (LEM)

Základným princípom metód medznej rovnováhy je riešenie silovej (momentovej) rovnováhy svahového telesa nad zvolenou šmykovou plochou. Tieto metódy sú odvodené za predpokladu konkrétneho stavu napätosti prostredia, pro ktorom je v celej riešenej oblasti mobilizovaná využiteľná šmyková pevnosť zeminy a hľadá sa taká šmyková plocha, po ktorej by najjednoduchšie mohlo dôjsť k zošmyknutiu (kritická šmyková plocha). Metódy medznej rovnováhy nezohľadňujú pretvárne parametre zeminového/horninového prostredia. Výsledkom riešenia je stupeň stability, ktorý udáva podiel medzi pasívnymi silami (prispievajú k stabilite svahu) a silami aktívnymi (prispievajú k nestabilite svahu). Tieto metódy neumožňujú získať informácie o priebehu napätí a deformácií v svahovom telese. Šmykové plochy môžu mať rôzny tvar v závislosti na type zeminy (rovinný/polygonálny v prípade nesúdržných pôd; zakrivený až najčastejšie kruhový v prípade súdržných pôd). Z metód medznej rovnováhy sa pre riešenie stability svahového telesa zo súdržných zemín najčastejšie používajú prúžkové^[W4, 30] (švédske) metódy (napríklad metóda Pettersonova, Bishopova metóda). V prípade najjednoduchšej prúžkovej Pettersonovej metódy sa celé teleso nad uvažovanou šmykovou plochou rozdelí na určitý počet prúžkov, vyhodnotia sa aktívne a pasívne sily zodpovedajúce tiažam jednotlivých prúžkov a nakoniec sa vplyv všetkých uvažovaných prúžkov superponuje.

Všeobecne sú prúžkové metódy známe tým, že ide o staticky nedeterminovaný problém, ktorý sa rieši predpokladom rozloženia vnútorných síl. V dôsledku toho sa výsledky získané z konkrétnych metód môžu líšiť v závislosti od rôznych predpokladov.

Metóda medznej rovnováhy (LEM) definuje stupeň bezpečnosti^[W6] (*FoS*) podľa rovnice 2.1, pričom šmykové napätie potrebné pre medznú rovnováhu je vyjadrené v rovnici 2.2.

$$FoS = \frac{\text{šmyková pevnosť zeminy}}{\text{šmykové napätie potrebné pre medznú rovnováhu}} \quad 2.1$$

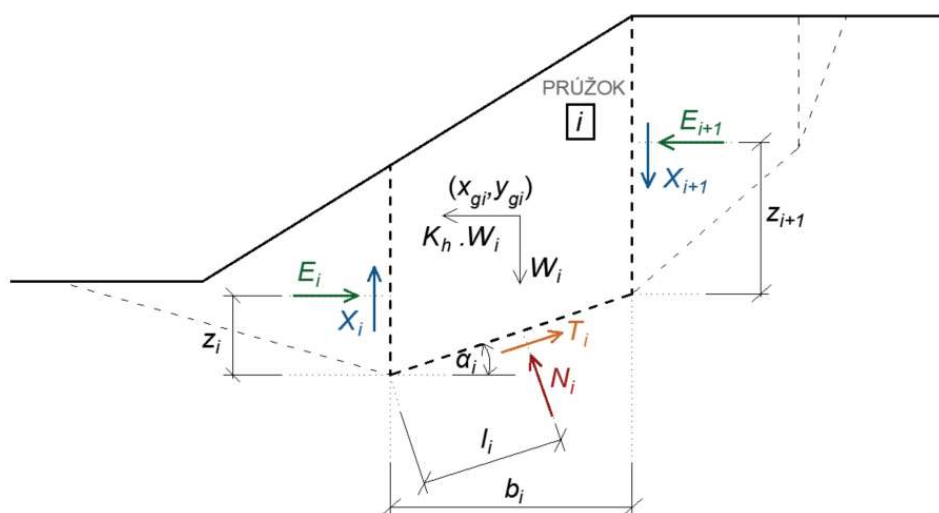
$$\tau_{m_i} = \frac{\tau_{f_i}}{FOS} = \frac{c' + \sigma'_i \tan \varphi'}{FOS} = \frac{c'}{FOS} + \sigma'_i \frac{\tan \varphi'}{FOS} \quad 2.2$$

Kde τ_{m_i} je šmykové napätie a σ'_i efektívne normálové napätie na *i*-tom reze šmykovej plochy, c' je kohézia (súdržnosť) a φ' je efektívny uhol vnútorného trenia. *FoS* je "faktor, ktorým je nutné deliť šmykovú pevnosť zeminy, aby bol dosiahnutý stav hraničnej stability svahu^[2]". Kritická šmyková plocha je plocha zodpovedajúca minimálnej hodnote *FoS*; táto minimálna hodnota je "skutočný" faktor bezpečnosti.

Prúžkové metódy delíme podľa tvaru šmykovej plochy na metódy s polygonálnou a s kruhovou šmykovou plochou.

2.2.1 Prúžkové metódy s polygonálnou šmykovou plochou

Pri použití polygonálnej šmykovej plochy spočíva riešenie v hľadaní stavu medznej rovnováhy síl, ktoré pôsobia na zemné teleso nad šmykovou plochou. Aby bolo možné tieto sily definovať, rozdelí sa zemina nad šmykovou plochou na bloky deliacimi rovinami, ktoré sú spravidla volené ako zvislé, ale nie je to nutná podmienka, keďže Sarmova^[17] metóda používa sklonené deliace roviny.



Obrázok 2.1: Statická schéma bloku pre polygonálnu šmykovú plochu (upravené z [W4])

Sily, ktoré pôsobia na jednotlivé bloky zeminy, sú znázornené na obrázku 2.1. V prípade, že je oblasť nad šmykovou rozdelená na n blokov, máme pre výpočet nasledujúcich $6n - 2$ neznámych:

n hodnôt normálových síl N_i na úsekoch šmykovej plochy

n hodnôt k nim príslušiacich šmykových síl T_i

$n - 1$ hodnôt normálových síl E_i medzi blokmi zeminy

$n - 1$ hodnôt šmykových síl X_i medzi blokmi zeminy

$n - 1$ hodnôt z_i , určujúcich pôsobisko síl E_i

n hodnôt l_i určujúcich pôsobisko síl N_i

1 hodnotu stupňa stability FoS

Na riešenie rovnováhy máme k dispozícii nasledujúcu sústavu rovníc:

n vodorovných súčtových podmienok na blokoch

n zvislých súčtových podmienok na blokoch

n momentových podmienok na blokoch

n vzťahov medzi silami N_i a T_i z Mohr-Coulombovej teórie

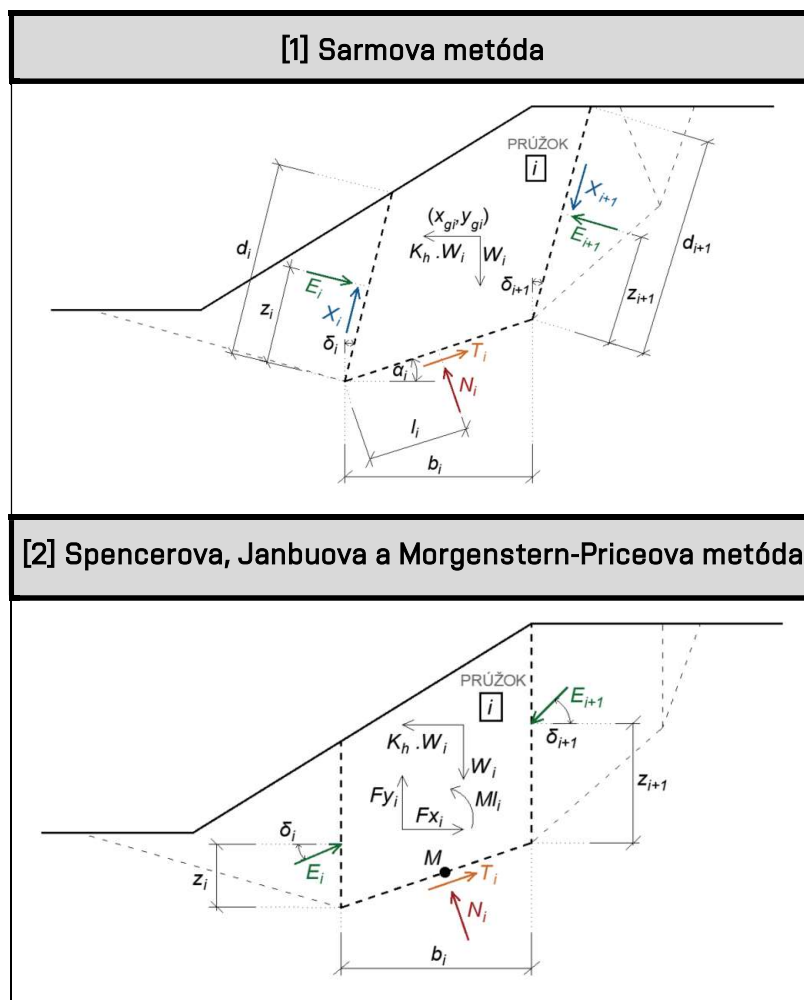
Celkom máme teda $4n$ rovníc pre $6n - 2$ neznámych a z toho vyplýva, že $2n - 2$ hodnôt je nutné vopred zvoliť. A práve voľbou týchto hodnôt sa líšia jednotlivé metódy riešenia.

Často bývajú volené polohy pôsobísk jednotlivých síl alebo sklony medzi blokmi. Riešenie potom vedie k iteračným postupom, pri ktorých musia vopred zvolené hodnoty umožňovať splnenie rovnováhy síl a zaisťovať kinematickú prípustnosť daného riešenia.

Medzi najčastejšie používané prúžkové metódy s polygonálnou šmykovou plochou patria:

- *Sarmova metóda*^[7]
- *Spencerova metóda*^[41]
- *Janbuova metóda*^[42]
- *Morgenstern-Priceova metóda*^[44]

V overovacích štúdiách tejto práce bol pri LEM analýze použitý program **GE05 – Stabilita svahu**^[W4], v ktorom sú implementované vyššie uvedené 4 prúžkové metódy (obrázok 2.2).



Obrázok 2.2: Schémy pôsobiacich síl medzi jednotlivými prúžkami pre metódy Sarma v časti obrázku [1], Spencer, Janbu a Morgenstern-Price v časti obrázku [2] (oba obrázky upravené z [W4])

Vybrané implementované metódy (tabuľka 2.1) splňujú silové i momentové podmienky rovnováhy na jednotlivých blokoch (prúžkoch). Konkrétna formulácia rovníc rovnováhy sa pre jednotlivé metódy môže líšiť, napríklad v Sarmovej metóde^[7] platia podmienky rovnováhy formulované v rovniciach^[W4] 2.3 až 2.7.

1. *Súčtová podmienka rovnováhy vo vodorovnom smere*

$$\begin{aligned} T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i \\ = K_h W_i - F X_i + X_{i+1} \sin \delta_{i+1} - X_i \sin \delta_i + E_{i+1} \cos \delta_{i+1} - E_i \cos \delta_i \end{aligned} \quad 2.3$$

2. *Súčtová podmienka rovnováhy v zvislom smere*

$$\begin{aligned} N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i \\ = W_i - F Y_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i \end{aligned} \quad 2.4$$

3. *Momentová podmienka rovnováhy*

$$\begin{aligned} N_i l_i - X_{i+1} b_i \sec \alpha_i \cos(\alpha_i + \delta_{i+1}) + E_{i+1} [z_{i+1} + b_1 \sec \alpha_i \sin(\alpha_i + \delta_{i+1})] \\ - E_i z_i - W_i (x_{gi} - x_i) + K_h W_i (y_{gi} - y_i) - F X_i r x_i + F Y_i r y_i = 0 \end{aligned} \quad 2.5$$

$$\text{pozn.: } \sec(\alpha) = 1/\cos(\alpha)$$

4. *Vzťahy medzi normálovými a šmykovými silami podľa MC teórie*

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i b_i \sec \alpha_i \quad 2.6$$

$$X_i = (E_i - P W_i) \tan \bar{\varphi}_i + \bar{c}_i d_i \quad 2.7$$

Pričom v rovnici 2.5 označujú premenné $r x_i$ a $r y_i$ ramená síl $F X_i$ a $F Y_i$, pre rovnicu 2.7 platí, že $P W_i$ je výslednica pórového tlaku na deliacich rovinách, $\bar{\varphi}_i$ a \bar{c}_i symbolizujú priemernú hodnotu uhlu vnútorného trenia a súdržnosti na deliacej rovine.

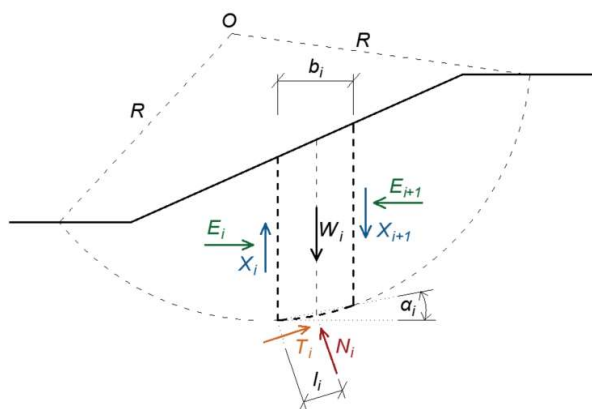
Tabuľka 2.1: Porovnanie vybraných prúžkových metód výpočtu stability svahu (LEM)^[W3, W9, 28]

Metóda	Podmienky rovnováhy	Tvar šmykovej plochy	Poznámka
Sarma (rôzny sklon prúžkov)	<ul style="list-style-type: none"> • rovnováha síl • rovnováha momentov 	<ul style="list-style-type: none"> • polygonálny 	<ul style="list-style-type: none"> • vhodná pre analýzu skalného svahu • pre seizmické zaťaženie • šmykové medziprúžkové sily sú funkciou pevnosti zeminy
Spencer	<ul style="list-style-type: none"> • rovnováha síl • rovnováha momentov 	<ul style="list-style-type: none"> • polygonálny • kruhový 	<ul style="list-style-type: none"> • všetky medziprúžkové sily sú navzájom rovnobežné • citlivejšia konvergencia
Janbu (rigorózna)	<ul style="list-style-type: none"> • rovnováha síl • rovnováha momentov 	<ul style="list-style-type: none"> • polygonálny • kruhový 	<ul style="list-style-type: none"> • známy priebeh tlakovej línie
Morgenstern-Price	<ul style="list-style-type: none"> • rovnováha síl • rovnováha momentov 	<ul style="list-style-type: none"> • polygonálny • kruhový 	<ul style="list-style-type: none"> • šmykové medziprúžkové sily sú funkciou normálových síl

Výpočet a optimalizácia stupňa stability v programe **GE05 – Stabilita svahu** prebieha tak, že je postupne menená poloha jednotlivých bodov tejto plochy a zisťuje sa, ktorá zmena polohy daného bodu vedie k najväčšiemu zníženiu stupňa stability FoS . Krajné body šmykovej plochy sú posúvané po povrchu terénu, vnútorné body plochy sa pohybujú vo zvislom a vodorovnom smere. Krok posunu je pôvodne zvolený ako desatina najmenšej vzdialenosti susedných bodov šmykovej plochy a pri každom ďalšom behu sa krok znižuje na polovicu. Poloha bodov šmykovej plochy je optimalizovaná postupne zľava doprava a optimalizácia končí v okamihu, keď pri poslednom behu nebol žiadny bod posunutý. Bližší popis jednotlivých metód je uvedený v manuáli k použitému softvéru^[W3, W4].

2.2.2 Prúžkové metódy s kruhovou šmykovou plochou

V prípade prúžkových metód s kruhovou šmykovou plochou sa predpokladá rozdelenie zemného telesa nad samotnou šmykovou plochou na bloky so zvislými deliacimi rovinami.



Obrázok 2.3: Statická schéma bloku pre kruhovú šmykovú plochu – Bishopova metóda (upravené z [W4])

Na obrázku 2.3 reprezentujú X_i a E_i šmykové a normálové sily medzi blokmi, T_i a N_i zasa šmykové a normálové sily na úsekoch šmykovej plochy, pričom W_i sú tiaže jednotlivých blokov. Jednotlivé prúžkové metódy sa líšia svojimi predpokladmi a splnením silových podmienok rovnováhy a momentovej podmienky okolo stredu O .

V praxi sa z tejto skupiny najčastejšie používajú metódy:

- *Bishopova metóda*
- *Fellenius/Pettersonova metóda*

2.3 Numerické metódy modelovania stability svahu

Všeobecným princípom riešenia všetkých numerických metód modelovania je transformácia úlohy pre riešenie sústav diferenciálnych rovníc na formálne jednoduchšiu úlohu pre riešenie sústav lineárnych algebraických rovníc pre neznáme hodnoty posunov (rýchlostí posunov) v uzlových bodoch siete. Na rozdiel od metód medznej rovnováhy nevyžadujú zadanie počiatočnej šmykovej plochy, vo výpočtoch je zahrnutý aj vplyv pretvorenia horninového prostredia, možnosti modelovania geometrickej a tvarovej variability sú podstatne lepšie, umožňujú získať komplexnú predstavu o napätiach, deformáciách, prúdení vody a stabilitej situácií vo svahovom telese, prípadne je možné modelovať aj sanačné opatrenia. Určitou nevýhodou všetkých numerických metód je časovo náročnejšia príprava výpočtového modelu, väčšie nároky na spoľahlivosť vstupných parametrov, dlhšia doba výpočtu a taktiež aj nároky na výpočtovú techniku (nutnosť riešenia rozsiahlych sústav rovníc).

Medzi najčastejšie používané numerické metódy patria:

- a) metóda konečných prvkov (**FEM**)
- b) metóda hraničných prvkov (hraničných integrálov, **BEM**)
- c) metóda konečných diferencií (metóda sietí, **FDM**)
- d) metóda oddelených elementov (**DEM**)

Metódy FEM, BEM a FDM sú vhodné pre modelovanie úloh v oblasti kontinua, metóda oddelených elementov (DEM) umožňuje riešiť úlohy z oblasti diskontinua^[w6].

2.3.1 Metóda konečných prvkov (MKP)

Metóda konečných prvkov je numerická metóda, ktorá je najčastejšie používaná na modelovanie rovinných aj priestorových úloh mechaniky zemných telies. Jedná sa o metódu variačnú, teda vychádza z minimalizácie energetického potenciálu. Podstatou metódy je diskretizácia skúmanej oblasti na rovinné alebo priestorové prvky konečných rozmerov (generovanie siete), ktoré sú medzi sebou spojené konečným počtom uzlových bodov. Najčastejšie používaným typom konečných prvkov v rovine sú trojuholníky. Teleso je následne zaťažené silami, ktoré pôsobia vo vrcholoch (uzloch) konečných prvkov, pričom tieto sily sú ekvivalentné pôvodnému zaťaženiu. Na každom konečnom prvku sa volí vhodná aproximačná funkcia presného riešenia, ktorá jednoznačne definuje stav posunutia vo vnútri tohto bloku pomocou posunutia jeho uzlov. Na základe tejto aproximácie sa potom s využitím podmienok pre minimalizáciu energetického potenciálu odvodí pre každý uzol rovnica rovnováhy, ktorá je funkciou týchto neznámych posunutí v uzlových bodoch siete. Tieto posuny spoločne s pretvárnymi charakteristikami materiálu a zvoleným konštitutívnym vzťahom medzi napätím a pretvorením definujú napäťový stav vo vnútri bloku a na jeho hraniciach. MKP umožňuje riešiť úlohy so zložitými okrajovými podmienkami, zložitou geometriou, umožňuje zohľadniť správanie materiálov charakterizované rôznymi konštitutívnymi vzťahmi, pričom každý prvok môže mať odlišné vlastnosti.

Analýza stability svahov pomocou metódy konečných prvkov je už dlhé roky široko akceptovaná odbornou verejnosťou. Súčasne SRM (Strenght Reduction Method - metóda znižovania pevnosti) a ELSM predstavujú hlavné metódy analýzy stability svahov založené na metóde konečných prvkov. Porovnanie medzi LEM a analýzami stability svahov pomocou konečných prvkov ukazujú výhody a obmedzenia týchto metód pri praktických inžinierskych problémoch.

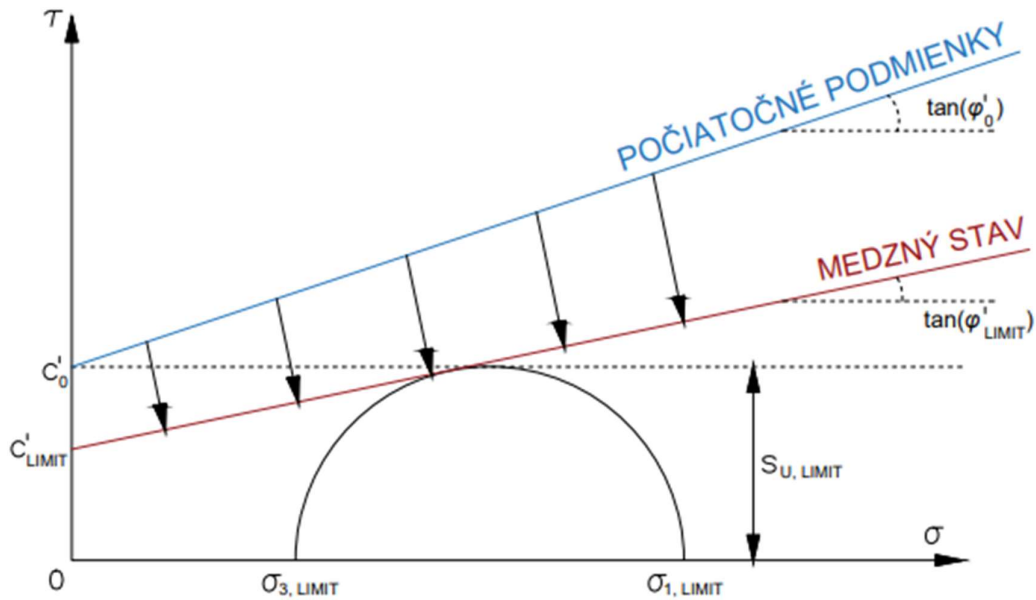
2.3.2 Metóda redukcie šmykovej pevnosti (SRM)

SRM bola po prvýkrát použitá pri analýze stability svahov už v roku 1975 Zienkiewiczom^[18] a kolektívom. Neskôr ju Matsui a San^[19] nazvali "*metódou redukcie parametrov šmykovej pevnosti*". V poslednej dekáde mnohí výskumníci použili SRM na analýzu problémov stability svahov a porovnali SRM a LEM^[11, 20]. Hlavnou výhodou SRM je, že kritická šmyková plocha sa automaticky určí zo šmykovej deformácie, ktorá sa zvyšuje s klesajúcou šmykovou pevnosťou. Avšak SRM má významnú nevýhodu - nedokáže identifikovať iné možné (lokálne) šmykové plochy.

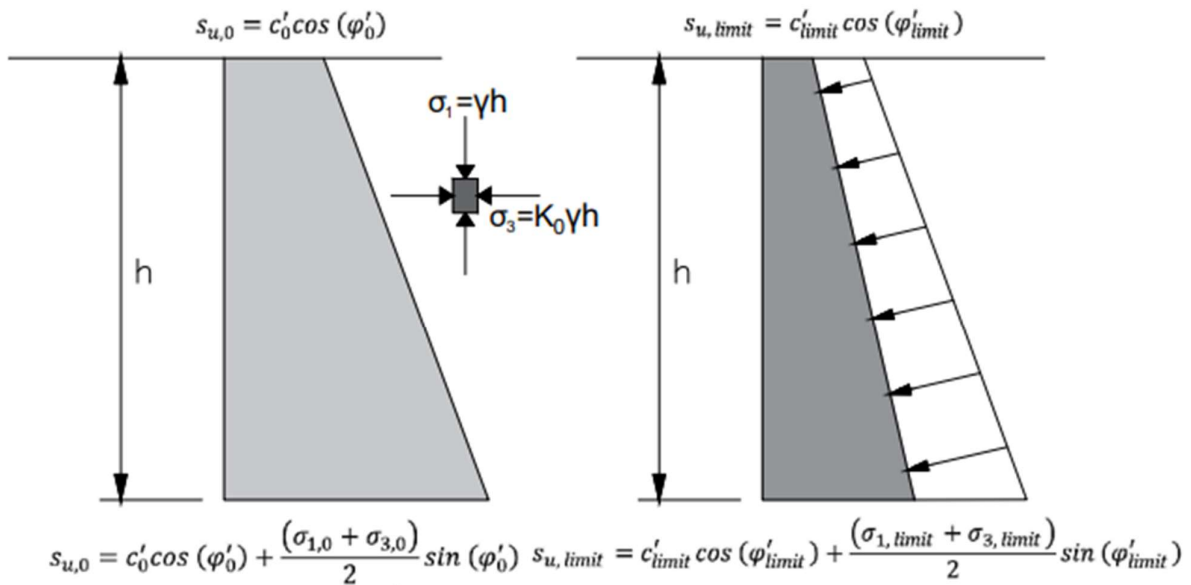
Analýzy stability svahu pomocou metódy konečných prvkov sú podrobné aproximačné riešenia, ktoré spĺňajú všetky podmienky rovnováhy síl, podmienky kompatibility, konštitučné rovnice a okrajové podmienky pre každý bod na svahu. Táto číselná analýza môže simulovať takmer všetky reálne tvary zlyhania, lepšie odráža terénne podmienky a dokáže podrobne analyzovať minimálny stupeň bezpečnosti a správanie sa svahu pri zlyhaní. Proces zlyhania stability svahu je automaticky simulovaný bez akýchkoľvek predpokladov o šmykovej ploche.

Metóda redukcie pevnosti (SRM) postupne znižuje šmykovú pevnosť a analyzuje model až do bodu, kde výpočet nekonverguje. Tento bod sa považuje za bod zlyhania svahu a maximálny pomer redukcie pevnosti v tomto bode sa považuje za minimálny stupeň bezpečnosti svahu. Táto metóda je náročná na výpočtový výkon, pretože vyžaduje viacero nelineárnych analýz, ale môže poskytnúť presnejšie výsledky v rozumnom čase pre presnejšie spracovanie dát. Okrem toho SRM dokáže overiť proces deformácie od počiatočného stavu až po zlyhanie. Pre výpočet stavu zlyhania svahu pomocou SRM sa stupeň bezpečnosti vypočíta v ľubovoľnom bode, kde je Mohrova kružnica v kontakte s obálkou zlyhania, ako je zobrazené na obrázku 2.4.

PODMIENKA PORUŠENIA V ZOBRAZENÍ σ - τ



POČIATOČNÉ PODMIENKY $\xrightarrow{\text{METÓDA SRM}}$ MEDZNÝ STAV



Obrázok 2.4: Princíp metódy redukcie parametrov šmykovej pevnosti (SRM, upravené z [23])

Z hľadiska stabilitných výpočtov býva v materiálových modeloch implementovaná Mohr-Coulobova podmienka porušenia. Pre použité vstupné parametre sa predpokladá, že všetky premenné majú konštantnú hodnotu okrem (parametrov určujúcich šmykové zlyhanie) kohézie (c'), uhlu vnútorného trenia (φ') a uhlu dilatancie (ψ). Vymenované parametre sa postupne znižujú a vypočíta sa stupeň bezpečnosti FoS ^[2] (rovnica 2.8) pri zlyhaní svahu.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad 2.8$$

Tu τ_f predstavuje šmykovú pevnosť materiálu svahu, ktorá môže byť vyjadrená pomocou *Mohr-Coulombových* kritérií podľa vzorca 2.9.

$$\tau_f = c'_f + \sigma'_n \tan \varphi'_f \quad 2.9$$

Premenná τ_m vo vzorci reprezentuje šmykové napätie na šmykovej ploche a môže byť vypočítané podľa rovnice 2.10.

$$\tau_m = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad 2.10$$

$$c'_f = \frac{c'}{SRF} \quad 2.11$$

$$\varphi'_f = \arctan \left(\frac{\tan \varphi'}{SRF} \right) \quad 2.12$$

Kde SRF je faktor redukcie (šmykovej) pevnosti (Strenght Reduction Factor). FoS je rovný hodnote SRF , ktorá spôsobuje zlyhanie svahu. Griffiths a Lane^[20] poznamenali, že táto definícia FoS je presne rovnaká ako tá, ktorá sa používa v metóde LEM. Stupeň bezpečnosti (FoS) môže byť mierne odlišný v závislosti od počtu konvergencií a kritérií konvergence zadaných používateľom.

Podľa Chenga^[38] môže byť získaná kritická šmyková plocha definovaná ako vlnitá čiara, ktorá spája body s maximálnym prírastkom šmykovej deformácie. Zheng^[1] podobne definoval kritickú šmykovú plochu ako vlnitú čiara, spájajúcu body s maximálnou ekvivalentnou plastickou deformáciou. V oboch prípadoch by malo dôjsť k vyhladeniu pomocou metódy najmenších štvorcov.

Kritické šmykové plochy pre výpočty s SRM v praktickej časti práce (kapitoly 6, 7 a 8) sú identifikovateľné v zobrazení totálneho deviátorického pretvorenia γ_s .

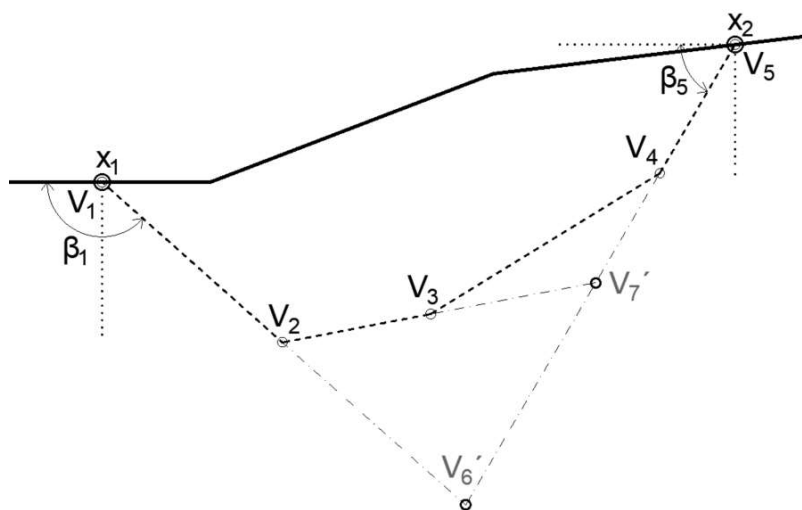
3 POPIS METÓDY ELSM

3.1 Úvod

Pokročilá metóda výpočtu stability svahu pomocou limitného (medzného) rovnovážneho stavu (ESLM) s využitím napätí vypočítaných pomocou metódy konečných prvkov hľadá kritickú šmykovú plochu s minimálnym stupňom bezpečnosti (FoS) v zadanej oblasti. Hlavným cieľom ELSM je identifikovať kritickú šmykovú plochu pomocou matematickej optimalizácie. Na určenie kritickej šmykovej plochy sa používa niekoľko techník a rôznych optimalizačných metód, ako napríklad metóda dynamického programovania^[34] (Dynamic Programming Method), algoritmus Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno^[35] (BFGS), vyhľadávanie podľa vzoru^[36] (Pattern Search) a optimalizácia rojom častíc^[12, 14, 15] (Particle Swarm Optimisation – PSO). V tejto práci bola použitá optimalizačná metóda PSO.

3.2 Generovanie počiatočnej šmykovej plochy (Trial Slip Surface)

Algoritmus na generovanie skúšobnej šmykovej plochy použitý v tejto práci je podobný ako používaný v práci Greco^[7], Malkawi^[8] a kol., Cheng^[10] a kol., Li^[6] a kol. Je uvažované so skúšobnou šmykovou plochou, ktorá je tvorená štyrmi segmentmi s piatimi vrcholmi (obrázok 3.1).



Obrázok 3.1: Generovaná skúšobná šmyková plocha (upravené z [10])

Ak sa uvažuje so šmykovou plochou tvorenou štyrmi segmentami a piatimi vrcholmi, je teda potrebných osem riadiacich premenných reprezentovaných vektorom V .

$$V = (x_1, x_5, \beta_1, \beta_5, d_5, d_6, d_7, d_8).$$

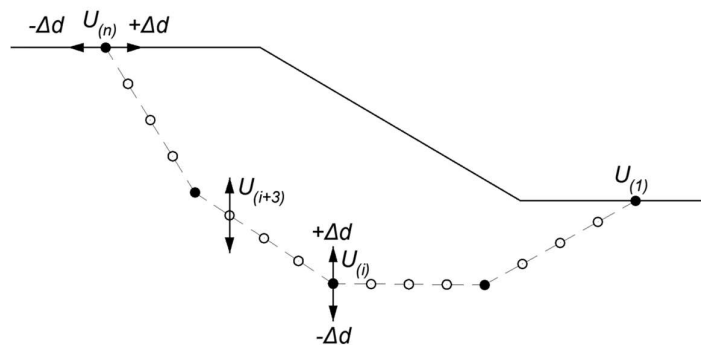
Premenné x_1 a x_5 predstavujú súradnice na osi x počiatočného bodu V_1 a koncového bodu V_5 , β_1 a β_5 definujú sklony prvého a posledného segmentu šmykovej plochy (obrázok 3.1), pričom d_5, d_6, d_7 a d_8 sú náhodné čísla v rozsahu (0,2 až 0,8). Skúšobná plocha je vytvorená podľa trojkrovového postupu. Najskôr sa po zadaní (vygenerovaní náhodných hodnôt v určených intervaloch) prvých štyroch riadiacich premenných x_1, x_5, β_1 a β_5 získa dočasný priesečník V'_6 . Druhým krokom je na základe náhodných čísel d_5 a d_6 , určiť polohu vrcholu V_2 a dočasného vrcholu V'_7 pomocou sady rovníc 3.1.

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + \delta_5(x_1 - x'_6) \\ y_2 &= y_1 + \delta_5(y_1 - y'_6) \\ x'_7 &= x'_6 + \delta_6(x_5 - x'_6) \\ y'_7 &= y'_6 + \delta_6(y_5 - y'_6) \end{aligned} \quad 3.1$$

Tretím krokom je s využitím rovníc zostavených podľa rovnakého princípu nájsť body V_3 a V_4 . Všeobecne platí, že skúšobnú plochu s m segmentmi je možné získať pomocou podobného krokového procesu na základe vektora V .

$$V = (x_1, x_{m+1}, \beta_1, \beta_{m+1}, d_5, \dots, d_{2m}).$$

Posun pozdĺž šmykovej plochy sa predpokladá po krivke, ktorá je diskretizovaná do niekoľkých segmentov. Čím viac vrcholov je použitých, tým "hladšia" je krivka a vyššia je výpočtová presnosť. Avšak výpočet s veľkým počtom riadiacich premenných je časovo náročný. Preto táto metóda diskretizuje každý segment medzi (primárnymi) riadiacimi bodmi (s plným kruhom) pomocou danej veľkosti siete, ako je znázornené na obrázku 3.2 (terminológia prevzatá z [2]).



Obrázok 3.2: Diskretizácia šmykovej plochy (plný kruh – primárne riadiace body, prázdny kruh – sekundárne riadiace body, upravené z [2])

Nové priesečníky sa nazývajú "sekundárne riadiace body" (na obrázku prázdny kruh). Počet všetkých bodov na šmykovej ploche je teda rovný súčtu primárnych riadiacich bodov a sekundárnych riadiacich bodov. Avšak **počet riadiacich premenných závisí len na počte primárnych riadiacich bodov**. Cieľom tejto vyhľadávacej stratégie je zaistiť "hladkosť" posunu pozdĺž šmykovej plochy a zároveň minimalizovať počet riadiacich premenných.

3.3 Výpočet stupňa bezpečnosti (FoS)

V metóde ELSM je pre ľubovoľnú plochu posunu L stupeň bezpečnosti FoS definovaný vo vzťahu^[2] 3.2.

$$FoS = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{fi} \Delta L_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{mi} \Delta L_i} = \frac{\int \tau_f dL}{\int \tau_m dL} \quad 3.2$$

kde n je počet diskretných segmentov pozdĺž L a ΔL_i je dĺžka segmentu i . Na základe napätí vypočítaných pomocou metódy konečných prvkov je možné šmykové napätie τ_{m_i} a efektívne normálne napätie σ'_i vyjadriť pomocou vzorca 3.3.

$$\tau_{m_i} = \frac{\tau_{f_i}}{FoS(\Delta L_i)} = \frac{c' + \sigma'_i \tan \varphi'}{FoS(\Delta L_i)} = \frac{c'}{FoS(\Delta L_i)} + \sigma'_i \frac{\tan \varphi'}{FoS(\Delta L_i)} \quad 3.3$$

Kde $FoS(\Delta L_i)$ je funkcia redukčného faktoru pevnosti pre segment i :

$$\frac{\sum_{i=1}^n \tau_{f_i} \Delta L_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{m_i} \Delta L_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (c' + \sigma'_i \tan \varphi') \Delta L_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{c'}{FoS(\Delta L_i)} + \sigma'_i \frac{\tan \varphi'}{FoS(\Delta L_i)} \right) \Delta L_i} = \frac{\int \tau_f dL}{\int \frac{\tau_f}{FoS(\Delta L_i)} dL} \quad 3.4$$

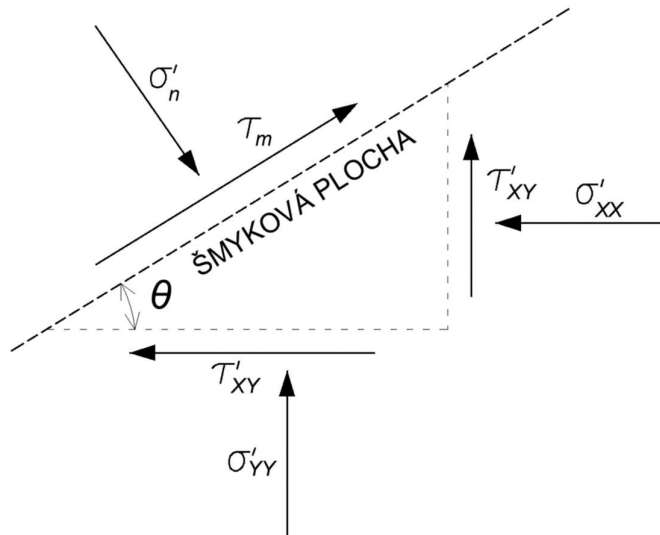
Na základe základných pravidiel o integráciách, dolná pravá strana rovnice 3.4 môže byť transformovaná do formy uvedenej v rovnici 3.5.

$$\int \frac{\tau_f}{FoS(\Delta L_i)} dL = \frac{\int \tau_f dL}{FoS} \quad 3.5$$

Podľa rovníc 3.4 a 3.5 môže byť FoS v metóde ELSM vyjadrený rovnakým spôsobom ako v rovnici 3.2. Fyzický význam stupňa stability FoS v metóde ELSM pre šmykovú plochu, ktorá nie je priama a ani kruhová, bol niekoľkými autormi spochybnovaný, pretože integrácia v rovnici 3.2 nie je ani súčtom vektorov síl v priestore, ani súčtom projekcií vektorov síl v pevne stanovenom smere^[33]. Avšak niekoľko iných výskumníkov už dokázalo, že táto definícia je v praxi akceptovateľná^[21, 24, 35, 36].

Bežné definície metód LEM a SRM môžu byť interpretované ako dva rôzne spôsoby získania sady parametrov zníženia šmykovej pevnosti, ktoré spôsobia, že svah dosiahne svoj kritický stav rovnováhy. Na základe odvodených vzťahov pre metódu ELSM bolo teda dokázané, že definícia FoS je tiež založená na znížení pevnosti, rovnako ako je to v prípade metód LEM a SRM.

Na segment šmykovej plochy i s dĺžkou ΔL_i pôsobia napätové zložky znázornené na obrázku 3.3.



Obrázok 3.3: Schéma zložiek napätí, pôsobiacich na segment šmykovej plochy (upravené z [2, W2])

V tejto schéme reprezentuje τ_m mobilizované šmykové napätie a τ_f šmykovú pevnosť, ktoré sú pre Mohr-Coulombov materiálový model definované podľa vzorcov 3.6 a 3.7.

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad 3.6$$

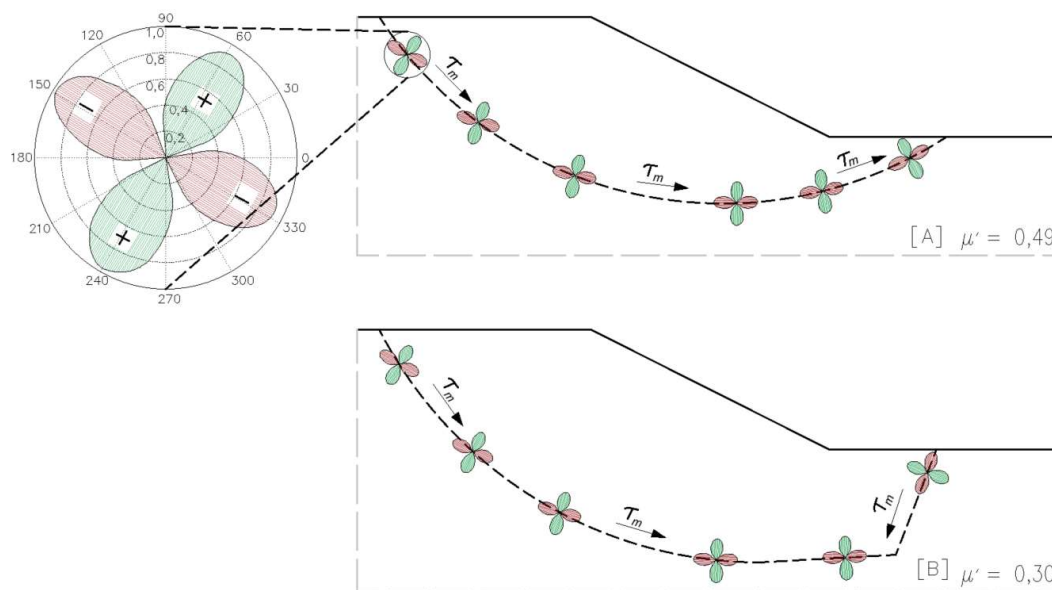
$$\tau_m = \frac{1}{2} (\sigma'_{yy} - \sigma'_{xx}) \sin 2\theta + \tau'_{xy} \cos 2\theta \quad 3.7$$

Kde θ je uhol medzi horizontálnou a šmykovou rovinou, σ'_{xx} a σ'_{yy} sú efektívne normálové napätia v smere x a y , τ'_{xy} je efektívne šmykové napätie. Efektívne napätie kolmé na šmykovú plochu σ'_n , vystupujúce v týchto vzťahoch, je možné vyjadriť pomocou vzorca 3.8^[W2].

$$\sigma'_n = \sigma'_{xx} \sin^2 \theta + \sigma'_{yy} \cos^2 \theta - \tau'_{xy} \sin 2\theta \quad 3.8$$

3.4 Vplyv Poissonovho čísla μ na ELSM

Griffiths a Lane^[20] poznamenali, že na stupeň stability zistený pomocou analýzy metódou SRM majú elastické parametre minimálny vplyv. Na stupeň stability a tvar šmykovej plochy v metóde ELSM však má podľa Liu^[2] a kol. vplyv aj hodnota Poissonovho čísla μ . Fredlund^[3] zistil, že vo vybraných prípadoch je stupeň bezpečnosti FoS vypočítaný metódou ELSM väčší, ak je hodnota Poissonovho súčiniteľa $\mu = 0,5$ v porovnaní s $\mu = 0,3$. Vysvetlením môže byť fakt, že stav, pri ktorom je hodnota Poissonovho čísla blízka hodnote $\mu = 0,5$; zodpovedá nulovej objemovej zmene (pohyb tuhého telesa). Získaný stupeň bezpečnosti FoS je v tomto prípade veľmi blízky stupňu bezpečnosti z LEM analýzy.



Obrázok 3.4: Smer šmykových napätí pozdĺž šmykovej plochy (upravené z [2]), pre obrázok [A] v prípade $\mu = 0,49$, [B] s $\mu = 0,30$. V polárnom súradnicovom systéme (zväčšený detail), je uhlová súradnica $\theta = \alpha + 90^\circ$, radiálna súradnica $r = |\tau_{\max}/\tau|$.

Na obrázku 3.4 sú vykreslené šmykové napätia v rôznych smeroch pozdĺž šmykovej plochy pre dve rôzne hodnoty Poissonovho súčiniteľa. V prípade variantu **A** ($\mu = 0,49$) má smer šmykových napätí rovnaký trend pozdĺž celej šmykovej plochy. Druhý variant (**B**, $\mu = 0,30$) má v poslednom segmente opačný smer šmykových napätí (proti pohybu zosúvajúcej sa hmoty), tento tvar šmykovej plochy nie je prípustný. Z vyššie uvedenej štúdie vyplýva, že kľúčovou podmienkou napätového poľa požadovaného pre ELSM analýzu je rovnaký trend šmykových napätí pozdĺž šmykovej plochy.

3.5 Vplyv uhlu dilatancie ψ na ELSM

Asociovaná a neasociovaná plasticita

V analýze metódou SRM uhol dilatancie ψ ovplyvňuje stupeň bezpečnosti FoS a tvar kritickej šmykovej plochy. Podľa Griffithsa a Lanea^[20] je stupeň bezpečnosti FoS získaný SRM analýzou so zvoleným uhlom dilatancie materiálov $\psi = 0$ dostatočne spoľahlivý. Pokiaľ sa však uvažuje s asociovanou plasticitou ($\psi = \varphi'$), napätové a rýchlostné charakteristiky sa zhodujú a je očakávaná vyššia zhoda medzi mechanizmami zlyhania predikovanými metódou konečných prvkov (MKP) a kritickými šmykovými plochami generovanými metódami medznej rovnováhy (LEM).

Asociovaná a neasociovaná plasticita^[55, 56] sú dva rôzne prístupy k modelovaniu plastického správania materiálov v mechanike zemín:

- Asociovaná plasticita:

- v prípade asociovanej plasticity sa uhol dilatancie (ψ) a efektívny uhol vnútorného trenia (φ') považujú za zhodné, to znamená, že $\psi = \varphi'$
- asociovaná plasticita sa často používa pri modelovaní jednoduchých materiálov, ako sú kovy, kde nie je pozorovaná výrazná disociácia medzi ψ a φ'
- plocha plasticity je totožná s plochou plastického potenciálu
- vhodná pre zeminy s kontraktantným správaním (napríklad kypré piesky)
- nevhodná pre zeminy s dilatantným správaním (napríklad prekonsolidované íly)

- Neasociovaná plasticita:

- v prípade neasociovanej plasticity môže byť uhol dilatancie (ψ) odlišný od efektívneho uhlu vnútorného trenia (φ')
- plocha plasticity nie je totožná s plochou plastického potenciálu

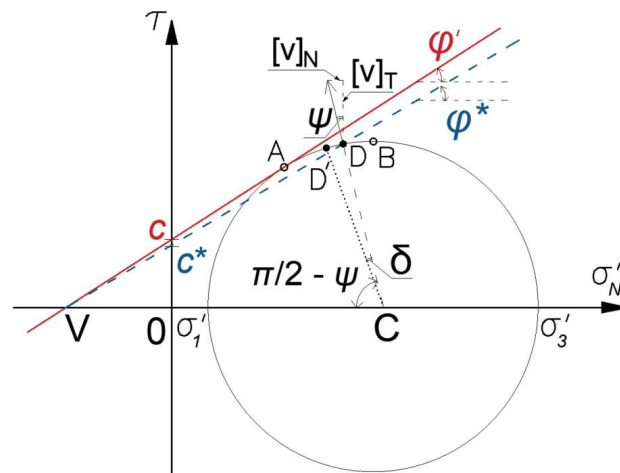
Davisov vzťah

Davisov vzťah (prístup) je matematický model asociovaného plastického toku v mechanike zemín. Tento prístup bol vyvinutý Dr. Edwinom W. Davisom^[32] v 50. rokoch 20. storočia a je jedným z najznámejších modelov asociovej plasticity používaných v geotechnike. Davis uvažuje s konverziou neasociovaného plastického MC modelu do ekvivalentného asociovaného plastického modelu podľa vzťahu 3.9.

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma'_n \tan \varphi' (0 \leq \psi < \varphi') \Rightarrow \\ \Rightarrow \tau_f &= c^* + \sigma'_n \tan \varphi^* (\psi^* = \varphi^*) \end{aligned} \quad 3.9$$

V uvedenom vzťahu reprezentuje φ' efektívny uhol vnútorného trenia materiálu a ψ uhol dilatancie neasociovaného plastického MC modelu, pre $\psi = 0$ nedochádza k vzniku plastických objemových deformácií. Premenné c^* , φ^* a ψ^* sú parametrami ekvivalentného asociovaného plastického MC modelu. Prevedená rovnica šmykovej pevnosti znamená, že na čiare diskontinuity rýchlosti musia efektívne normálové napätia σ'_n a šmykové napätia τ_m spĺňať Coulombovu podmienku šmykovej pevnosti (3.9). Okrem toho zložky rýchlostí $[v]_n$ a $[v]_t$ musia spĺňať podmienku vo vzťahu 3.10 (obrázok 3.5).

$$[v]_n = [v]_t \tan \psi \quad 3.10$$



Obrázok 3.5: Ekvivalentná Mohr-Coulombova (φ^* , c^*) obálka zlyhania prevedená z neasociovanej Mohr-Coulombovej obálky (φ' , c') zlyhania (upravené z [32])

Z obrázku 3.5 taktiež vyplýva aj vzťah 3.11, z ktorého je za predpokladu v rovnici 3.12 možné odvodiť vzorec pre výpočet tangenty ekvivalentného uhlu vnútorného trenia φ^* (3.13).

$$\frac{\overline{CD}}{\sin\varphi^*} = \frac{\overline{VD}}{\sin(\pi/2 - \psi)} \quad 3.11$$

$$\overline{CD} = \overline{VC}\sin\varphi', \overline{VD} = [\overline{VC} - \overline{CD}\cos(\pi/2 - \psi)]/\cos\varphi^* \quad 3.12$$

$$\tan\varphi^* = \frac{\sin\varphi' \cos\psi}{1 - \sin\varphi' \sin\psi} = \frac{\cos\varphi' \cos\psi}{1 - \sin\varphi' \sin\psi} \tan\varphi' \quad 3.13$$

Nové šmykové pevnostné parametre ekvivalentného asociovaného plastického modelu je možné definovať pomocou súčiniteľa β (3.14) podľa sady rovníc 3.15.

$$\beta = \frac{\cos\varphi' \cos\psi}{1 - \sin\varphi' \sin\psi} \quad 3.14$$

$$c^* = \beta c'; \varphi^* = \beta \tan\varphi' \quad 3.15$$

V prípade, že sa uhol dilatancie rovná efektívnemu uhlu vnútorného trenia ($\psi = \varphi'$), tak súčiniteľ $\beta = 1$. Ak je však uhol dilatancie nulový ($\psi = 0$), tak súčiniteľ $\beta = \cos\varphi'$, teda platí $\cos\varphi' \leq \beta \leq 1$.

Existujú rôzne prístupy k získaniu redukovaných parametrov šmykovej pevnosti, v praktickej časti práce v podkapitolách 6.2.3, 6.3.3 a 7.3 bol použitý jednoduchý prístup, pri ktorom je redukčný faktor parametrov šmykovej pevnosti β rovnaký na začiatku výpočtu a pri zlyhaní, teda platí $\beta = \beta_0 = \beta_{failure}$ (v štúdií podľa Tschuchnigga^[31] a kol. je tento prístup označený ako Davis A).

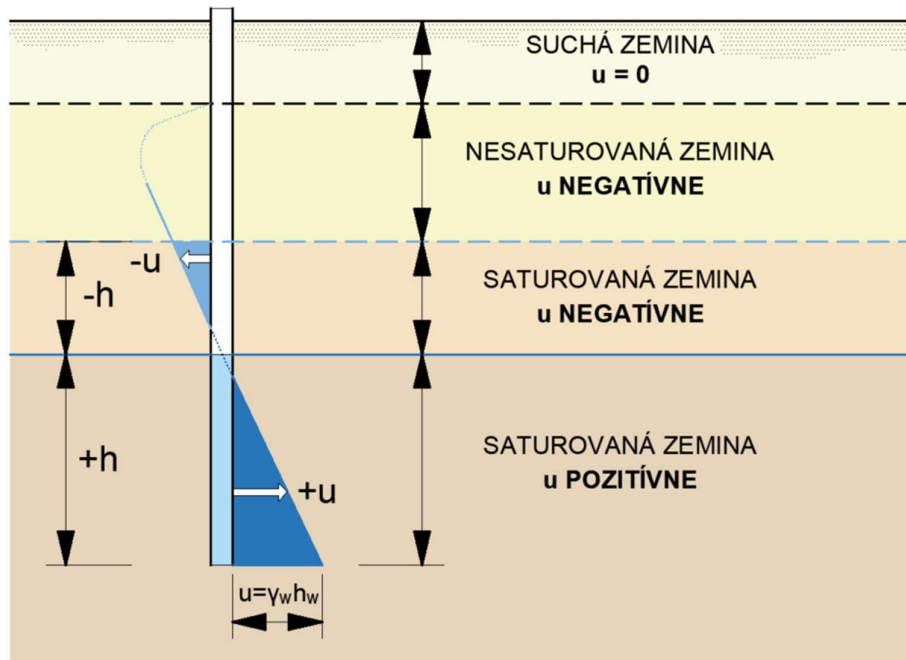
3.6 Vplyv sania na ELSM

Metóda ELSM preberá stav napätosti, a teda aj vplyv na výsledný stupeň stability (FoS), z výpočtu pomocou MKP. V práci prebehol výpočet napätosti pomocou komerčného MKP riešiča **Plaxis 2D**^[W5], kde sanie reprezentuje pozitívna hodnota rozdielu medzi pórovým tlakom vody a vzduchu ($p_a - p_{water}$). Tlak vzduchu v póroch je konštantný a obvykle malý, preto je uvažovaný s nulovou referenčnou hodnotou ($p_a = 0$), sanie je teda napätovou zložkou v p_{water} . Pre plne saturovanú zeminu sa *aktívny pórový tlak* rovná *pórovému tlaku vody*, takže $S_{eff} = 1$. Z toho vyplýva, že *aktívny pórový tlak* je príspevok pórového tlaku v totálnych napätiach.

$$p_{active} = S_{eff} p_{water} \quad 3.16$$

$$S_{eff} = \frac{(S - S_{res})}{(S_{sat} - S_{res})} \quad 3.17$$

Vo vzorcoch 3.16 a 3.17 reprezentuje S_{eff} efektívny stupeň saturácie (v prípade nesaturovanej zeminy sa jedná o pomer sania v aktívnych pórových napätiach), S je stupeň saturácie, S_{res} je reziduálny stupeň saturácie a S_{sat} predstavuje stupeň plnej saturácie (1,0).



Obrázok 3.6: Pórový tlak v zemine

Ak je uvažované so saním, jeho mechanický účinok je možné do Mohr-Coulombovho kritéria zlyhania doplniť pomocou definície efektívneho napätia podľa rovnice 3.18.

$$\tau_f = f(\sigma') = c' + \sigma \tan \varphi' - S_{eff} p_{water} \tan \varphi' \quad 3.18$$

4 POPIS OPTIMALIZAČNEJ PROCEDÚRY PSO (PARTICLE SWARM OPTIMISATION)

4.1 Definícia

Optimalizácia rojom častíc (Particle Swarm Optimization) je algoritmus schopný optimalizovať nelineárne a viacrozmerné problémy, pričom účinne dosahuje prijateľné riešenia s minimálnymi požiadavkami na parametrizáciu.

Algoritmus a jeho koncept boli predstavené **Jamesom Kennedym a Russelom Ebhartom**^[12] v roku **1995**. Jeho pôvod však siaha ešte ďalej, keďže základný princíp optimalizácie pomocou roja je inšpirovaný predchádzajúcimi pokusmi o napodobnenie pozorovaného správania živočíchov vo svojom prirodzenom prostredí, ako je skupinové lietanie vtákov alebo plávanie rýb, pôvodcom je preto samotná príroda. Tieto korene v prírodných procesoch rojov vedú k zaradeniu algoritmu medzi *swarm intelligence*, teda decentralizované kolektívne jednanie systémov s vlastnou organizáciou. Roj si vďaka vzájomnej komunikácii predáva informácie, pričom každý jedinec má svoju osobnú pamäť.

Algoritmus pracuje s rojom n častíc, ktoré sú náhodne rozmiestnené vo vopred definovanom prehľadávanom priestore $[x_{min}, x_{max}]$ s polohami častíc $x_i = \{x_i, \dots, x_p\}$, pričom p je rozmer účelovej funkcie. Počiatočná vygenerovaná rýchlosť častíc je nulová $v_i = \{0, \dots, 0\}$. V nasledujúcom kroku sa do pamäti častice priradí jej najlepšia osobná pozícia $p_i \leftarrow x_i$. Pre všetky častice sa z účelovej funkcie $f(x_i)$ vyberie najlepšia hodnota a častici, ktorá túto hodnotu dosiahla, sa hodnota priradí do globálnej pamäte $g^* \leftarrow x_i$. Ďalej opakovane prebieha cyklus, pokiaľ nie je dosiahnuté jedno z vopred definovaných kritérií ukončenia (požadovaná presnosť, maximálny počet iterácií, prípadne zmena účelovej funkcie v niekoľkých po sebe nasledujúcich iteráciách). Na začiatku každej iterácie je v prvom kroku vyhodnotená podľa výsledkov predchádzajúcej iterácie nová rýchlosť (na základe zmeny polohy) častice, poloha je teda aktualizovaná podľa vzorca 4.1.

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = v_i^t + c_1 \epsilon_1 \odot (p_i - x_i^t) + c_2 \epsilon_2 \odot (g^* - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad 4.1$$

Kde premenné reprezentujú:

v_i^{t+1} je rýchlosť častice v nasledujúcej iterácií

v_i^t je rýchlosť častice v aktuálnej iterácií

x_i^{t+1} je pozícia častice v nasledujúcej iterácii

x_i^t je pozícia častice v aktuálnej iterácii

ϵ_1 a ϵ_2 sú vektory náhodných čísel

p_i je najlepšia osobná pozícia častice

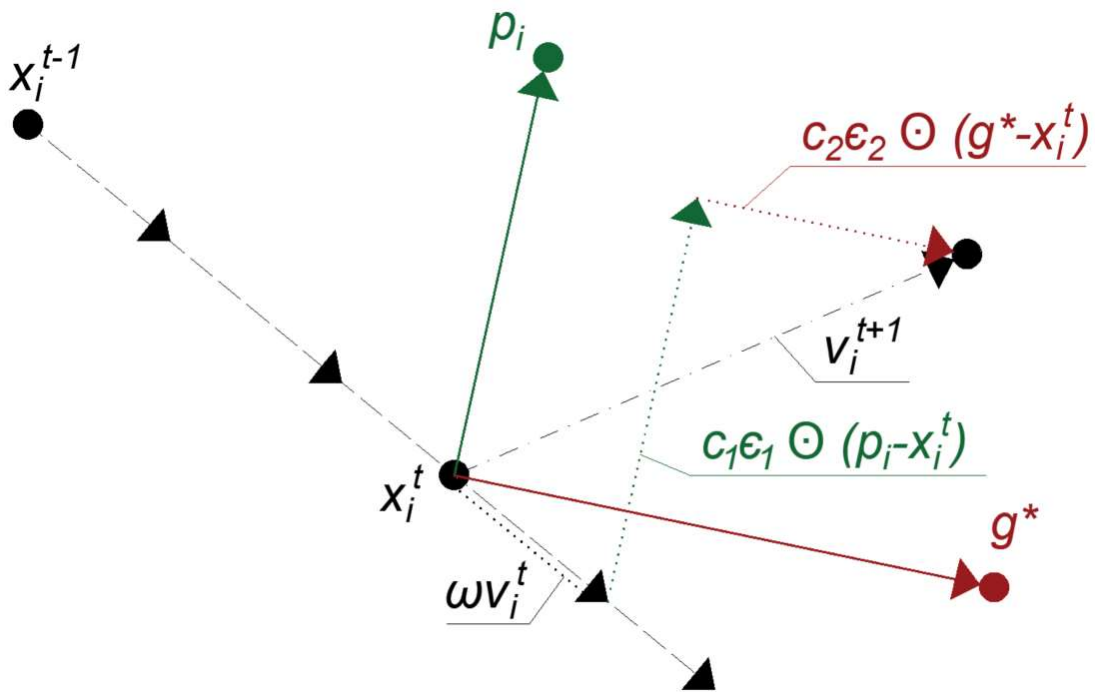
g^* je najlepšia globálna pozícia častice

c_1 a c_2 sú akceleračné konštanty

\odot symbolizuje vektorové násobenie

V prvej časti vzťahu 4.1 sa vypočíta zotrvačnosť častice pre výpočet rýchlosti, v druhej sa zahrňuje vplyv najlepšej osobnej polohy častice p_i , ktorá bola dosiahnutá do iterácie t a je pre každú časticu jedinečná.

Podobne ako pri generovaní roja častíc sa porovnáva, či daná častica dosiahla lepšiu hodnotu objektívnej funkcie ako v predchádzajúcom cykle. V prípade, že áno, tak jej najlepšia osobná poloha p_i je nahradená súčasnou polohou častice x_i , pričom tento proces prebieha pre všetky častice. V poslednom kroku sa pred opakovaním cyklu z funkčných hodnôt v aktuálnom cykle vyberie najlepšia hodnota, ktorá sa porovná s najlepšou globálnou pozíciou všetkých častíc do tejto iterácie. Ak sa stane, že táto funkčná hodnota účelovej funkcie je lepšia ako pri najlepšej globálnej pozícii častíc g^* , je nahradená pozíciou častice x_i , ktorá odpovedá funkčnej hodnote účelovej funkcie. Sociálne správanie roja predstavuje tretia časť vzorca, ktorá zároveň zavádza vplyv najlepšej pozície, ktorú dosiahla akákoľvek častica do iterácie t . Najlepšia globálna pozícia častíc g^* je kolektívnou pamäťou, ktorá je prístupná a spoločná pre všetky častice.



Obrázok 4.1: Pohyb častice medzi iteráciami (upravené z [13])

V dvojrozmernom priestore je pohyb častice ilustrovaný na obrázku 4.1. Znárodné vektory pre výpočet rýchlosti zodpovedajú vzťahu 4.2.

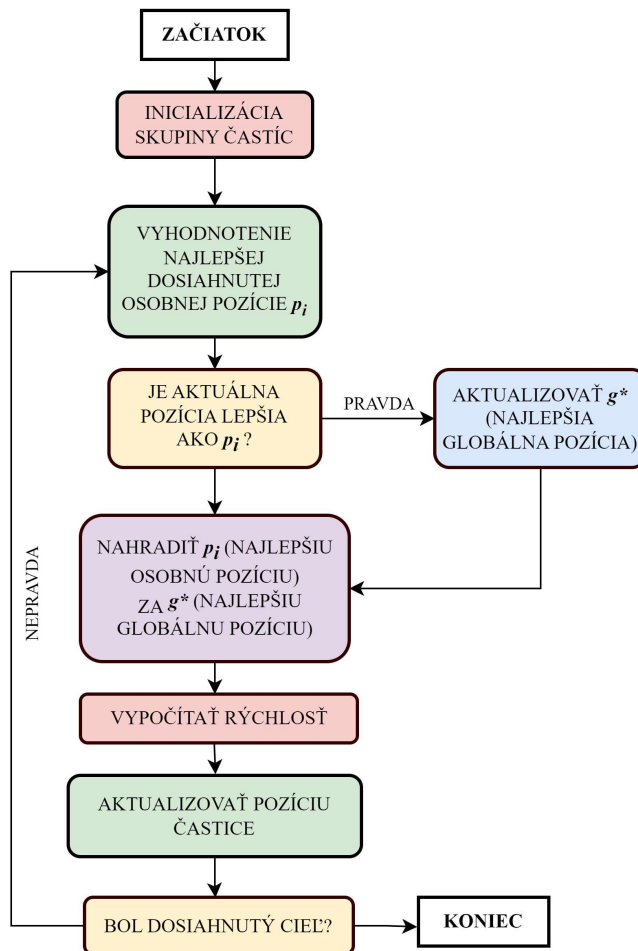
$$\begin{cases} \mathbf{v}_i^{t+1} = \omega \mathbf{v}_i^t + c_1 \epsilon_1 \odot (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i^t) + c_2 \epsilon_2 \odot (\mathbf{g}^* - \mathbf{x}_i^t) \\ \mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \end{cases} \quad 4.2$$

Tu ω značí koeficient zotrvačnosti (váhy inercie), ovplyvňujúci rýchlosť konvergencie a úspešnosť nájdenia správneho riešenia (vhodný interval hodnôt pre tento parameter je 0,9 až 1,2). Pokiaľ za ω dosadíme hodnotu 1, dostávame vzťah 4.1. Vo forme pseudokódu je možné pôvodný algoritmus zapísať týmto spôsobom:

Pseudoalgoritmus 1: Pôvodný algoritmus PSO^[13]

```
1:  $t = 0$ 
2: Vygeneruj  $n$  častíc v prehľadávanom priestore s  $p$  prvkami podľa rozmerov úlohy
ako  $x_i$  a ich počiatočné rýchlosti  $v_i$ 
3: Prirad' jednotlivým časticiam  $p_i \leftarrow x_i$ 
4: Vyhodnoť účelovú funkciu  $f(x_i^t)$  a prirad'  $g_i \leftarrow x_g$  podľa  $f(x_g^t) = \min\{f(x_1^t), \dots, f(x_n^t)\}$ 
5: while (kritérium) do
6:    $t = t + 1$ 
7:   for iterácia =  $t$  do
8:     for všetky častice do
9:       Vyhodnoť novú rýchlosť  $v_i^t$  a novú polohu častice  $x_i^t$  podľa 4.1
10:      Vyhodnoť účelovú funkciu pre  $f(x_i^t)$ 
11:      Nájdi  $f(x_g^t) = \min\{f(x_1^t), \dots, f(x_n^t)\}$ 
12:      if  $f(x_i^t) < f(p_i)$  then
13:         $p_i \leftarrow x_i^t$ 
14:      if  $f(x_g^t) < f(g^*)$  then
15:         $g^* \leftarrow x_g^t$ 
```

Postup optimalizácie pomocou roja častíc je graficky znázornený na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2: Schéma priebehu optimalizácie pri PSO (GBEST)

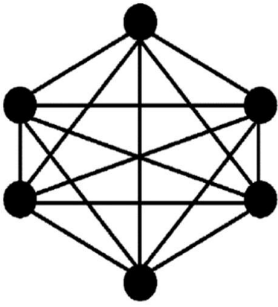
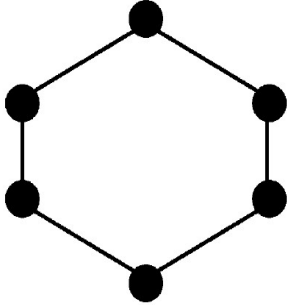
4.2 Základné modely PSO

Od začiatku boli v PSO vyvíjané dva prístupy ku komunikácii a predávaniu informácií medzi časticami (Ebhart a Kennedy^[12]). Prvý model sa nazýva LBEST a je špecifický tým, že častice si informácie o najlepšom dosiahnutom globálnom výsledku predávajú len v rámci svojich susedov v definovanej veľkosti okolia. Týmto spôsobom sú všetky častice prepojené nepriamo.

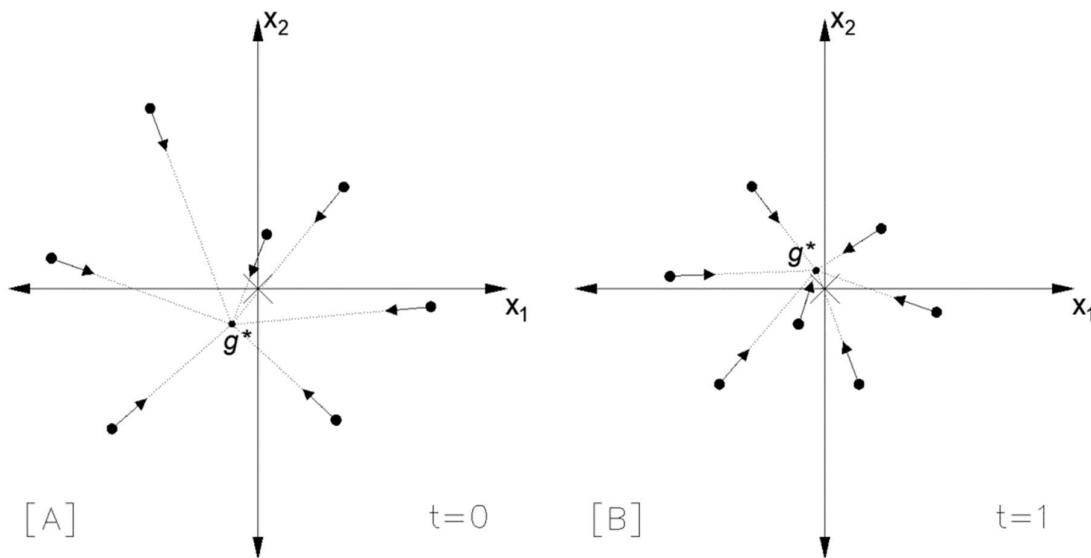
Druhý model má názov GBEST a zahrňuje komunikáciu medzi všetkými časticami v roji, prepojenie je teda priame. Podľa štúdií od autorov^[12, 14, 15] má model GBEST výhodu v konvergencii všetkých častíc k extrémnej funkcii, no LBEST pri určitom nastavení vnútorných parametrov vykazuje odolnosť voči uviaznutiu v lokálnom minime funkcii.

Porovnanie základných vlastností oboch variantov sa nachádza v tabuľke 4.1.

Tabuľka 4.1: Porovnanie základných variantov PSO (GBEST a LBEST)

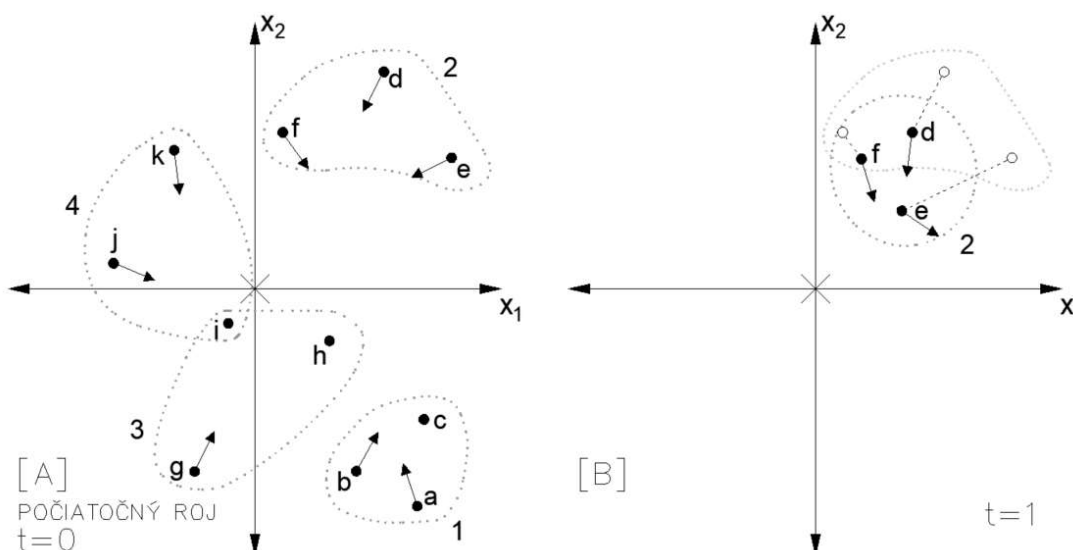
	GBEST (Global Best)	LBEST (Local Best)
Výmena informácií medzi časticami	každá častica sa snaží orientovať svoj pohyb na základe globálneho najlepšieho riešenia	sústreduje sa na lokálne najlepšie riešenia v okolí danej častice, ktorá sa snaží vylepšiť svoje riešenie na základe skúseností častíc v jej blízkosti
Schéma komunikácie častíc	 <p>hviezdicová "updatedStar"</p>	 <p>najčastejšie kruhová "ring"</p>
Konvergencia/diverzita riešenia	väčšia vzájomná prepojenosť častíc spôsobuje rýchlejšiu konvergenciu a nižšiu diverzitu riešenia oproti LBEST	v dôsledku väčšej diverzity (prejavuje sa v širšom pokrytí priestoru prehľadávania) je LBEST PSO menej náchylný k uviaznutiu v lokálnych minimách

Aktualizácia polohy pre úlohu minimalizácie dvojdimenzionálnej funkcie s premennými x_1 a x_2 pomocou optimalizačného modelu PSO GBEST je naznačená na obrázku 4.3. Optimum je v počiatku súradnicového systému (vyznačené krížikom \times). V časti obrázku 4.3a je znázornená počiatočná poloha ôsmich častíc a globálna najlepšia poloha (g^*). Keďže príspevok kognitívnej zložky je pre každú časticu v čase $t = 0$ nulový, vplyv na úpravu polohy má len sociálna zložka. Treba poznamenať, že globálna najlepšia poloha sa nemení (predpokladá sa $v_i(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ pre všetky častice). Obrázok 4.3b je aktualizovaný pre nové polohy častíc po prvej iterácii, pričom bola nájdená nová najlepšia poloha, je teda uvažované s vplyvom všetkých zložiek rýchlosti a častice sa pohybujú smerom k novej najlepšej polohe.



Obrázok 4.3: Ilustrácia pohybu častíc pre PSO GBEST (upravené z [50])

Na obrázku 4.4 je ilustrované, ako sú častice vo variante LBEST ovplyvnené svojimi priamymi susedmi. Aby bol obrázok čitateľný, sú vykreslené len niektoré pohyby a je naznačený len smer celkovej rýchlosti. V oblasti 1 sa častice **a** a **b** pohybujú smerom k častici **c**, ktorá je najlepším riešením v tejto oblasti (obrázok 4.4a). V oblasti 2 sa častica **d** pohybuje smerom k **f**, podobne sa správa aj častica **e**. Pre ďalšiu iteráciu už bude ale pre oblasť 2 najlepším riešením častica **e** (obrázok 4.4b, ilustrovaná je len časť priestoru riešenia). Tentokrát sa teda častice **d** a **f** budú pohybovať smerom k častici **e**, ktorej poloha zostáva najlepším riešením pre oblasť 2. Prázdne kruhy reprezentujú predchádzajúce pozície. Taktiež je badateľný všeobecný pohyb smerom k optimu funkcie.



Obrázok 4.4: Ilustrácia pohybu častíc pre PSO LBEST (upravené z [50])

4.3 Nastaviteľné parametre PSO

Optimalizačný algoritmus Particle Swarm Optimization vo variante GBEST je možné nastaviť pomocou nasledujúcich parametrov:

- **počet častíc:** každá častica predstavuje jeden bod vo viacdimezionalnom priestore, ktorý sa prehľadáva počas optimalizácie
- **rozmer priestoru:** počet premenných, ktorý sa optimalizuje, každá častica v PSO má os na každú premennú v tomto viacdimezionalnom priestore
- **bounds (hranice):** určuje rozsah pre každú premennú v priestore, v algoritme ako zoznam dvojíc čísel, pričom každá dvojica udáva maximálnu a minimálnu hodnotu, ktorú môže daná premenná nadobúdať
- **max_velocity:** určuje maximálnu rýchlosť, ktorú môže častica dosiahnuť počas jednej iterácie optimalizácie, tento parameter pomáha obmedziť rýchle zmeny a zaisťiť, aby sa algoritmus neprehnal priamo k optimálnemu riešeniu (nastaviteľný ako zoznam s dvojicou čísel pre každú dimenziu, určuje maximálne povolené zmeny pre každú premennú), napríklad zoznam $[(-10,10)]$ pre danú optimalizovanú premennú udáva, že rýchlosť každej častice môže byť zmenená o hodnotu v rozsahu od -10 do 10 v jednotkovom čase, jedná sa teda o obmedzenie rýchlosti pohybu častice v priestore riešení počas každej iterácie algoritmu PSO

- **nastavenia** (settings): táto skupina parametrov zahŕňa:

c_1, c_2 – váhy pre kognitívnu a sociálnu komponentu PSO, udávajú dôraz, ktorý sa kladie na osobnú skúsenosť častice (kognitívna) a skúsenosť susedných častíc (sociálna) pri aktualizácii polohy častice

ω – koeficient zotrvačnosti (*inertia weight*), ktorý ovplyvňuje, do akej miery si častice zachovávajú svoju smer a rýchlosť z predchádzajúcej iterácie

ω_{damp} – koeficient tlmenia váhy zotrvačnosti (*inertia damping*), pomáha postupne znižovať váhu zotrvačnosti (ω) v priebehu optimalizácie (hodnota 1 znamená, že zotrvačnosť sa nemení)

- **topology**: určuje štruktúru (topológiu PSO), teda spôsob, akým sú spolu častice prepojené a ako spolu komunikujú, zdieľajú informácie, tento parameter determinuje rýchlosť a efektivitu konvergencie PSO k optimálnemu riešeniu

Správna konfigurácia týchto parametrov výrazne ovplyvní účinnosť a tempo konvergencie PSO pri hľadaní optimálneho riešenia. Optimalizácia je ukončená, keď je dosiahnuté kritérium ukončenia (*stopping criterion*), napríklad maximálny počet iterácií, dosiahnutie požadovanej hodnoty účelovej funkcie, prípadne iné.

Vo variante optimalizačného algoritmu PSO LBEST je namiesto **topology** (topológia) nastavenie spôsobu komunikácie častíc riadené pomocou dvoch doplnkových parametrov (v časti "**nastavenia** - settings"):

k – exponent pre výpočet počtu informátorov (východzia hodnota^[W11] = 3)

p – počet najbližších susedov (informátorov), ktorých častica zvažuje pri aktualizácii svojej rýchlosti a polohy

5 VÝVOJ ALGORITMU ELSM-PSO

5.1 Programovací jazyk Python

Python je moderný, interpretovaný, programovací jazyk s objektovo orientovaným prístupom. Je distribuovaný ako *open source* a je dostupný na rôznych platformách. Jeho výhody zahŕňajú prirodzenú syntax a rozsiahlu knižnicovú základňu, ktorá umožňuje efektívne riešenie problémov v rôznych oblastiach a jednoduchú integráciu s inými aplikáciami napísanými v iných programovacích jazykoch. V priebehu tejto práce bola využívaná verzia programovacieho jazyka *Python 3.11.6*.

Pre programovanie v jazyku *Python* boli použité interpretery *Visual Studio Code*, *PyCharm* a *Spyder*. Interpreter je program alebo softvér, ktorý vykonáva inštrukcie napísané v programovacom jazyku. Jeho úlohou je po krokoch prekladať a vykonávať kód, ktorý programátor napísal.

Vo vytvorenom algoritme boli použité (importované) tieto knižnice (teda súbory s vopred napísaným kódom, poskytujúce určité funkcie a procedúry, ktoré programátori využívajú vo svojich vlastných programoch):

1. NumPy

Slúži pre vedecké výpočty v jazyku *Python*, poskytuje rýchle a efektívne operácie s viacrozmernými poliami (*arrays*) a matematické funkcie na prácu s nimi.

2. Matplotlib

Knižnica pre vizualizáciu dát, analýzu a prezentáciu výsledkov

3. Pandas

Knižnica pre manipuláciu s tabuľkovými dátami, umožňuje importovať, spracovávať a analyzovať dáta v tabuľkovom formáte

4. SymPy

Knižnica pre symbolické výpočty, umožňuje prácu s matematickými symbolmi, ako sú premenné, funkcie a rovnice, je užitočná pro symbolickú algebru, riešenie rovníc, diferenciálne a integrálne výpočty a tvorbu matematických výrazov

5. SciPy

Knižnica pre vedecké výpočty, ktorá stavia na knižnici NumPy, poskytuje širokú škálu pokročilých algoritmov pre optimalizáciu, numerickú integráciu, interpoláciu, Fourierovu analýzu a ďalšie vedecké výpočty. SciPy je vhodný pre riešenie zložitých matematických a vedeckých problémov

V algoritme boli použité aj knižnice poskytujúce rôzne funkcie a nástroje pre interakciu s operačným systémom a systémovým prostredím (**os** - Operating System Interface, **sys** - System-Specific Parameters and Functions a iné).

Pseudokódy uvedené v tejto práci slúžia pre čitateľa ako **ilustrácia (!)** princípu algoritmu ELSM-PSO, nie sú kompletne a určené pre použitie, samotný algoritmus nie je v práci uvedený.

5.2 Vývoj algoritmu

5.2.1 Import dát

Naprogramovaný skript (skupina príkazov alebo inštrukcií, ktoré sú napísané v textovom formáte a určené na automatizáciu určitých úloh alebo operácií na počítači) umožňuje načítanie dát z akéhokoľvek dostupného komerčného MKP riešiča (úloha typu 2D rovinná deformácia). Pre účely tejto práce bol použitý MKP softvér **Plaxis 2D** (od Bentley Systems). Pre vyriešenie danej úlohy je potrebné načítať hodnoty efektívnych kartézskych napätí σ'_{xx} , σ'_{yy} , σ'_{zz} , σ'_{xy} v jednotlivých napäťových (Gaussových integračných, ďalej len napäťových podľa terminológie Plaxis 2D – *Stress points*) bodoch (vrátane súradníc X a Y týchto bodov).

Tabuľka 5.1: Príklad štruktúry dát pre import (pre trojúholníkový prvok s 15 uzlami, teda 12 napäťovými Gaussovými integračnými bodmi)

Soil element	Stress point	Local number	X [m]	Y [m]	σ'_{xx} [kN/m ²]	σ'_{yy} [kN/m ²]	σ'_{zz} [kN/m ²]	σ'_{xy} [kN/m ²]
Clus. 1 - El. 1 SILT flovito- piesčítý Soil\1\1	1	1	1.8294	7.5724	-0.125	-12.467	-4.608	0.348
	2	2	2.0868	7.9691	-0.384	-5.561	-2.176	-0.005
	3	3	1.6235	7.9691	-1.364	-5.517	-2.518	0.088
	4	4	1.8412	7.7546	-0.118	-9.254	-3.430	0.320
	5	5	1.9213	7.8780	-0.269	-7.113	-2.702	0.205
	6	6	1.7772	7.8780	-0.490	-7.129	-2.789	0.261
	7	7	1.9104	7.6885	-0.117	-10.445	-3.866	0.303
	8	8	2.0140	7.8481	-0.123	-7.626	-2.836	0.189
	9	9	1.9486	7.9740	-0.565	-5.448	-2.201	0.046
	10	10	1.7623	7.9740	-0.970	-5.429	-2.342	0.085
	11	11	1.6806	7.8481	-0.438	-7.597	-2.941	0.349
	12	12	1.7630	7.6891	-0.026	-9.683	-2.815	0.363

V rámci výstupu z MKP riešiča je súčasťou dát i kartézske efektívne napätie σ'_{zz} (kolmo na rovinu definovanú smermi X a Y), pre ďalšie výpočty však toto napätie nie je použité. Pre import dát sú použité knižnice **os**, **sys** a pre prácu s tabuľkovými dátami **Pandas**.

5.2.2 Generovanie skúšobnej šmykovej plochy (TSS)

V kapitole 3.2 bol popísaný postup pre generovanie skúšobnej šmykovej plochy použitý v tejto práci. Je uvažované so šmykovou plochou tvorenou štyrmi segmentami a piatimi vrcholmi, riadiace premenné polygonálnej plochy sú uložené vo vektore V .

$$V = (x_1, x_5, \beta_1, \beta_5, d_5, d_6, d_7, d_8).$$

Hodnoty riadiacich premenných sú náhodne generované v určenom rozsahu, následne je zostavená skúšobná šmyková plocha (*Trial Slip Surface*).

5.2.3 Diskretizácia šmykovej plochy

Medzi hlavné (primárne) riadiace body šmykovej plochy (V_1 až V_5) je potrebné pridať sekundárne body, v ktorých nedochádza k smerovému zlomu, ale slúžia na zlepšenie presnosti výpočtov (pseudoalgoritmus 2).

Pseudoalgoritmus 2: Diskretizácia šmykovej plochy

```

0: def definícia funkcie pre diskretizáciu šmykovej plochy
1: Inicializácia prázdneho zoznamu div_points
# Pre všetky riadiace body na šmykovej ploche vykonaj nasledujúci blok kódu:
2: for i in range(len(points)-1):
# Určenie rozsahu pre diskretizáciu (začiatok a koniec segmentu)
3:     start_point = points[i]
4:     end_point = points[i+1]
# Delenie segmentu na požadovaný počet úsekov
5:     dx = (end_point[0] - start_point[0]) / (n + 1)
6:     dy = (end_point[1] - start_point[1]) / (n + 1)
# Uloženie deliacich bodov do zoznamu (listu)
7:     for j in range(1, n+1):
8:         div_point = [start_point[0] + j*dx, start_point[1] + j*dy]
9:         div_points.append(div_point)
10:     Vráť div_points

```

Rozsah diskretizácie je riadený, premenná n reprezentuje počet úsekov (podsegmentov), na ktoré sa má segment rozdeliť. Následne bolo potrebné vytvoriť zoznam bodov na šmykovej ploche, kde budú primárne aj sekundárne body zoradené v správnom poradí (`sorted_points`).

5.2.4 Priradenie napätí do bodov šmykovej plochy

Algoritmus pôvodne priradzoval do bodu šmykovej plochy (primárneho alebo sekundárneho) príslušné napätie z najbližšieho importovaného napäťového bodu. Porovnával teda vzdialenosti k jednotlivým napäťovým bodom v určenej vzdialenosti ($1/XX$ maximálneho rozsahu importovaných súradníc X a Y podľa veľkosti modelu úlohy, účelom tohoto kroku bolo urýchlenie výpočtu) od konkrétneho bodu šmykovej plochy. Napätia v bodoch šmykovej plochy ukladal do zoznamu. Tento proces je znázornený v pseudoalgoritme 3.

Pseudoalgoritmus 3: Priradenie napätí do bodov šmykovej plochy

```
# Vytvorenie zoznamu, v ktorom budú bodom šmykovej plochy priradené napätia
1: Inicializácia prázdneho zoznamu sigma_v
# Cyklus hľadá v definovanej oblasti najbližší napäťový bod vzájomným
porovnávaním vzdialeností
# Do každého bodu na šmykovej ploche priradiť príslušné napätie
2: for point in sorted_points:
3:   x_point, y_point = point
4:   min_dist = float('inf')
5:   min_sigma_gauss = None
# Prechádzaj cez všetky napäťové body v danej oblasti
6:   for i in range(len(x_gauss)):
7:     if (x_gauss[i] > x_point - max_x/XX and x_gauss[i] < x_point + max_x/XX
8:         and y_gauss[i] > y_point - max_y/XX
9:         and y_gauss[i] < y_point + max_y/XX):
# Vypočítaj vzdialenosť medzi bodom šmykovej plochy a napäťovým bodom
10:    dist_x = abs(x_gauss[i] - x_point)
11:    dist_y = abs(y_gauss[i] - y_point)
12:    dist = sqrt(dist_x**2 + dist_y**2)
# Priradiť napätie z najbližšieho importovaného bodu do bodu šmykovej plochy
13:    if dist < min_dist:
14:      min_dist = dist
15:      min_sigma_gauss = {
16:        'σ\`_xx': sigma_gauss['σ\`_xx'][i],
17:        'σ\`_yy': sigma_gauss['σ\`_yy'][i],
```

```

18:         'σ\'_xy': sigma_gauss['σ\'_xy'][i]
19:     }
# Pridaj napätie pre aktuálny bod šmykovej plochy do zoznamu
20:     sigma_v.append(min_sigma_gauss)

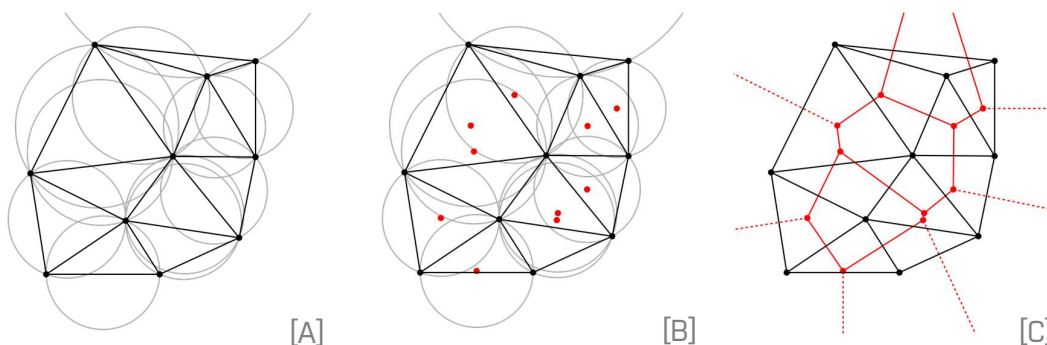
```

Algoritmus prechádza cez zoznam bodov v správnom poradí na šmykovej ploche (`sorted_points`) a do každého bodu v tomto zozname priradí napätie z najbližšieho bodu zo zoznamu všetkých importovaných napäťových (integračných) bodov a príslušných napätí (`sigma_gauss`). Riadiace body (primárne i sekundárne) s priradenými napätiami sú následne uložené v ďalšom zozname (`sigma_v`).

Vyššie uvedený postup (pseudoalgoritmus 3) vyžadoval pomerne hustú sieť importovaných napäťových bodov (*stress points*), preto boli volené trojuholníkové konečné prvky s 12 integračnými (napäťovými) bodmi a 15 uzlami (interpolačný polynóm 4. rádu), no ukázal sa byť málo presný a veľmi náročný na výpočtový výkon. Pre skrátenie výpočtového času a spresnenie hodnoty napätia v bode šmykovej plochy bola použitá funkcia *Delaunay* v knižnici SciPy, ktorá využíva Delaunayovu trianguláciu.

Delaunayova triangulácia (princíp)

Delaunayova triangulácia^[W7, 39] je metóda, ktorá je využívaná na rozdelenie množiny bodov v rovine (alebo aj vo viacrozmernom priestore) do množiny trojuholníkov. V tejto triangulácii má každý trojuholník svoje vrcholy definované bodmi zo vstupnej množiny (v tomto prípade množiny importovaných napäťových bodov). Delaunayova triangulácia sa pre množinu bodov v rovine vytvorí tak, že pre každú trojicu bodov existuje kružnica, ktorá prechádza všetkými tromi bodmi a neobsahuje žiadne ďalšie body. Táto podmienka zabezpečuje, že sieť trojuholníkov vytvorená touto trianguláciou sa z hľadiska veľkosti prvkov a pomeru uhlov blíži sieti z rovnostranných trojuholníkov (obrázok 5.1A a 5.1B).



Obrázok 5.1: Delaunayova triangulácia^[W7] v rovine so zobrazenými opísanými kružnicami [A] a vyznačenými stredmi (červenou farbou) [B], zostavený Voronoiho diagram [C]

Spojením stredov kružníc opísaných trojuholníkovým prvkom siete je získaný Voronoiho diagram (obrázok 5.1C). Jedná sa o matematický koncept priestorového delenia množiny bodov, kde každá oblasť obsahuje body, ktoré sú bližšie k danému bodu ako ku ktorémukoľvek inému bodu v množine. Voronoiho diagram je základným konceptom v geometrickom spracovaní dát a má široké uplatnenie v oblasti analýzy priestorových údajov. Strany Voronoiho diagramu sú kolmé na príslušné strany trojuholníkových prvkov siete.

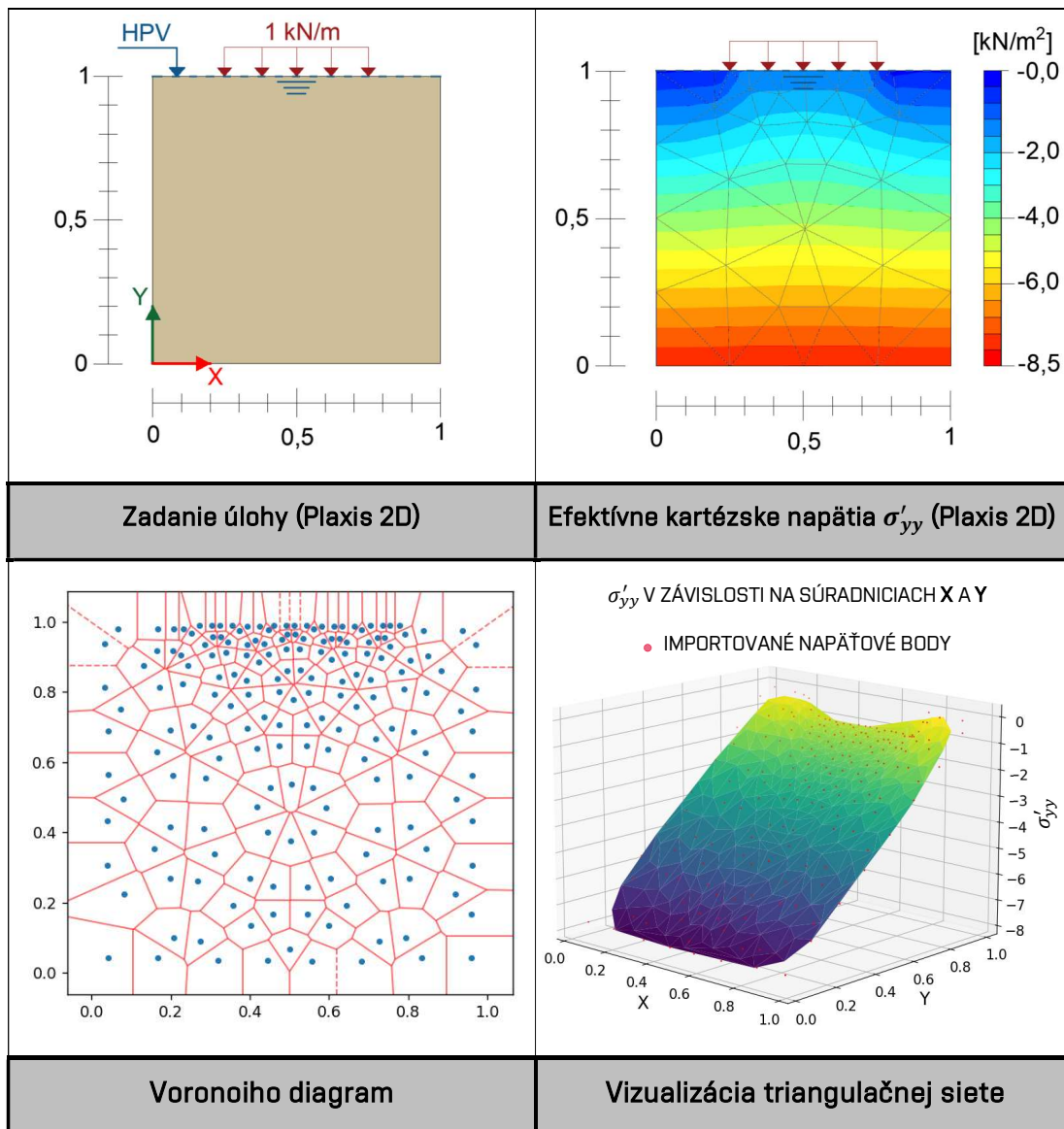
Použitie v knižnici Scipy

Delaunayova triangulácia je súčasťou knižnice Scipy. Konkrétne v module *scipy.spatial* sa nachádza funkcia, ktorá umožňuje vytvoriť Delaunayovu trianguláciu pre danú množinu bodov. Táto funkcia prijíma zoznam bodov ako vstup a vytvára objekt *"Delaunay"*, ktorý obsahuje informácie o vytvorenej triangulácii.

Implementácia v kóde

Implementovaný kód v Scipy najprv definuje množinu bodov, pre ktoré je nutné určiť napätia. Potom vytvorí množinu bodov a príslušných napätí, ktorá slúži na vytvorenie Delaunayovej triangulácie. Táto triangulácia je potom použitá na vytvorenie interpolátora, ktorý umožňuje vypočítať interpolované hodnoty napätí pre body na šmykovej ploche.

Využitie tejto triangulácie významne skrátilo výpočtový čas (priemerne pre jednotlivé úlohy takmer 10-násobne). Na okrajoch oblasti s importovanými bodmi napätí však vznikol problém, keďže triangulačná sieť nedosahovala až ku konkrétnemu bodu šmykovej plochy. V takýchto prípadoch bolo priradené tomuto bodu šmykovej plochy napätie na základe najbližšieho dostupného importovaného napäťového bodu podľa pseudoalgoritmu 3.

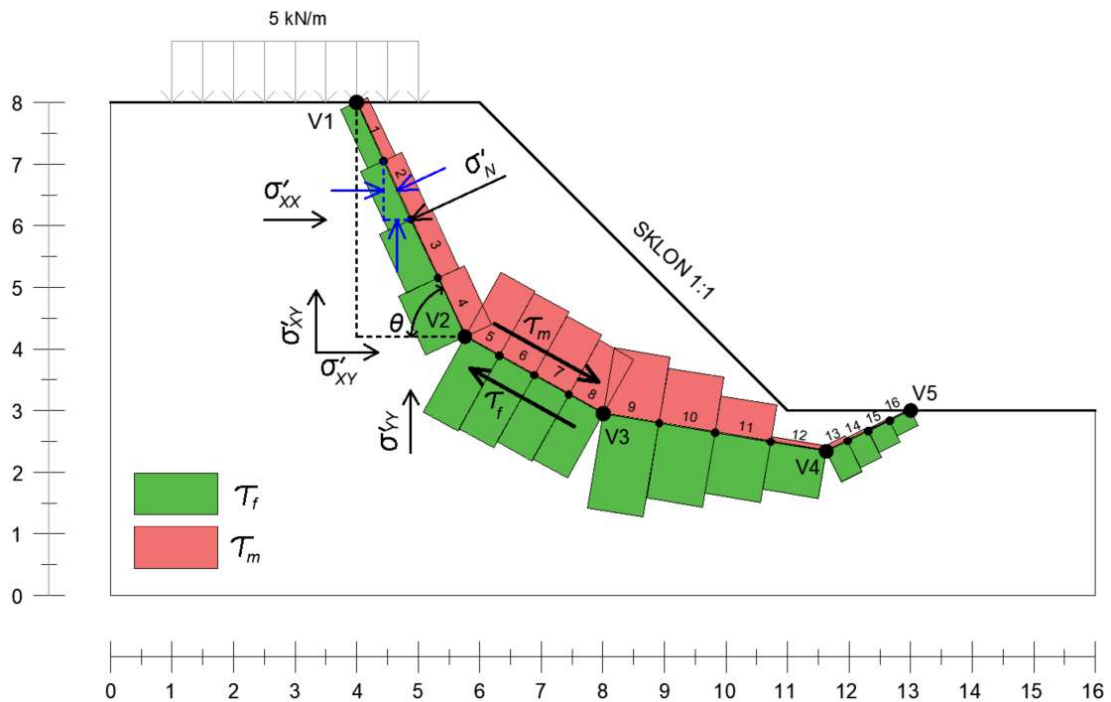


Obrázok 5.2: Jednoduchá štúdia pre overenie spoľahlivosti generovanej siete pomocou Delaunayovej triangulácie

Overenie spôsobu generovania triangulačnej siete prebehlo na jednoduchej štúdií (obrázok 5.2), v ktorej bol centricky liniovým zaťažením s dĺžkou 0,5 m a intenzitou 1 kN/m zaťažený štvorcový útvar zeminy (*cluster*) s dĺžkou strany 1 m (s hladinou podzemnej vody v úrovni terénu). Ako je zrejmé z obrázku 5.2, tento spôsob generovania triangulačnej siete pre účel algoritmu vyhovuje, jediná komplikácia nastáva pri napätových bodoch na okraji, ktoré nie sú do triangulačnej siete zahrnuté, v tejto oblasti sú do bodov šmykovej plochy priradené napätia z najbližšieho importovaného napätového bodu.

5.2.5 Výpočet šmykových napětí a stupňa bezpečnosti

Po priradení hodnôt efektívnych kartézskych napätí do primárnych a sekundárnych bodov šmykovej plochy nasleduje vyčíslenie mobilizovaného šmykového napätia τ_{m_i} a šmykovej pevnosti materiálu τ_{f_i} na jednotlivých podsegmentoch šmykovej plochy podľa vzorcov uvedených v kapitole 3.3. Výsledný stupeň bezpečnosti FoS je rovný podielu integrálu (celkového súčtu) napätí τ_{f_i} a τ_{m_i} (rovnica 3.2). Pre numerický výpočet integrálu je použitá vstavaná funkcia *np.trapz* (z knižnice NumPy). Táto funkcia vykoná numerický výpočet integrálu z daného datasetu (súboru dát) s využitím zloženého lichobežníkového pravidla (aproximácia plochy pod krivkou pomocou lichobežníkov, ktoré sú vytvorené z hodnôt na krivke). Princíp tohto výpočtu je zobrazený na obrázku 5.3 (zjednodušene pre zložené obdĺžnikové pravidlo).



Obrázok 5.3: Schéma integrácie napätí τ_{f_i} a τ_{m_i} pre vyčíslenie stupňa bezpečnosti (vykreslené ako ilustrácia s použitím zloženého obdĺžnikového pravidla)

Zjednodušene je táto časť kódu schematicky popísaná v pseudoalgoritme 4 (pre Mohr-Coulombov model bez implementácie Davisovho prístupu).

Pseudoalgoritmus 4: Výpočet šmykových napätí a stupňa bezpečnosti

```

1: Inicializácia prázdnych zoznamov tau_m a tau_f
# Cyklus pre výpočet hodnôt šmykového napätia a pevnosti na podsegmentoch
2: Pre každý segment:
3:  Získanie súradníc dvoch po sebe nasledujúcich bodov (x1, y1) a (x2, y2)
# Napätia sigma1 na začiatku a sigma2 na konci podsegmentu ( $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{xy}$ )
4:  Získanie napätí sigma1 a sigma2 pre tieto body
# Výpočet dĺžky segmentu segment_length ( $\Delta L_i$ )
5:  segment_length = sqrt((x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2)
# Výpočet uhla theta (uhol medzi horizontálnou a šmykovou rovinou)
6:  theta = arctan2(y2 - y1, x2 - x1)
# Výpočet napätia sigma_n ( $\sigma'_n$ )
7:  sigma_n = 0.5 * ((sigma1[' $\sigma'_{xx}$ '] + sigma2[' $\sigma'_{xx}$ ']) * sin(theta)^2
8:           + (sigma1[' $\sigma'_{yy}$ '] + sigma2[' $\sigma'_{yy}$ ']) * cos(theta)^2
9:           - (sigma1[' $\sigma'_{xy}$ '] + ... (rovnica 3.8)
# Výpočet napätia tau_m ( $\tau_{m_i}$ )
10: tau_m_val = 0.5 * (((0.5 * (sigma1[' $\sigma'_{yy}$ '] + sigma2[' $\sigma'_{yy}$ ']) -
11:                   0.5 * (sigma1[' $\sigma'_{xx}$ '] + sigma2[' $\sigma'_{xx}$ ']))) * sin(2 * theta)
12:           + (sigma1[' $\sigma'_{xy}$ '] + ... (rovnica 3.7)
# Výpočet napätia tau_f ( $\tau_{f_i}$ )
13: tau_f_val = c + sigma_n * tan(phi) (rovnica 3.6)
14: Pridanie napätí tau_m_val a tau_f_val do zoznamov tau_m a tau_f
# Výpočet stupňa bezpečnosti F_s ( $FoS$ )
15: int_tau_f = trapezoidálna integrácia zoznamu tau_f s krokom segment_length
16: int_tau_m = trapezoid. integrácia zoznamu tau_m s krokom segment_length
17: F_s = int_tau_f / int_tau_m (rovnica 3.2)

```

V algoritme ELSM-PSO je zakomponovaný aj Davisov prístup (podľa Tschuchnigga^[31] a kol. označený ako Davis A), pri ktorom je redukčný faktor parametrov šmykovej pevnosti β rovnaký na začiatku výpočtu a pri zlyhaní, teda platí $\beta = \beta_0 = \beta_{failure}$.

5.2.6 Implementácia PSO

Dôležitým prvkom PSO je účelová funkcia, ktorá je optimalizačným algoritmom minimalizovaná (alebo maximalizovaná, v závislosti od problému). Práve tá určuje, akým spôsobom sa hodnoty premenných odrážajú na kvalite riešenia. Cieľom optimalizačného algoritmu je získať kombináciu vstupných premenných, ktorá povedie k najnižšej hodnote účelovej funkcie (v aplikácií PSO na posúdenie stability svahu hľadáme najnižší stupeň bezpečnosti – minimalizácia účelovej funkcie).

Postup pre vygenerovanie šmykovej plochy a výpočet stupňa bezpečnosti uvedený v predchádzajúcich kapitolách je vložený do účelovej funkcie. Vstupom do funkcie je vektor V s ôsmimi premennými, ktoré riadia tvar šmykovej plochy (kapitola 3.2).

$$V = (x_1, x_5, \beta_1, \beta_5, d_5, d_6, d_7, d_8)$$

Do prvej iterácie vstupuje náhodne vygenerovaný vektor (s ohľadom na definované obmedzenia premenných), do (najlepšej globálnej pozície g^*) každej ďalšej iterácie vektor s najlepšou globálnou polohou (globálne minimum stupňa bezpečnosti roja častíc FoS) z predchádzajúcej iterácie.

Aplikovaný algoritmus optimalizácie rojom častíc (GBEST) je nastavený takto:

- **počet častíc:** 20
- **rozmer priestoru:** \mathcal{B} (optimalizované premenné vo vektore V)
- **bounds (hranice):** nastavenie individuálne podľa úlohy
- **max_velocity:** $[(-10,10)\dots]$, častice môžu meniť svoju rýchlosť maximálne o -10 alebo 10 jednotiek za jednotku času
- **nastavenia (settings):**
 - $c_1 = c_2 = 2$ – vyvážené hodnoty, kognitívny a sociálny komponent majú rovnakú váhu (zbalené hodnoty)
 - $\omega = 0,5$ – častica v nasledujúcej iterácii bude zachovávať polovicu svojej rýchlosti z predchádzajúcej iterácie
 - $\omega_{damp} = 1$ – váha zotrvačnosti (ω) sa nemení
- **topology:** *updatedStar* – častice komunikujú so všetkými ostatnými časticami v roji, každá častica má vplyv na ostatné, čo umožňuje celkovú spoluprácu pri hľadaní optimálneho riešenia

Kritérium ukončenia je dané maximálnym počtom iterácií. Po dokončení optimalizácie je nutné z najlepšej dosiahnutej globálnej pozície (výstupom PSO sú hodnoty premenných vektora V uložené v zozname `best_position`) dopočítať späťne súradnice jednotlivých primárnych riadiacich bodov a optimalizovanú šmykovú plochu vykresliť. Zjednodušene je možné celý optimalizačný algoritmus popísať pomocou pseudokódu 5.

Pseudoalgoritmus 5: Optimalizácia kritickej šmykovej plochy pomocou PSO

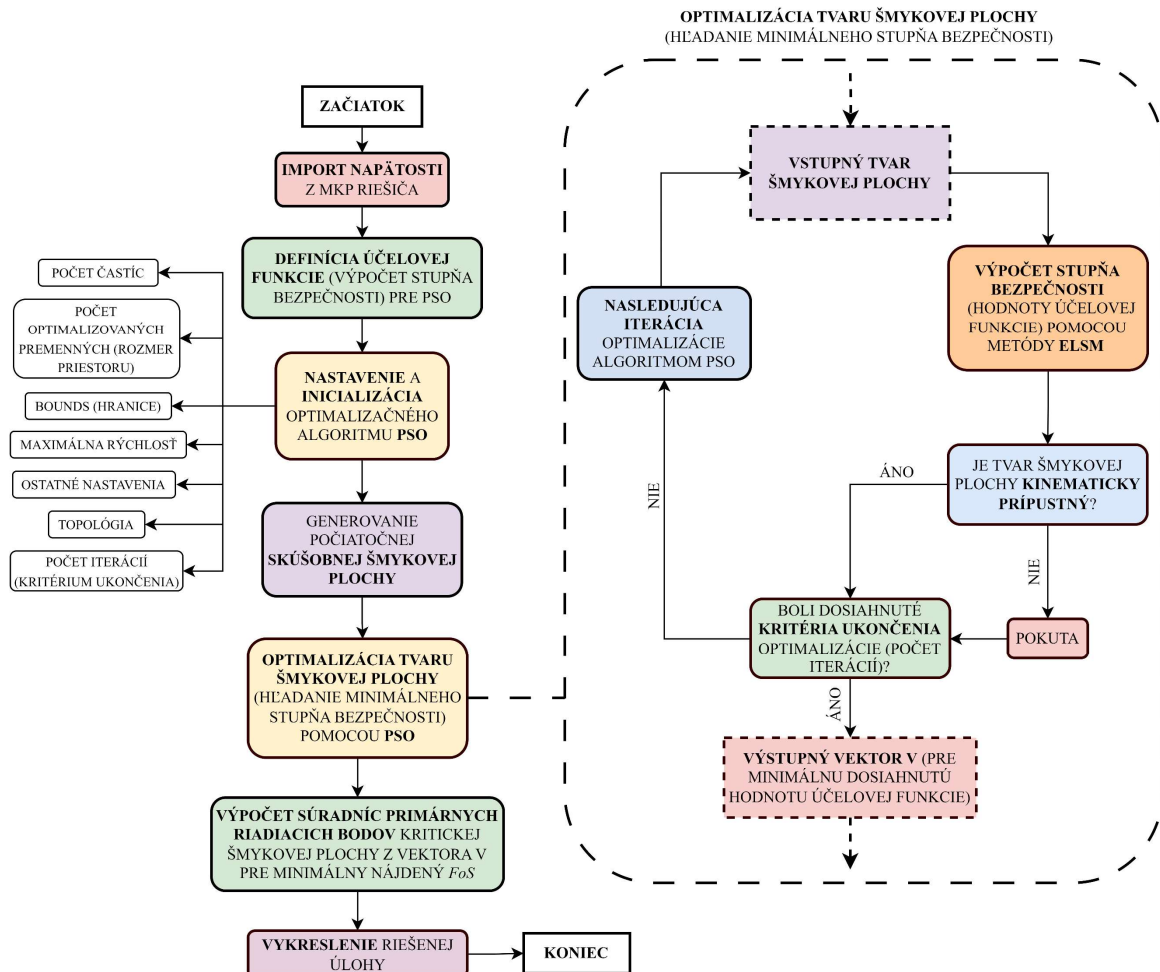
```
# Import potrebných knižníc
1: import SingleGlobalBestPSO, PSO functions, numpy, algoritmus ELSM, Point, Line, os,
   sys, pandas, matplotlib.pyplot
# Získanie aktuálneho adresára
2: script_dir = zisti_adresár_tohoto_skriptu()
# Zostavenie cesty k súboru
3: file_path = spoj_adresáre_a_názvy_súborov(script_dir, "data_file.xlsx")
# Načítanie dát zo súboru do DataFrame
4: data = načítaj_dáta(file_path)
# Definícia objektívnej funkcie – výpočet stupňa bezpečnosti pomocou ELSM
5: def fitness_function(V):
6:     vráť výsledok výpočtu metódou ELSM
# Definícia rozsahov a maximálnych rýchlostí pre jednotlivé premenné vo vektore  $V$ 
7: bounds = [(dolná hranica intervalu, horná hranica intervalu)... ]
8: max_vel = [(rozsah maximálnej rýchlosti, ktorú môže každá častica dosiahnuť
   v jednotlivých dimenziách priestoru riešenia)...]
# Inicializácia optimalizačného algoritmu PSO s nastavením
9: pso = Inicializuj_PSO_s_nastavením (počet častíc, počet optimalizovaných
   premenných, bounds=bounds, max_velocity=max_vel, settings={'c1', 'c2', 'w', 'wdamp'},
   topology)
# Spustenie optimalizácie
10: pso.optimizer(fitness_function, počet_iterácií)
# Získanie najlepšej pozície (vektor  $V$ ) z poslednej iterácie
11: best_position = získaj_najlepšiu_pozíciu(pso.swarm.best_pos)
# Funkcia pre dopočítanie súradníc primárnych riadiacich bodov šmykovej plochy
   z najlepšej dosiahnutej pozície
12: def calculate_sorted_points(best_position, data):
13:     ... (výpočet súradníc primárnych riadiacich bodov šmykovej plochy)
14:     return sorted_points
```

```

# Zavolanie funkcie pre výpočet súradníc bodov šmykovej plochy z best_position (PSO)
15: sorted_points = calculate_sorted_points(best_position, data)
# Funkcia pre vykreslenie grafu
16: def plot_optimized_slip_surface_graph(sorted_points, data):
17:     vykreslenie grafu
# Vykreslenie optimalizovanej šmykovej plochy
18: plot_optimized_slip_surface_graph(sorted_points, data)
    
```

5.2.7 Schéma algoritmu ELSM-PSO

Grafická schéma obrázku 5.4 ilustruje základné princípy a funkciu algoritmu, ktorý bol predstavený v predchádzajúcich podkapitolách práce.

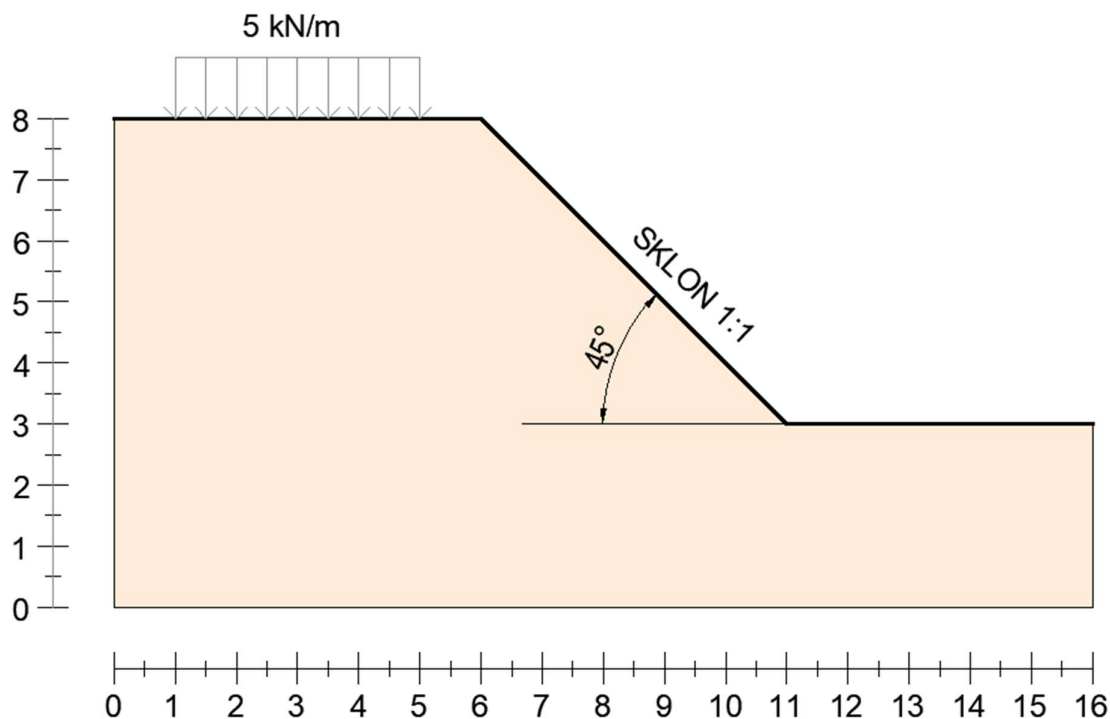


Obrázok 5.4: Schéma algoritmu ELSM-PSO

6 OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.1: HOMOGENÝ SVAH

6.1 Úvodný komentár k riešenej úlohe

Vytvorený algoritmus bol analyzovaný na jednoduchej prípadovej štúdii s homogénnym svahom. Zadanie tejto úlohy je uvedené na obrázku 6.1. Svah v analyzovanej úlohe má sklon 1:1 (zhodná výška a horizontálna dĺžka svahu s hodnotou 5 m), vo vzdialenosti 1 m od koruny svahu je umiestnené spojité rovnomerné zaťaženie s veľkosťou 5 kN/m a dĺžkou 4 m.



Obrázok 6.1: Zadanie úlohy pre overovaciú štúdiu č. 1

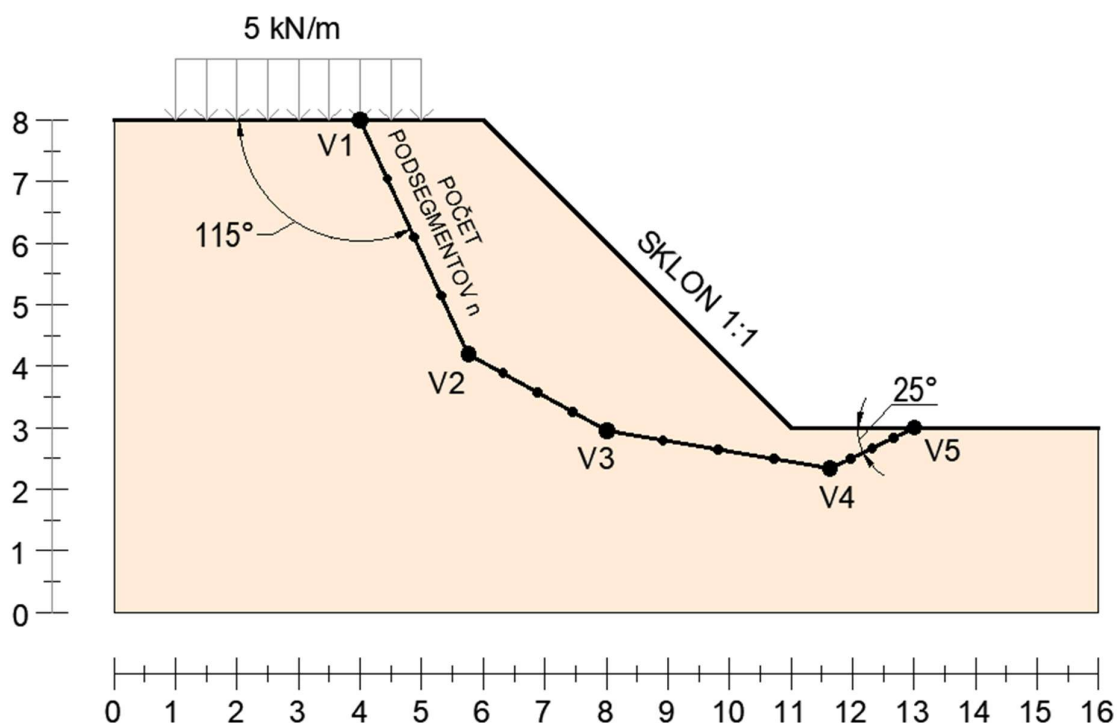
Minimálny stupeň bezpečnosti bol vyšetrovaný tromi rôznymi metódami výpočtu: **LEM** (GEO 5^[W4], výber prúžkových metód), **SRM** (Plaxis 2D^[W10]) a **ELSM** (napätosť získaná z Plaxis 2D a využitie algoritmu ELSM-PSO).

Analýza prebehla pre dve rôzne sady parametrov šmykovej pevnosti (tabuľka 6.1), pričom jedna sada povedie k nízkemu výslednému stupňu stability na hranici kolapsu a druhá výpočtu vyhoví s dostatočnou rezervou.

Tabuľka 6.1: Parametre šmykovej pevnosti zemín použité v overovacej štúdií č. 1

Označenie zeminy	Typ zeminy (príklad, označenie podľa ČSN EN ISO 14688)	Efektívny uhol šmykového trenia φ' [°]	Efektívna kohézia c' [kPa]	Objemová hmotnosť γ [kNm ⁻³]
Materiál 1	SILT ílovito-piesčitý (saciSi)	25	5	17
Materiál 2	SILT piesčito-štrkovitý (grsaSi)	36	9	17

Porovnávaný bude dosiahnutý stupeň stability samostatne pre skúšobnú (neoptimalizovanú) šmykovú plochu s vopred definovanými súradnicami primárnych riadiacich vrcholov (obrázok 6.2, tabuľka 6.2, pre SRM nie je možné) a pre optimalizovanú (kritickú) šmykovú plochu.



Obrázok 6.2: Testovaná skúšobná šmyková plocha pre overovaciú štúdiu č. 1

Tabuľka 6.2: Súradnice primárnych riadiacich bodov skúšobnej šmykovej plochy

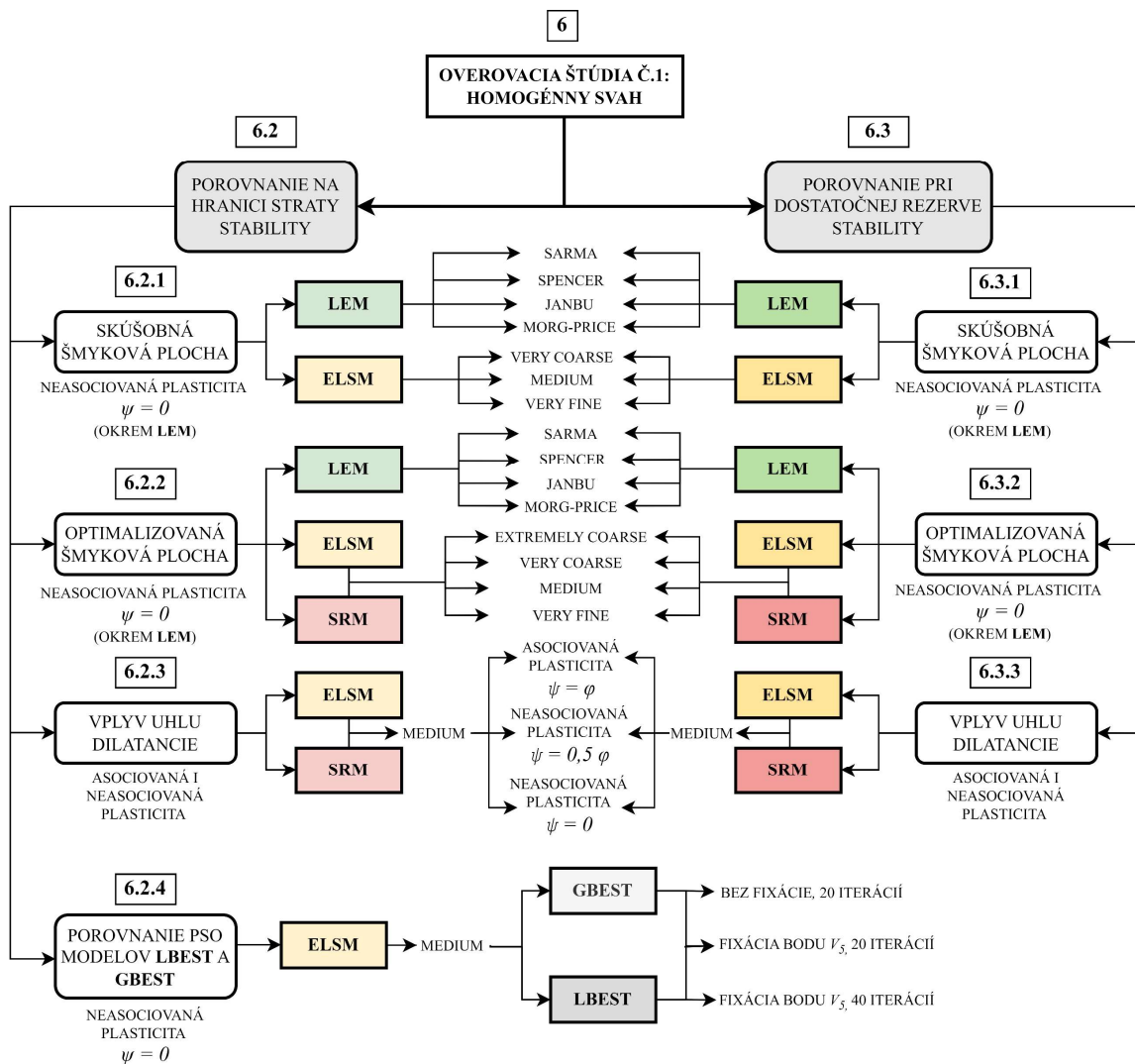
Číslo bodu	X [m]	Y [m]
V1	4,00	8,00
V2	5,76	4,20
V3	8,01	2,95
V4	11,63	2,34
V5	13,00	3,00

V rámci štúdie bol sledovaný vplyv hustoty siete konečných prvkov (počtu konečných prvkov v Plaxis 2D modeli podľa tabuľky 6.3) na výsledky analýzy pomocou SRM a ELSM. Pre generovanú sieť konečných prvkov boli použité 15-uzlové trojuholníkové prvky (12 napäťových integračných bodov). Všeobecne platí, že s rastúcim počtom prvkov (zmenšujúcou sa veľkosťou prvku) by mal výsledok výpočtu konvergovať k presnejšiemu riešeniu úlohy.

Tabuľka 6.3: Hustota siete konečných prvkov v MKP modeli v softvéri Plaxis 2D

Parameter siete konečných prvkov	Nastavenie hustoty siete MKP			
	Extremely Course (Extrémne hrubá)	Very Coarse (Veľmi hrubá)	Medium (Stredná)	Very Fine (Veľmi jemná)
Počet konečných prvkov	63	870	3514	13675

V kapitolách 6.2.1, 6.2.2, 6.3.1 a 6.3.2 prebehli všetky výpočty s využitím neasociovanej plasticity ($\psi = 0$), v naväzujúcich kapitolách 6.2.3 a 6.3.3 bol skúmaný vplyv pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' na výsledný stupeň stability FoS (pre SRM a ELSM bolo použité nastavenie siete konečných prvkov na *medium*, v tejto analýze je zahrnutý aj vplyv Davisovho prístupu^[31, 32]). Analýza v programe GEO5 s použitím prúžkových metód LEM uvažuje vždy s asociovanou plasticitou ($\psi = \varphi'$).



Obrázok 6.3 Schéma organizácie výpočtov v overovacej štúdii č. 1 na jednoduchom homogénnom svahu

6.2 Porovnanie na hranici straty stability

6.2.1 Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)

Homogénny svah bol analyzovaný v softvéri **GE05 Stabilita svahu**^[W4], tento modul využíva prúžkové metódy^[W3, 28, 30] podľa Sarmu^[17], Spencera^[41], Janbua^[43] a Morgenstern-Pricea^[45]. Výsledky LEM analýzy sú uvedené v tabuľke 6.4.

Tabuľka 6.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, materiál 1, asociovaná plasticita)

Hranica straty stability (Materiál 1)				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern – Price
<i>FoS</i>	1,36	1,51	1,39	1,44

Šmykovú plochu s tvarom podľa zadania (obrázok 6.2, tabuľka 6.2) je možné vygenerovať s použitím nasledujúcich premenných v radiacom vektore V :

$$V = (x_1, x_5, \beta_1, \beta_5, d_5, d_6, d_7, d_8) = (4, 13, 115, 25, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5)$$

V rámci štúdie bol vyšetrovaný aj vplyv diskretizácie šmykovej plochy na výsledný stupeň stability.

Tabuľka 6.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy)

Hranica straty stability (Materiál 1)			
ELSM	Hustota siete konečných prvkov		
	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> ($n = 3$)	1,4090	1,4665	1,4546
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,4223	1,4485	1,4467

Pri metóde ELSM (tabuľka 6.5) s rastúcou hustotou siete KP a počtom podsegmentov stupeň stability mierne rastie. Pre počet podsegmentov $n = 3$ je stupeň bezpečnosti *FoS* predikovaný pri sieti konečných prvkov s hustotou *very coarse* oproti stupňu bezpečnosti pri hustote konečných prvkov *very fine* o **3,13%** nižší. V prípade počtu podsegmentov $n = 100$ pre každý segment šmykovej plochy sa jedná o hodnotu **1,69%**. Z klasických prúžkových metód (LEM, tabuľka 6.4) predikuje v tomto prípade najvyšší stupeň stability Spencerova metóda (táto metóda s rovnobežnými medziprúžkovými silami^[28] môže pri určitej geometrii homogénneho svahu s jedným sklonom bez lavice a špecifickom tvare šmykovej plochy udávať vyššiu hodnotu^[48] *FoS*) a najnižší stupeň stability Sarmova metóda. Jednotlivé prúžkové metódy však vykazujú pomerne veľký rozdiel vo výslednom stupni stability.

6.2.2 Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha

Po optimalizácií a nájdení kritickej šmykovej plochy sa rozdiely vo výslednom stupni stability pri jednotlivých použitých prúžkových metódach výrazne zmenšili (tabuľka 6.6).

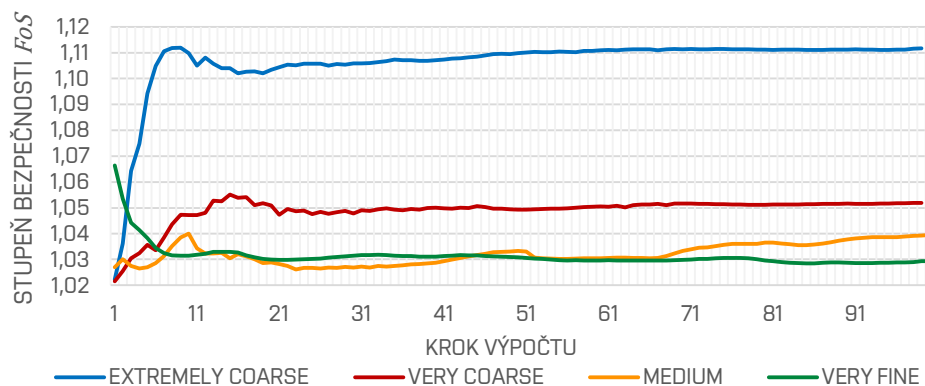
Tabuľka 6.6: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, asociovaná plasticita)

Hranica straty stability (Materiál 1)				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i>	1,14	1,13	1,13	1,11

Stupeň stability (*FoS*) sa pri SRM analýze s výsledkom blízko hranice straty stability znižuje s rastúcou hustotou siete konečných prvkov (pri sieti *very fine* je v porovnaní s *extremely coarse* o **8,11%** nižší, tabuľka 6.7, graf 6.1). Z prúžkových metód vykazuje nižší stupeň stability ako SRM (pri veľmi nízkej hustote siete KP *extremely coarse*) len metóda podľa Morgerstern-Pricea.

Tabuľka 6.7: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita)

Hranica straty stability (Materiál 1)				
SRM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Coarse	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i>	1,107	1,047	1,034	1,024

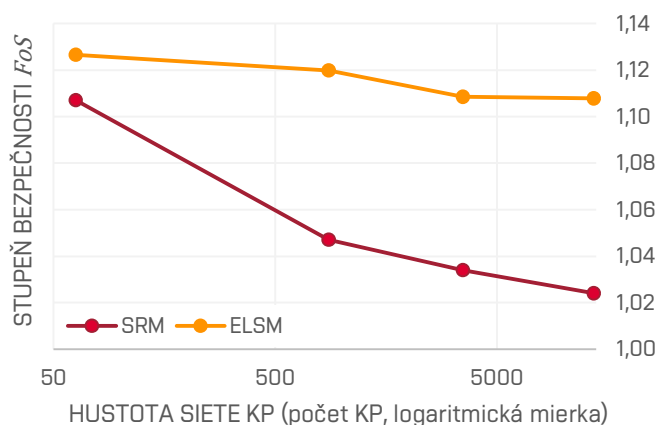


Graf 6.1: Vývoj stupňa bezpečnosti *FoS* v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie na hranici únosnosti)

Tento trend platí aj pre ELSM analýzu (tabuľka 6.8), získaný výsledný stupeň stability je pri najkvalitnejšej sieti *very fine* o **1,70%** nižší ako pri najmenej hustej sieti *extremely coarse*, zároveň má pre všetky hustoty siete konečných prvkov vyššiu hodnotu oproti SRM. V prípade hustoty siete konečných prvkov *extremely coarse* je *FoS* predikovaný ELSM vyšší o **1,77%** v porovnaní s SRM, v prípade hustoty KP *very fine* sa jedná o **8,18%**. S rastúcou hustotou siete sa teda rozdiel v predikovanom stupni stability pomocou SRM a ELSM zväčšuje.

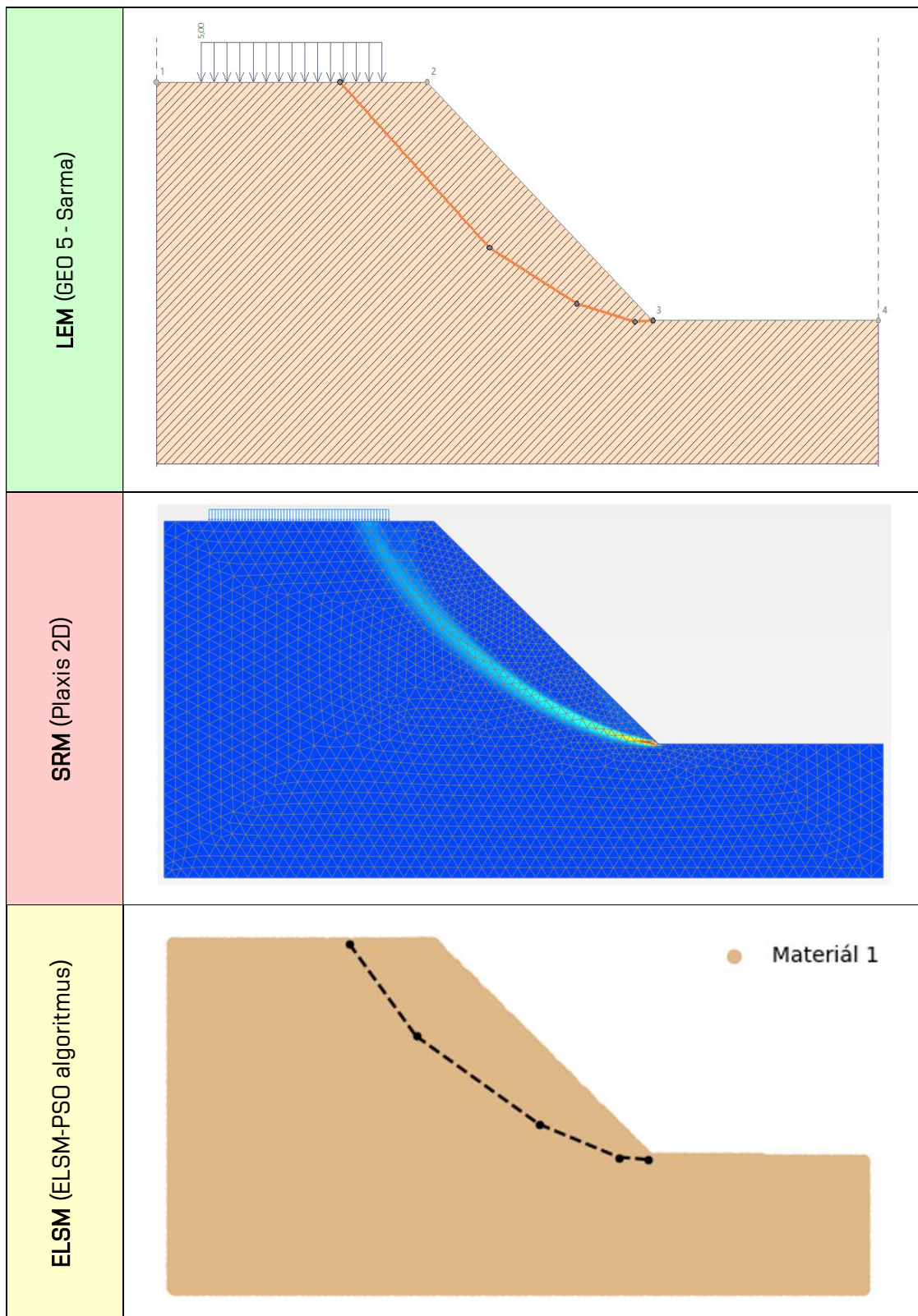
Tabuľka 6.8: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita)

Hranica straty stability (Materiál 1)				
ELSM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Coarse	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> (n = 100)	1,1266	1,1199	1,1085	1,1078



Graf 6.2: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti *FoS* (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie na hranici únosnosti)

Závislosť stupňa bezpečnosti na hustote siete KP je zobrazená v grafe 6.2. Bol potvrdený predpoklad^[31], že (aj pri neasociovanej plasticite) stupeň bezpečnosti s rastúcou hustotou siete KP klesá. Výsledky analýz zároveň ukazujú, že algoritmus ELSM-PSO je na zmenu hustoty siete menej citlivý ako SRM (Plaxis 2D). Tvar kritickej šmykovej plochy po optimalizácii je pri všetkých troch porovnávaných metódach výpočtu stability svahu podobný a nedochádza k zásadným odlišnostiam (obrázok 6.4).



Obrázok 6.4: Tvar optimalizovanej šmykovej plochy dosiahnutý analýzami stability svahu pomocou LEM, SRM a ELSM (homogénny svah, neasociovaná plasticita)

6.2.3 Vplyv uhlu dilatancie ψ

Dôležitým vplyvom na stabilitnú analýzu je charakter plasticity (kapitola 3.5). Je nutné podotknúť, že s narastajúcim rozdielom medzi uhlom dilatancie ψ a efektívnym uhlom vnútorného trenia φ' sa pri SRM analýze zvyšuje oscilácia výsledkov (tento jav je potvrdený aj v štúdií od Tschuchnigga^[31] a kol). Vplyv diskretizácie siete konečných prvkov na stupeň stability pri asociovanej plasticite ($\psi = \varphi'$) nie je príliš výrazný (Tschuchnigg^[31]), zatiaľ čo pri neasociovanej plasticite dochádza k značnej redukcii stupňa stability so zvyšujúcou sa hustotou siete (tento predpoklad bol dokázaný v predchádzajúcej kapitole 6.2.2). V prípade neasociovanej plasticity taktiež dochádza aj k zmene tvaru šmykovej plochy počas redukcie šmykových parametrov, čo je dôsledkom nejedinečnosti mechanizmu zlyhania (tvaru šmykovej plochy). Všetky analýzy v tejto kapitole prebehli pri jednotnom nastavení hustoty siete konečných prvkov na konfiguráciu *medium*. Zhrnutie výsledkov analýz stability svahu pre rôzne nastavenie pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' v metódach SRM a ELSM (vrátane ekvivalentného MC modelu podľa Davisa^[31, 32]) je uvedené v tabuľkách 6.9 (SRM) a 6.10 (ELSM).

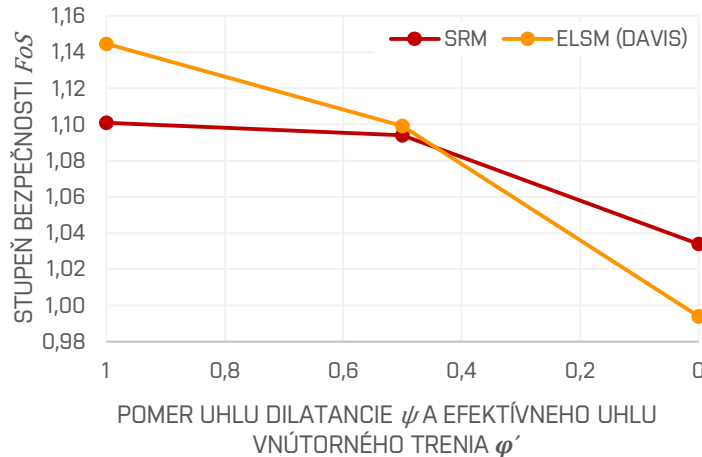
Tabuľka 6.9: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote *medium*)

SRM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$
Stupeň bezpečnosti	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')
<i>FoS</i>	1,101	1,094	1,034

Tabuľka 6.10: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote *medium*)

ELSM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$	
Stupeň bezpečnosti	MC = MC Davis ekvivalentný model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)	MC model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,1446	1,0992	1,1215	0,9939

Z výsledkov je zrejmé (graf 6.3), že podľa predpokladu pri oboch metódach stupeň stability so znižujúcim sa pomerom uhlov ψ a φ' klesá. Pri neasociovej plasticite s $\psi=0$ je zároveň Davisov prístup ($\beta = \beta_0 = \beta_{failure}$) s redukciou parametrov šmykovej pevnosti na ekvivalentný MC model pomerne konzervatívny, aj z tohoto dôvodu bol rôznymi autormi niekoľkokrát modifikovaný^[32].



Graf 6.3: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote *medium*)

6.2.4 Porovnanie PSO modelov LBEST a GBEST

Na jednoduchom homogénnom svahu boli v rámci prvej overovacej štúdie porovnané výsledky a priebeh hľadania minimálneho stupňa stability s využitím ELSM pre oba varianty optimalizačného algoritmu PSO. Nastavenie variantov algoritmu GBEST bolo uvedené v podkapitole 5.2.6, pre LBEST boli zvolené nasledujúce hodnoty jednotlivých parametrov:

- počet častíc: 20
- rozmer priestoru: \mathcal{B} (optimalizované premenné vo vektore V)
- bounds (hranice): nastavenie podľa úlohy
- max_velocity: $[(-10,10)...]$ (častice môžu meniť svoju rýchlosť (každú zložku rýchlosti) maximálne o hodnotu z intervalu (-10 až 10) za jednotku času)

• **nastavenia (settings):**

$c_1 = 0,5$ (kognitívny komponent - častica bude pri aktualizácii svojej polohy brať do úvahy svoje vlastné najlepšie dosiahnuté riešenie v polovičnej miere)

$c_2 = 0,3$ (sociálny komponent - častica bude pri aktualizácii svojej polohy brať do úvahy najlepšie dosiahnuté riešenie svojich susedov v nižšej miere v porovnaní so svojím vlastným riešením)

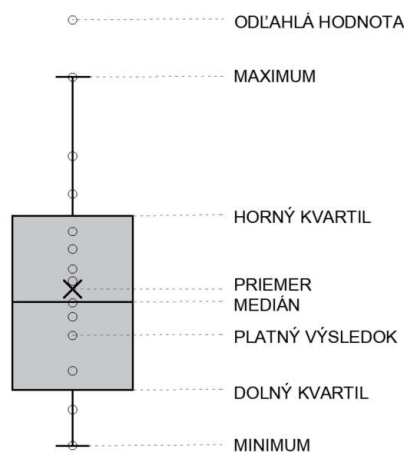
$\omega = 0,9$ (vysoká miera zotrvačnosti umožňuje rýchlejšiu konvergenciu k optimálnemu riešeniu)

$\omega_{damp} = 0,99$ (inercia/zotrvačnosť bude postupne klesať v čase, čo môže pomôcť zabrániť príliš rýchlej konvergencii)

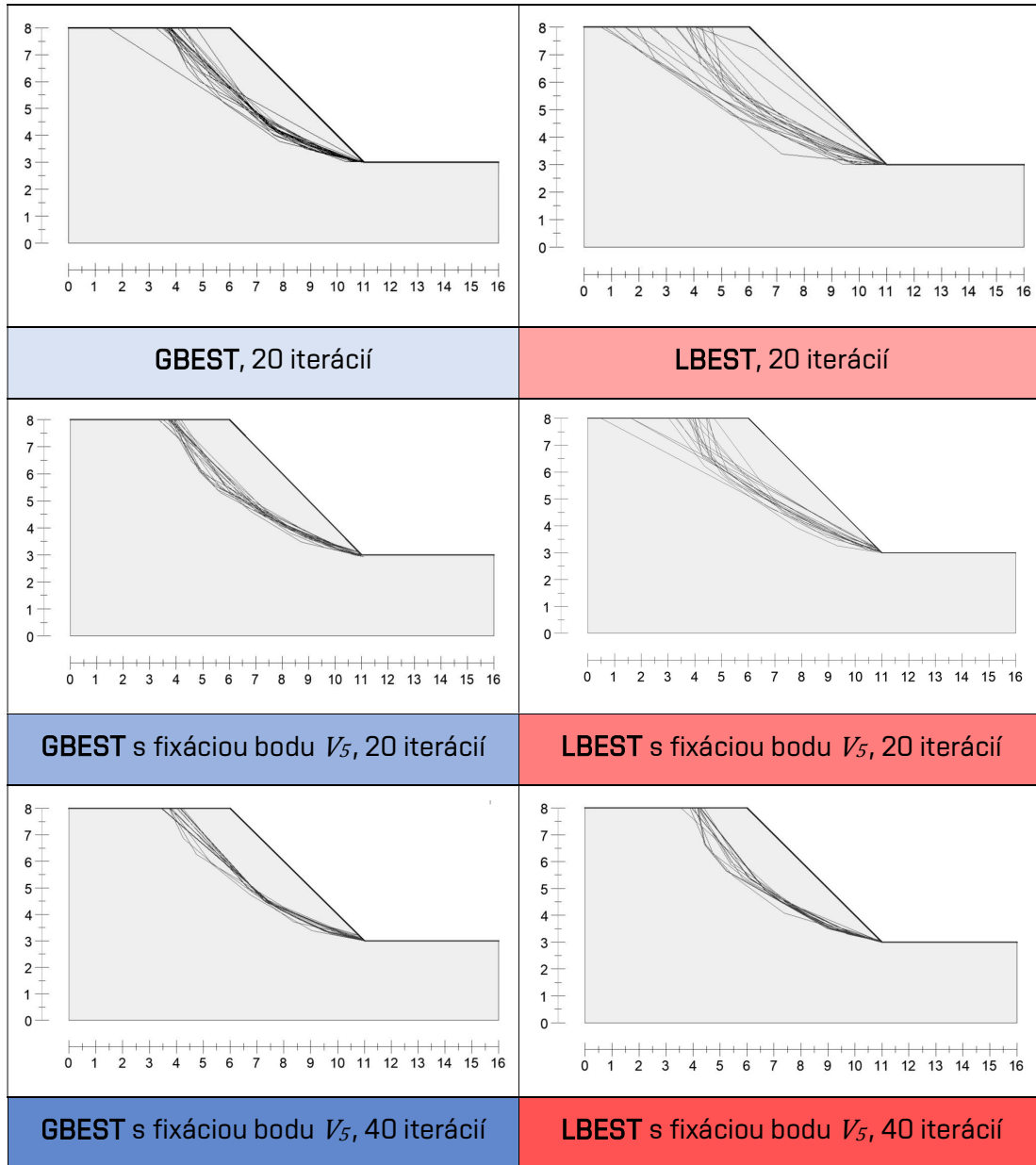
$k = 3$ (exponent pre výpočet počtu informátorov)

$p = 2$ (každá častica berie do úvahy svojich 2 susedov (informátorov), keď aktualizuje svoju polohu)

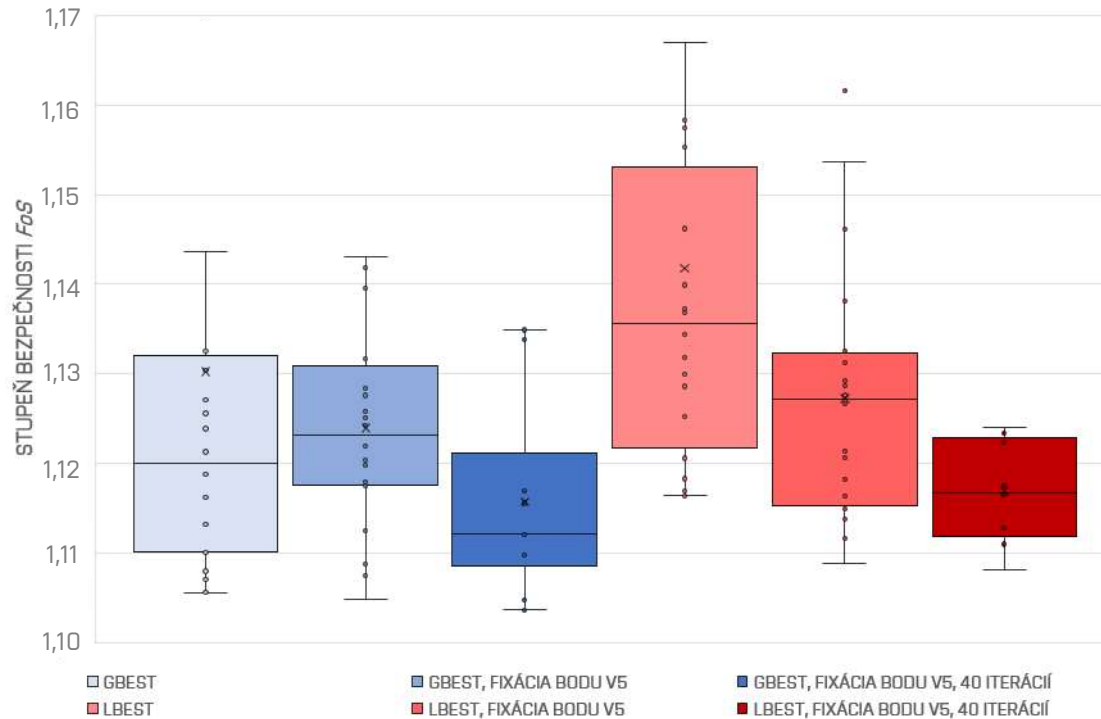
Oba varianty boli najprv porovnávané s premennými pre generovanie šmykovej plochy ($x_1, x_5, \beta_1, \beta_5$) nastavenými tak, aby boli obmedzenia (hranice/bounds) minimálne, v tomto type výpočtu sa hľadá globálne najmenej priaznivý mechanizmus zlyhania s kritériom ukončenia nastaveným na 20 iterácií. Následne bol jeden z parametrov (súradnica x_5 bodu V_5 – bod na kritickej šmykovej ploche v päte svahu) pevne ukotvený pre porovnanie schopnosti hľadania absolútneho minima funkcie v obmedzenej (lokálnej) oblasti s nastavením kritéria ukončenia na 20 a 40 iterácií. Výsledky sú prezentované formou krabicového grafu (graf 6.4) a kritické šmykové plochy získané výpočtami sú vykreslené na obrázku 6.6. Vysvetlenie štatistických charakteristík zobrazovaných v krabicovom grafe je zrejmé z obrázku 6.5.



Obrázok 6.5: Krabicový graf (vysvetlenie vykreslených štatistických charakteristík)



Obrázok 6.6: Vykreslenie výsledných kritických šmykových plôch z jednotlivých výpočtov pre všetky riešené varianty



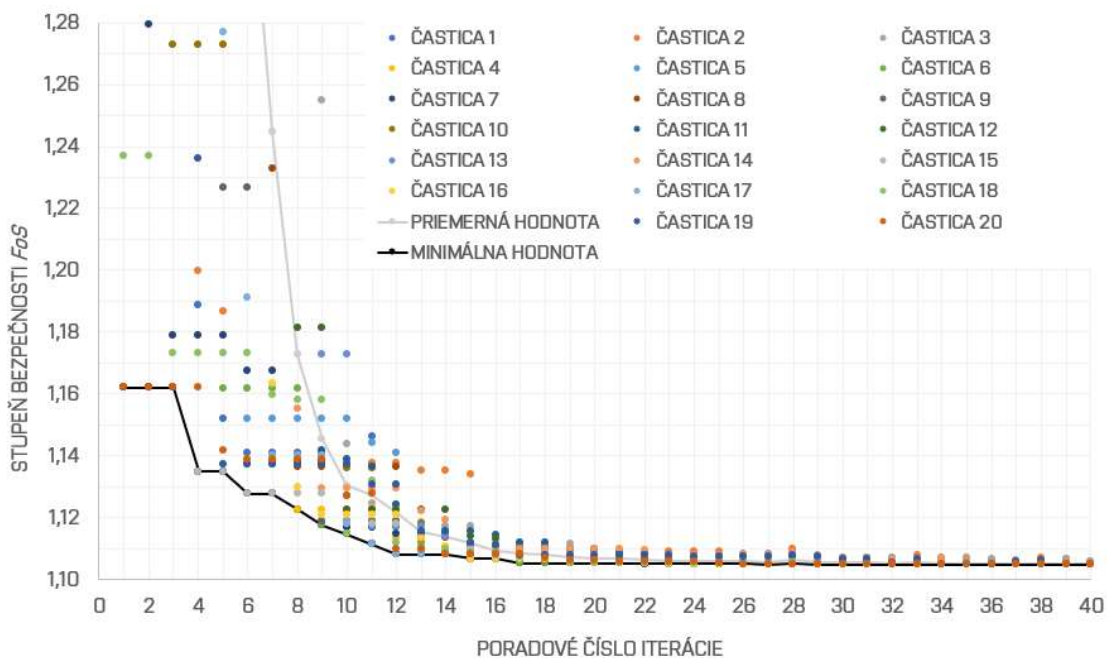
Graf 6.4: Porovnanie variantov algoritmu PSO v krabicovom grafe (bez obmedzení a s fixáciou bodu V_5 v päte svahu)

Je vhodné poznamenať, že pri riešení úlohy stability svahu je najdôležitejší minimálny dosiahnutý stupeň stability svahu pre konkrétny najmenej priaznivý mechanizmus zlyhania (teda tvar šmykovej plochy), no v grafe 6.4 sú zobrazené aj vybrané ostatné štatistické charakteristiky (horný a dolný kvartil, medián, aritmetický priemer a maximum). Pri oboch variantoch optimalizačného algoritmu platí, že najnižší stupeň bezpečnosti bol dosiahnutý s fixáciou bodu V_5 šmykovej plochy v päte svahu a kritériom ukončenia 40 iterácií.

Výsledky analýzy variantu algoritmu GBEST ukazujú, že aj bez fixácie sa podarilo získať pomerne nízke hodnoty minima účelovej funkcie, ktoré pri následnej fixácii a zvýšení počtu iterácií poklesli len veľmi mierne. Z analýzy je teda možné pozorovať, že algoritmus môže byť pri vhodných nastaveniach dostatočne spoľahlivý aj pri 20 iteráciách výpočtu bez fixácie pri variante GBEST (priemerná hodnota stupňa bezpečnosti na úrovni LEM metód Spencer a Janbu).

V prípade variantu LBEST je zreteľný postupný pokles číselných hodnôt sledovaných štatistických charakteristík (od výpočtu bez obmedzení cez výpočet s fixáciou až k výpočtu so zvýšeným počtom iterácií pri fixácii), teda minima, priemeru, mediánu, horného a dolného kvartil. Vo výpočte bez fixácie neboli dosiahnuté dostatočne spoľahlivé výsledky, no fixácia a zvýšený počet iterácií pomáhajú algoritmu správne konvergovať do oblasti globálneho minima.

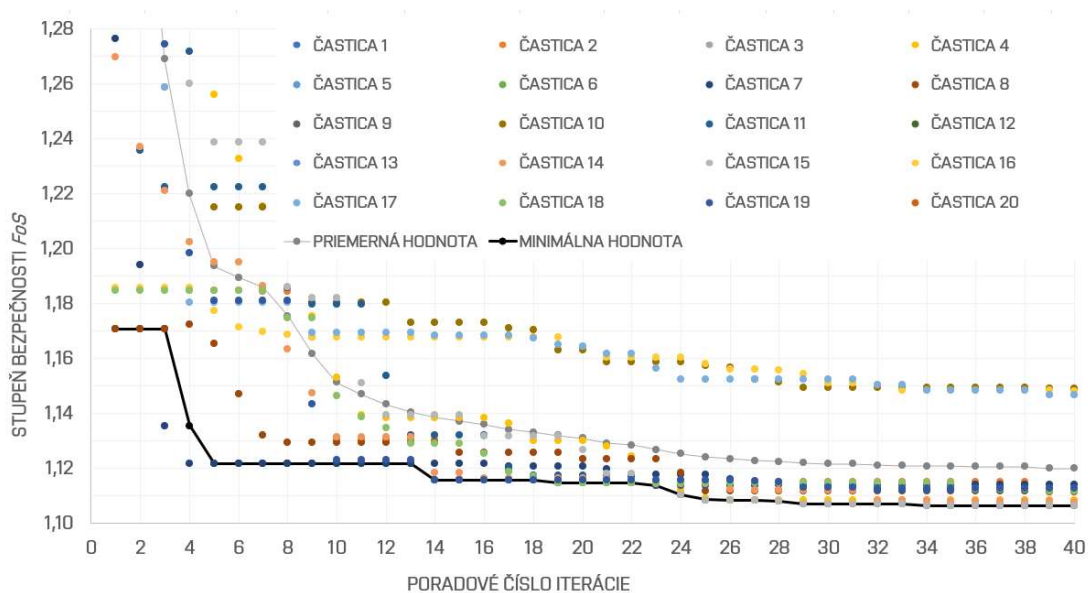
V rámci vyhodnotenia výsledkov štúdie boli vykreslené hodnoty účelovej funkcie dosiahnuté jednotlivými časticami v závislosti na iterácií výpočtu pre oba varianty PSO s fixáciou a 40 iteráciami výpočtu (graf 6.5 pre GBEST a graf 6.6 pre LBEST).



Graf 6.5: Výsledky výpočtov s variantom PSO GBEST (dosiahnuté hodnoty stupňa bezpečnosti pre jednotlivé častice v závislosti na iterácií, vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,28)

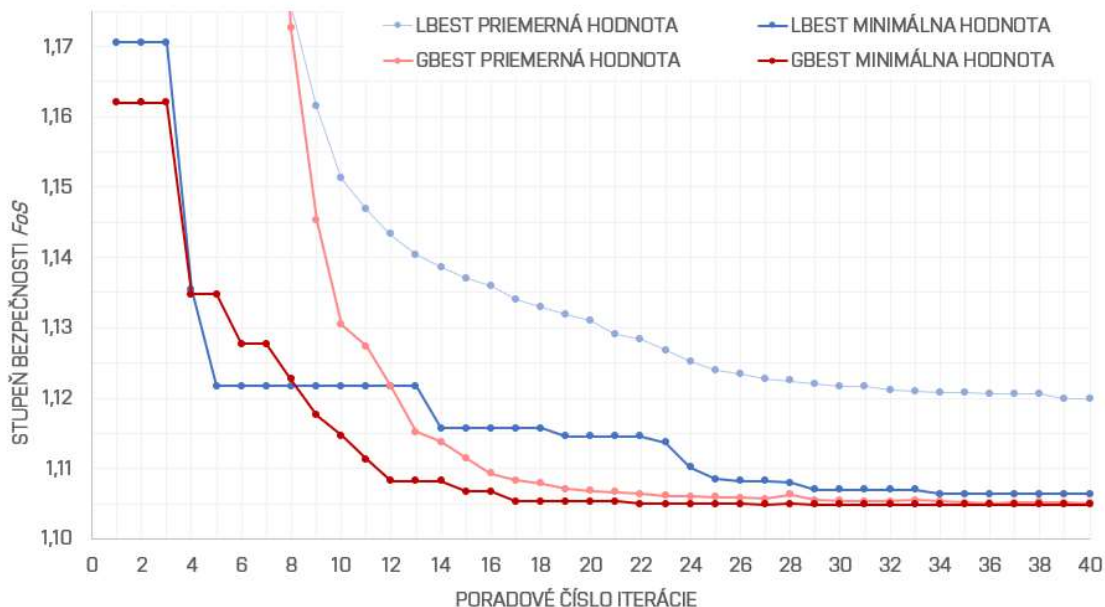
Z grafu 6.5 je možné pozorovať spôsob konverencie výpočtu vo variante GBEST. Vďaka vzájomnej komunikácii častíc výsledok pomerne rýchlo konverguje s každou iteráciou k nájdenému globálnemu minimu. Je možné konštatovať, že väčšina častíc sa v oblasti globálneho minima nachádzala už v 17. iterácií. Niektoré častice našli najprv riešenie s príliš vysokou hodnotou účelovej funkcie (viac ako 10), no už v šiestej iterácií neodpovedala najlepšia vlastná poloha žiadnej z častíc vyššej hodnote účelovej funkcie (stupňa bezpečnosti) ako 3,0.

Priemer uvedený v grafe je vyčíslený len pre častice, ktoré dosiahli výslednú hodnotu účelovej funkcie nižšiu ako 2,0.



Graf 6.6: Výsledky výpočtov s variantom PSO LBEST (dosiahnuté hodnoty stupňa bezpečnosti pre jednotlivé častice v závislosti na iterácií, vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,28)

V grafe 6.6 je možné pozorovať pozvoľnejšiu konvergenciu variantu LBEST ku globálnemu minimu funkcie. Niektorým časticiam sa nepodarilo dosiahnuť ani výslednú hodnotu účelovej funkcie nižšiu ako 10 (po 40 iteráciách), iné uviazli v lokálnom minime, časť však dosiahla podobnú hodnotu globálneho minima ako v prípade variantu GBEST bez fixácie. Vykreslená priemerná hodnota v grafe sa opäť vzťahuje len na výsledné hodnoty účelovej funkcie do 2,0.



Graf 6.7: Vykreslenie priemerných a minimálnych dosiahnutých hodnôt účelovej funkcie v každej iterácii pre varianty PSO GBEST a LBEST (vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,175)

Porovnanie minimálnych a priemerných dosiahnutých hodnôt v každej iterácii pre oba varianty PSO je vykreslené v grafe 6.7. Je nutné podotknúť, že výsledky do veľkej miery závisia od konkrétnych nastavení jednotlivých parametrov (podkapitoly 4.3 a 6.2.4) a v prípade rozdielného nastavenia by pravdepodobne došlo k značným rozdielom. Výsledky tohoto porovnania sa preto vzťahujú len na túto konkrétnu aplikáciu s uvedenými nastaveniami variantov PSO.

Vzhľadom k charakteru úlohy (stabilita svahu) sa javí byť prístup GBEST vhodnejší, pretože nie vždy je možné dopredu určiť polohu aspoň jedného z bodov na šmykovej ploche. Alternatívne je možné najprv použiť prístup GBEST pre upresnenie oblasti globálneho minima a následne použiť prístup LBEST pre nájdenie absolútneho minima, prípadne podobný efekt dosiahnuť zvýšením počtu iterácií vo variante GBEST. PSO sa pre zlepšenie presnosti často kombinuje napríklad s vyhľadávaním podľa vzoru (pattern search) prípadne s gradientnými metódami, taktiež existujú rôzne modifikované varianty PSO (*stratégia harmónie*^[51], unifikované (*unified*) PSO^[52], *constrained* PSO^[53] (s obmedzeniami), prípadne iné).

Do vytvoreného algoritmu ELSM-PSO bol implementovaný variant GBEST, výpočty s použitím LBEST sa vyskytujú výhradne v podkapitole 6.2.4.

6.3 Porovnanie pri dostatočnej rezerve stability

6.3.1 Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)

Úloha stability homogénneho svahu bola riešená aj so sadou priaznivejších parametrov šmykovej pevnosti označených ako "materiál 2". Výsledky analýzy stability svahu s konkrétnou zadanou šmykovou plochy (obrázok 6.2) sú uvedené pre LEM metódy v tabuľke 6.11 a ELSM v tabuľke 6.12.

Tabuľka 6.11: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, materiál 2, asociovaná plasticita)

Dostatočná rezerva spoľahlivosti (Materiál 2)				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i>	2,22	2,46	2,27	2,35

Tabuľka 6.12: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy)

Dostatočná rezerva spoľahlivosti (Materiál 2)			
ELSM	Hustota siete konečných prvkov		
	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> ($n = 3$)	2,3570	2,3970	2,3217
<i>FoS</i> ($n = 100$)	2,3512	2,3613	2,3312

V tomto prípade predikuje ELSM mierne vyšší stupeň bezpečnosti než LEM prúžkové metódy podľa Sarma a Janbua, ale stupeň bezpečnosti zo Spencerovej metódy je vyšší než z ELSM. Zároveň sú výsledky (tabuľka 6.12) v zhode s analýzami pre sadu šmykových parametrov "materiál 1", kde pri diskretizácii segmentov šmykovej plochy na väčší počet podsegmentov sú medzi výsledkami analýz pri rôznej hustote siete konečných prvkov menšie rozdiely. Analýza pri hustote siete konečných prvkov *very fine* predikuje oproti hustote *very course* pre $n = 3$ podsegmenty o **1,52%** nižší stupeň stability, pre $n = 100$ sa jedná o **0,86%** nižší stupeň stability.

6.3.2 Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha

Pre LEM průzkové metody sa podobne ako v predchádzajúcom prípade zmenšili rozdiely medzi zistenými stupňami bezpečnosti (tabuľka 6.13).

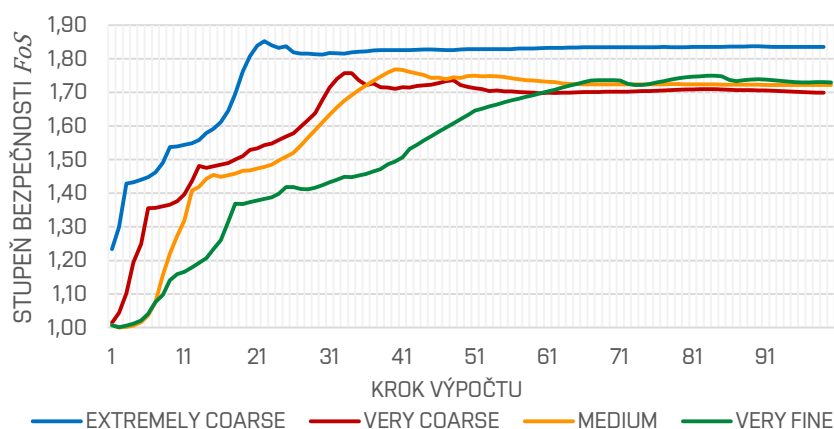
Tabuľka 6.13: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, asociovaná plasticita)

Dostatočná rezerva spoľahlivosti (Materiál 2)				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i>	1,89	1,86	1,87	1,83

Metóda SRM pre priaznivejšiu sadu materiálových vlastností predikuje s rastúcou kvalitou importovanej siete napäťových bodov nižší stupeň bezpečnosti (tabuľka 6.14, Graf 6.8), ten je pre najhustejšiu sieť konečných prvkov *very fine* o **6,67%** nižší ako pri sieti s najmenšou použitou hustotou *extremely coarse*.

Tabuľka 6.14: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita)

Dostatočná rezerva spoľahlivosti (Materiál 2)				
SRM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Coarse	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i>	1,835	1,699	1,717	1,720

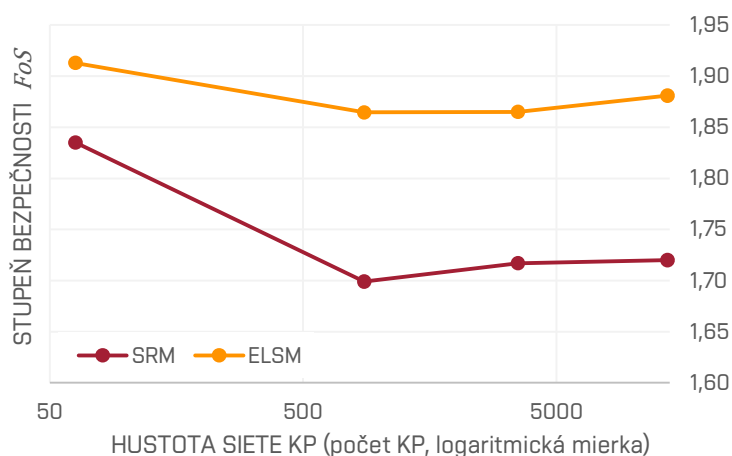


Graf 6.8: Vývoj stupňa bezpečnosti *FoS* v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie s rezervou únosnosti)

Hodnota stupňa bezpečnosti pri analýze svahu metódou ELSM (tabuľka 6.15) s rastúcou úrovňou hustoty siete konečných prvkov klesá, podobne ako v prípade SRM (tabuľka 6.14). Stupeň stability získaný ELSM je pri hustote siete KP *very fine* nižší o **1,70%** oproti hustote *extremely course*.

Tabuľka 6.15: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita)

Dostatočná rezerva spoľahlivosti (Materiál 2)				
ELSM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Course	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> (n = 100)	1,9128	1,8644	1,8650	1,8808



Graf 6.9: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti *FoS* (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie s rezervou únosnosti)

Porovnanie metód pri výpočte stability svahu so sadou vlastností "materiál 2" poukazuje na skutočnosť, že je zachovaná väčšina trendov a vzťahov medzi výsledkami oproti analýze so stabilite menej priaznivou sadou vlastností "materiál 1". ELSM predikuje v porovnaní s SRM pri hustote siete *extremely course* o **4,07%** vyšší stupeň bezpečnosti, pre hustotu *very fine* je *FoS* pri ELSM vyšší o **8,55%**. Najmenší stupeň bezpečnosti bol dosiahnutý v SRM pri hustote siete konečných prvkov *very fine*, rovnako ako pre sadu "materiál 1". Potvrdila sa aj menšia závislosť algoritmu ELSM-PSO na použitej hustote siete konečných prvkov.

6.3.3 Vplyv uhlu dilatancie ψ

Analýza vplyvu veľkosti pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' na výsledný stupeň stability s využitím metód SRM (tabuľka 6.16) a ELSM (tabuľka 6.17) pri priaznivejšej sade parametrov šmykovej pevnosti ("materiál 2", rezerva únosnosti) vykazuje rovnaké trendy a závislosti ako v prípade menej priaznivej sady vlastností ("materiál 1", hranica únosnosti).

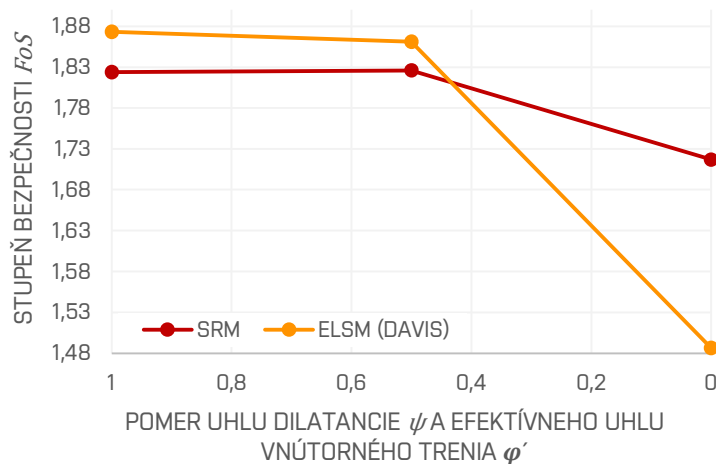
Tabuľka 6.16: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote *medium*)

SRM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$
Stupeň bezpečnosti	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')
<i>FoS</i>	1,824	1,826	1,717

Tabuľka 6.17: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote *medium*)

ELSM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$	
Stupeň bezpečnosti	MC = MC Davis ekvivalentný model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)	MC model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,8733	1,8611	1,865	1,4868

S narastajúcim rozdielom medzi efektívnym uhlom vnútorného trenia φ' a uhlom dilatancie ψ klesá výsledný stupeň stability (graf 6.10). Podľa predpokladu je aj v tomto prípade použitý Davisov prístup (využívajúci ekvivalentný MC model s redukovanými parametrami šmykovej pevnosti) pomerne konzervatívny pri neasociovanej plasticite s $\psi = 0$.



Graf 6.10: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote *medium*)

6.4 Vyhodnotenie výsledkov

Štúdia bola rozdelená na dve časti. Najprv boli porovnávané výsledky výpočtov pri použití vstupných parametrov šmykovej pevnosti, ktoré povedú k nízkemu FoS na hranici straty stability. Pri súradnicami predpísanej polohe skúšobnej šmykovej plochy mala ELSM výsledky v dostatočnej zhode s prúžkovými metódami, taktiež sa potvrdilo, že vyšší počet podsegmentov šmykovej plochy povedie k menším rozdielom medzi výslednými stupňami stability pri rôznych hustotách importovanej siete konečných prvkov. Po optimalizácii boli výsledné stupne stability získané pomocou ELSM mierne vyššie ako výsledky z SRM pre dané hustoty sietí KP, približovali sa výsledkom z LEM. ELSM-PSO algoritmus sa ukázal byť menej náchylný na zmenu kvality siete KP ako Plaxis 2D (SRM). Stupeň stability však s rastúcou kvalitou siete klesal pri oboch metódach, ktoré preberajú napätosť z MKP riešiča.

Výsledky indikujú, že medzi kvalitou siete KP a presnosťou vypočítaného stupňa stability je priama úmera. Hrubšia sieť môže značne zjednodušiť geometriu a chovanie zeminy, to povedie k menej presným výpočtom stability, keďže algoritmus môže zlyhať pri zachytávaní lokálne koncentrovaných napätí alebo variácií vlastností zemín^[W8]. Toto povedie k nepresnému posúdeniu stability svahu, keďže môže dôjsť k prehliadnutiu potenciálnych mechanizmov zlyhania (tvarov šmykových plôch). Naopak, jemnejšia sieť zaistí detailnejšie informácie o rozdelení napätí a lepšie vystihne potenciálny režim a mechanizmus zlyhania^[47].

Druhá část štúdie, v ktorej boli pre výpočet použité parametre šmykovej pevnosti s vyššími hodnotami, viedla k výsledkom s dostatočne vysokým stupňom stability. V rámci výsledkov sa veľká časť trendov a závislostí nelíšila od predchádzajúcej štúdie, rozdiely hodnôt vypočítaných stupňov stability medzi SRM a ELSM pri rovnakých hustotách siete konečných prvkov sa však veľmi mierne zväčšili.

V oboch častiach štúdie bol najmenší stupeň stability získaný metódou SRM pri hustote siete konečných prvkov *very fine*.

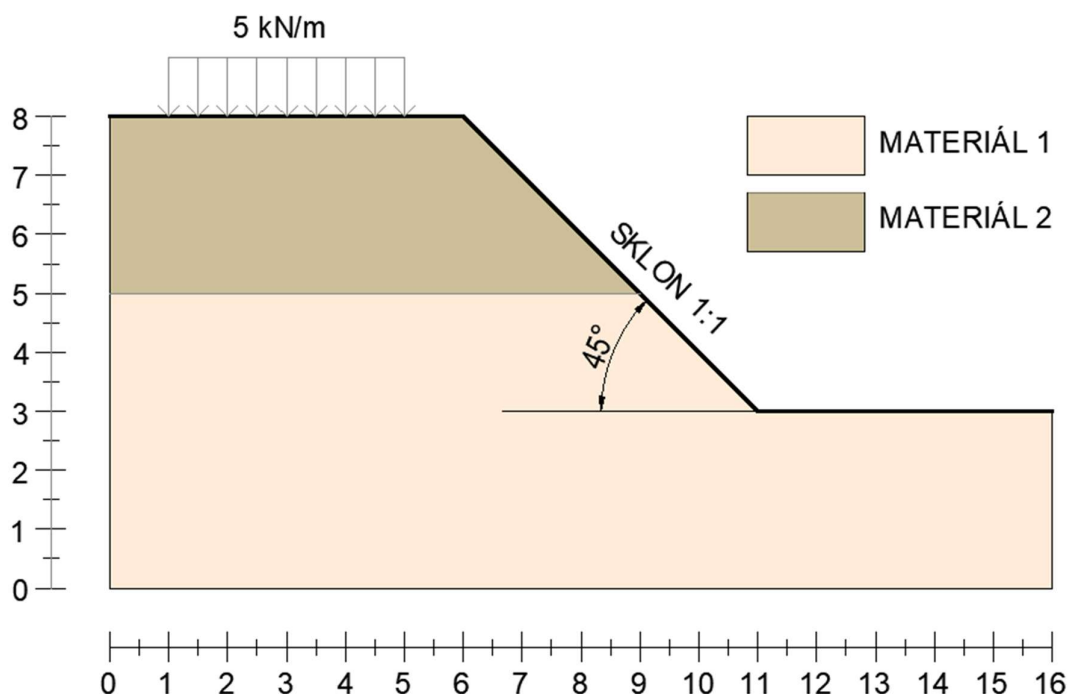
Pri skúmaní vplyvu pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' na výsledný stupeň bezpečnosti sa pri oboch sadách parametrov šmykovej pevnosti dospelo k podobným výsledkom, so znižujúcim sa pomerom týchto uhlov stupeň bezpečnosti klesá. Pri neasociovej plasticite s $\psi = 0$ predikuje ekvivalentný MC model (Davisov prístup, $\beta = \beta_0 = \beta_{failure}$) zakomponovaný v ELSM-PSO algoritme konzervatívnejší stupeň bezpečnosti z dôvodu značnej redukcie parametrov šmykovej pevnosti.

Súčasťou štúdie bolo aj porovnanie variantov LBEST a GBEST optimalizačného algoritmu PSO pre menej priaznivú sadu šmykových vlastností. Skúmaný bol priebeh konvergencie a dosiahnuté globálne minimum stupňa stability za daných podmienok. Do algoritmu ELSM-PSO bol implementovaný variant GBEST, ktorý sa aj pri vyhľadávaní v modeli bez upresnenia polohy kritickej šmykovej plochy ukázal byť už pri 20 iteráciách schopný nájsť dostatočne nízku hodnotu stupňa bezpečnosti. Model LBEST funguje dostatočne dobre pri upresnení polohy kritickej šmykovej plochy pomocou obmedzení vyhľadávaného priestoru a pri kritérii ukončenia nastavenom na vyšší počet iterácií (40).

7 OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.2: HETEROGÉNNY SVAH

7.1 Úvodný komentár k riešenej úlohe

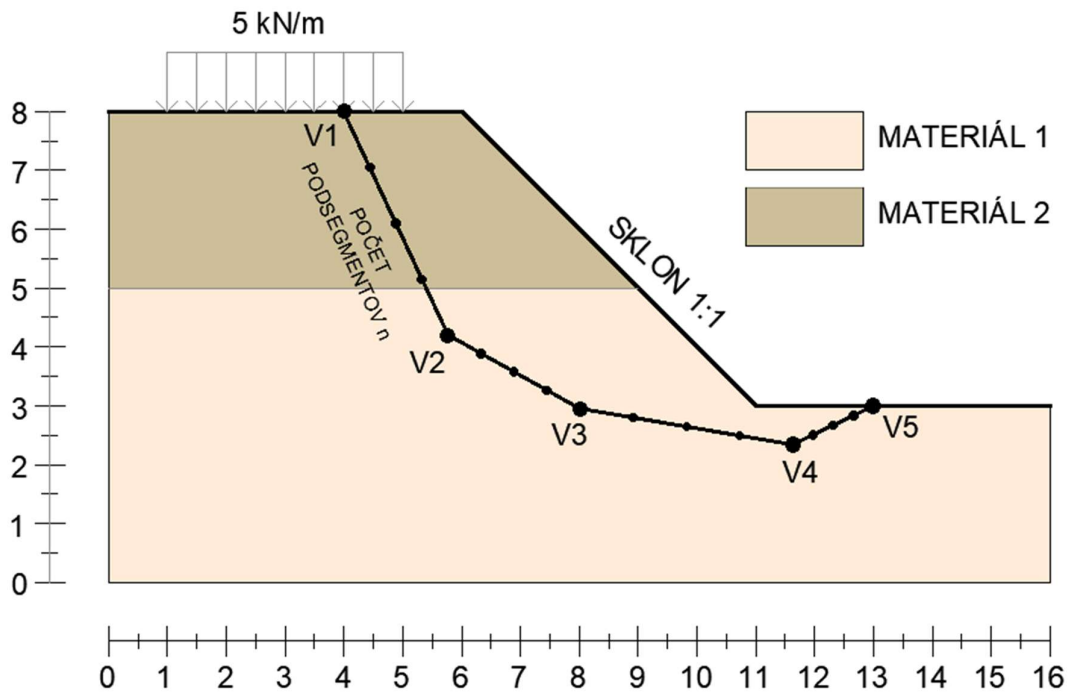
Cieľom druhej overovacej štúdie je porovnanie výsledkov analýzy pomocou metódy ELSM s výsledkami bežne používaných metód LEM a SRM na heterogénnom svahu.



Obrázok 7.1: Zadanie úlohy pre overováciu štúdiu č. 2

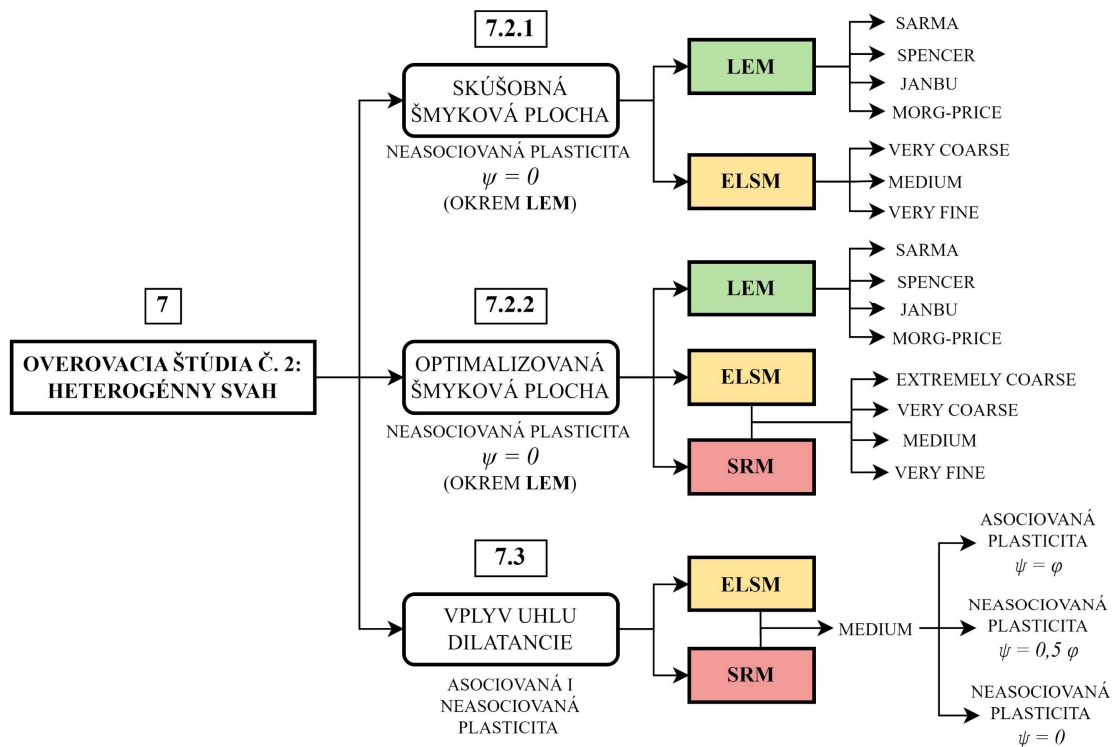
Analyzovaný svah má rovnakú geometriu ako v prípade overovacej štúdie č. 1. Rozdielom je vloženie horizontálneho rozhrania materiálov vo výške $y = 5$ (obrázok 7.1). V tejto štúdií sú použité materiálové sady vlastností zo štúdie č. 1 (tabuľka 6.1), pričom nad rozhraním sa nachádza "materiál 2" (ak by sa vo vrchnej časti nachádzal "materiál 1", došlo by k vzniku lokálnej šmykovej plochy). Súčasťou štúdie je porovnanie algoritmov pri zadanej (neoptimalizovanej) šmykovej ploche a optimalizovanej šmykovej ploche. Tvar zadanej šmykovej plochy je identický s tvarom plochy v štúdií č. 1 (obrázok 7.2, tabuľka súradníc riadiacich bodov 6.2).

Stupeň bezpečnosti bol vyšetrovaný tromi rôznymi metódami výpočtu: **LEM** (GEO 5, výber prúžkových metód^[W4]), **SRM** (Plaxis 2D) a **ELSM** (napätosť získaná zo softvéru Plaxis 2D a využitie algoritmu ELSM-PSO). Taktiež bol sledovaný aj vplyv hustoty siete konečných prvkov na stupeň bezpečnosti (pre SRM a ELSM). Sieť konečných prvkov bola generovaná z 15 uzlových trojuholníkových prvkov s 12 napäťovými integračnými bodmi.



Obrázok 7.2: Testovaná skúšobná šmyková plocha pre overovaciu štúdiu č. 2

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, v úvodnej kapitole 7.2 prebehne porovnanie výsledkov analýz stability svahu pri rôznej hustote siete konečných prvkov pri neasociovannej plasticite ($\psi = 0$) a v naväzujúcej kapitole 7.3 sa bude práca zaoberať vplyvom pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' na stupeň stability zadaného heterogénneho svahu.



Obrázok 7.3: Schéma organizácie výpočtov pre overovaciu štúdiu č. 2 na heterogénnom svahu

7.2 Porovnanie pre rôzne hustoty siete MKP

7.2.1 Skúšobná šmyková plocha (bez optimalizácie)

Výsledky analýzy zadaného heterogénneho svahu s použitím metód LEM (GEO 5) sú uvedené v tabuľke 7.1.

Tabuľka 7.1: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, heterogénny svah, asociovaná plasticita)

Heterogénny svah				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i>	1,52	1,63	1,52	1,58

Výpočty metódou ELSM prebehli pri dvoch rôznych nastaveniach diskretizácie segmentov ($n = 3$ podsegmenty, $n = 100$ podsegmentov) pre tri rôzne hustoty siete konečných prvkov (tabuľka 7.2).

Tabuľka 7.2: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy)

Heterogénny svah			
ELSM	Hustota siete konečných prvkov		
	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> ($n = 3$)	1,539	1,558	1,554
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,518	1,520	1,518

Z uvedených výsledkov je zrejma dobrá zhoda medzi ELSM ($n = 100$, pre všetky analyzované hustoty siete konečných prvkov) a LEM prúžkovými metódami podľa Sarmy a Janbu. Aj tentokrát predikuje LEM metóda podľa Spencera^[30] najvyšší stupeň bezpečnosti. V oboch prípadoch diskretizácie segmentov v ELSM dochádza pri heterogénnom svahu k veľmi malým rozdielom medzi výsledkami analýz s rôznym nastavením hustoty siete konečných prvkov, pri $n = 100$ sú stupne bezpečnosti získané pri jednotlivých hustotách siete konečných prvkov takmer identické.

7.2.2 Optimalizovaná (kritická) šmyková plocha

V prípade analýzy heterogénneho svahu sa po optimalizácii a nájdení kritickej šmykovej plochy rozdiely vo výslednom stupni stability pri prúžkových metódach (LEM) výrazne zmenšili (tabuľka 7.3).

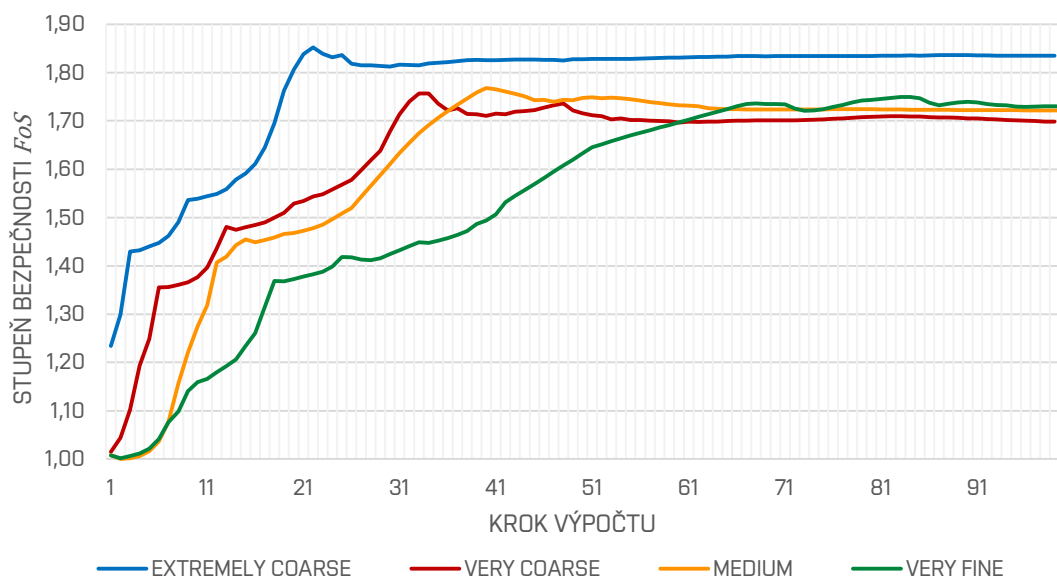
Tabuľka 7.3: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, asociovaná plasticita)

Heterogénny svah				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i>	1,36	1,32	1,30	1,30

Stupeň stability (FoS) sa pri SRM analýze heterogénneho svahu znižuje s rastúcou hustotou siete konečných prvkov (tabuľka 7.4, graf 7.1). Pri najjemnejšej sieti s nastavením siete KP *very fine* je stupeň bezpečnosti o **5,80%** nižší ako v prípade najhrubšej *siete extremely coarse*.

Tabuľka 7.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)

Heterogénny svah				
SRM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Coarse	Very Coarse	Medium	Very Fine
FoS	1,258	1,203	1,195	1,189

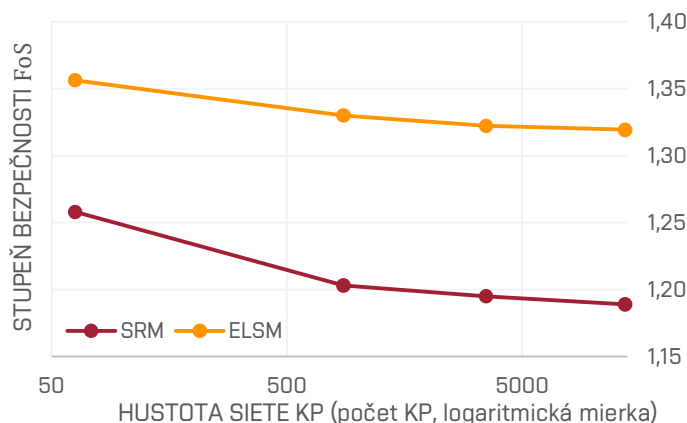


Graf 7.1: Vývoj stupňa bezpečnosti FoS v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)

Výsledky ELSM (tabuľka 7.5) analýzy majú identický trend poklesu stupňa bezpečnosti s rastúcou hustotou siete konečných prvkov v porovnaní s SRM. Stupeň stability pri porovnaní najjemnejšej a najhrubšej siete konečných prvkov poklesol o **2,80%**, to je opäť menší rozdiel ako pri SRM.

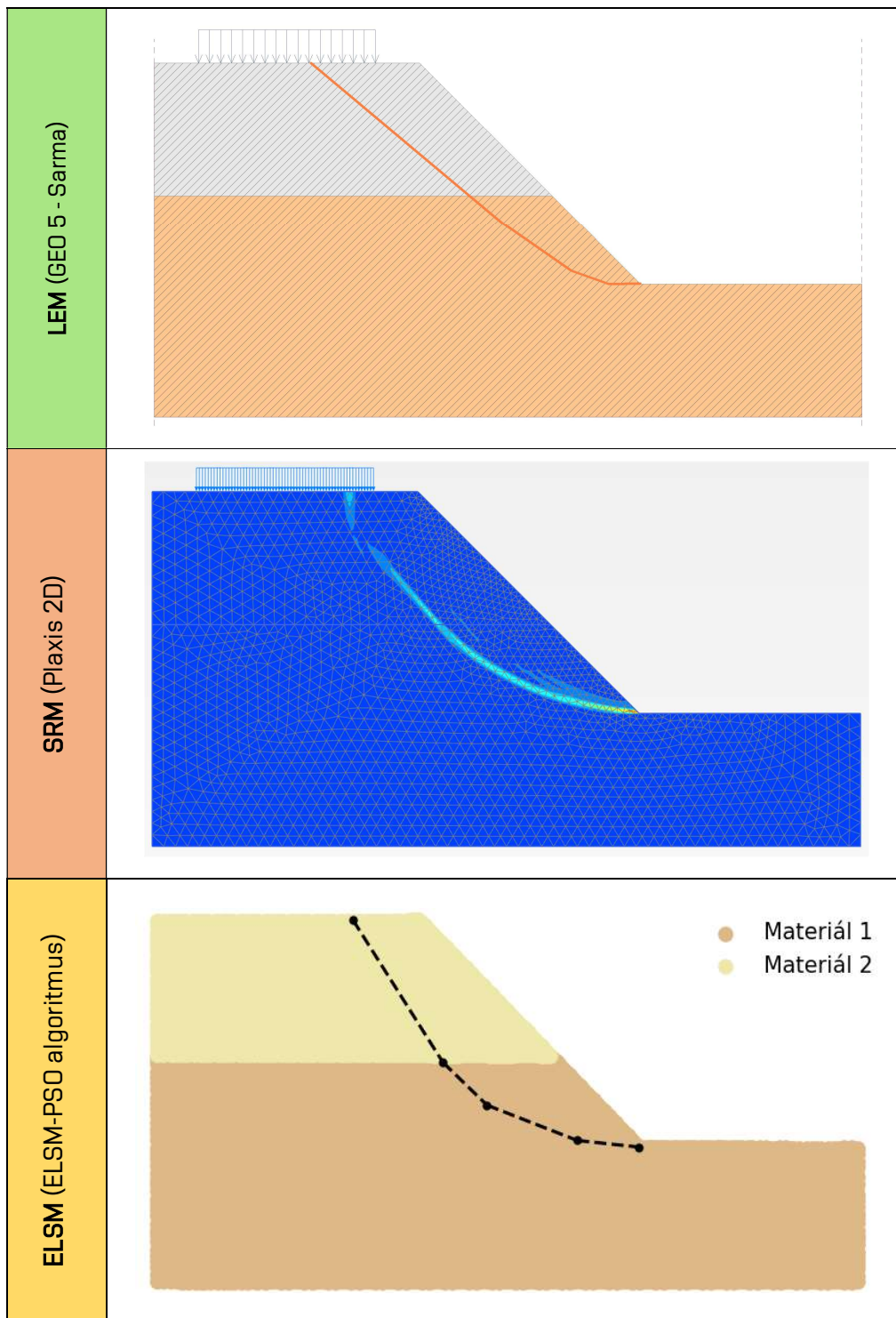
Tabuľka 7.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)

Heterogénny svah				
ELSM	Hustota siete konečných prvkov			
	Extremely Course	Very Coarse	Medium	Very Fine
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,3563	1,3301	1,3221	1,3193


 Graf 7.2: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti *FoS* (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)

Výsledné hodnoty stupňa stability *FoS* získaného metódou ELSM sú však aj v tomto prípade vyššie ako pre metódu SRM a približujú sa hodnotám získaným z prúžkových metód (LEM). Konkrétne je stupeň stability z ELSM vyšší o **7,25%** pri sieti s hustotou *extremely course* a **9,88%** pre sieť *very fine*.

Výpočty v tejto podkapitole uvažujú s neasociovanou plasticitou ($\psi = 0$, s výnimkou LEM), je potvrdený pokles stupňa stability pre metódy SRM a ELSM pri zväčšujúcej sa hustote siete konečných prvkov (graf 7.2). Aj v prípade heterogénneho svahu vykazuje metóda ELSM menšiu citlivosť na zmenu hustoty siete konečných prvkov. Z obrázku 7.4 je zrejmé, že v tvare optimalizovanej kritickej šmykovej plochy pri porovnaní všetkých troch analyzovaných metód dochádza k minimálnym rozdielom.



Obrázok 7.4: Tvar optimalizovanej šmykovej plochy dosiahnutý analýzami stability svahu pomocou LEM, SRM a ELSM (heterogénny svah, neasociovaná plasticita)

7.3 Vplyv uhlu dilatancie ψ

V tabuľkách 7.6 (SRM) a 7.7 (ELSM) je uvedené zhrnutie výsledkov analýz stability svahu s vplyvom pomeru uhlov dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' pre metódy SRM a ELSM.

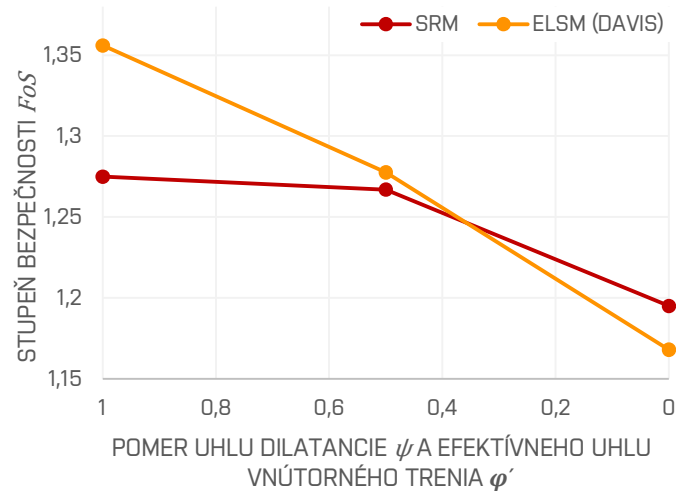
Tabuľka 7.6: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (heterogénny svah, optimalizovaná/kritická šmyková plocha, sieť KP v hustote *medium*)

SRM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$
Stupeň bezpečnosti	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')	MC model (c', φ')
<i>FoS</i>	1,275	1,267	1,195

Tabuľka 7.7: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (heterogénny svah, optimalizovaná/kritická šmyková plocha, sieť KP v hustote *medium*)

ELSM	Asociovaná plasticita $\psi = \varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0,5\varphi'$	Neasociovaná plasticita $\psi = 0$	
Stupeň bezpečnosti	MC = MC Davis ekvivalentný model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)	MC model (c', φ')	MC Davis ekvivalentný model (c^*, φ^*)
<i>FoS</i> ($n = 100$)	1,3561	1,2776	1,3198	1,168

Na základe výsledkov je možné konštatovať, že pri oboch metódach stupeň stability so znižujúcim sa pomerom uhlov ψ a φ' opäť klesá (graf 7.3), tento trend je v súlade s výsledkami štúdie na homogénnom svahu v kapitole 6 a Tschuchniggovým výskumom^[31]. V prípade výpočtu metódou ELSM s nulovým uhlom dilatancie $\psi = 0$ (Davis^[31, 32]) je opäť zreteľný výrazný pokles stupňa stability, bola potvrdená aj zvýšená oscilácia výsledkov.



Graf 7.3: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, heterogénny svah, sieť KP v hustote *medium*)

7.4 Vyhodnotenie výsledkov

Analýza heterogénneho svahu potvrdila zistenia z predchádzajúcej štúdie na homogénnom svahu. S rastúcou hustotou siete konečných prvkov stupeň stability pri ELSM a SRM analýze klesal. Pri analýze heterogénneho prostredia je vplyv hustoty siete dôležitý pre rozdelenie napätia v oblasti geologických rozhraní a diskontinuit, to sa v štúdií potvrdilo väčším rozdielom v stupni stability pre najväčšiu a najmenšiu aplikovanú hustotu siete konečných prvkov oproti výpočtom pre homogénny svah.

8 OVEROVACIA ŠTÚDIA Č.3: REÁLNA OKRAJOVÁ ÚLOHA

8.1 Úvodný komentár k riešenej úlohe

V záverečnej štúdií bude porovnaný stupeň stability získaný metódami LEM, SRM a ELSM na reálnej okrajovej úlohe. Úloha spočíva v posúdení vonkajšej stability navrhovaného vodného diela Vlachovice^[16] (obrázok 8.1). Skladba telesa hrádze v posudzovanom variante predpokladá využitie miestnych materiálov bez zlepšenia. Výpočtový MKP model v Plaxis 2D^[23] bol prevzatý z Ústavu geotechniky FAST v Brne.



Obrázok 8.1: Vizualizácia priestoru sypanej zemnej hrádze vodného diela Vlachovice^[16]

8.1.1 Geologické pomery

Popis geologických (obrázok 8.2) a hydrogeologických podmienok vychádza z inžiniersko-geologického a hydrogeologického prieskumu^[24]:

- **Predkvartérne podložie**

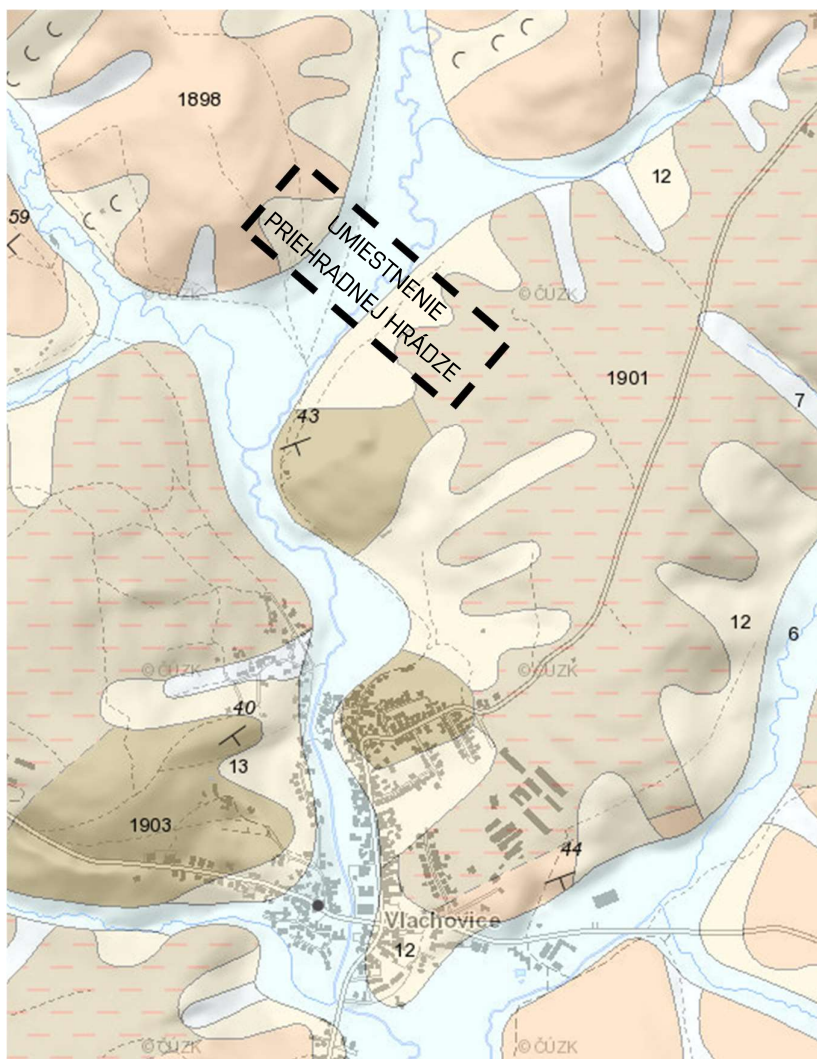
V záujmovej oblasti je prekvartérne podložie tvorené horninami flyšového vývoja spadajúcimi do račanskej jednotky magurského príkrovu. Račanská jednotka je tvorená zlínskym súvrstvím, v ktorom sa striedajú vrstvy hrubších a jemnejších pieskocov a vrstvy prachocov až ílovcov.

• Kvartérne súvrstvia

- **Deluviálne sedimenty:** sú situované na svahoch vodného diela, majú charakter piesčitých až štrkovitých hlín a hlinitých pieskov s variabilným podielom slabo opracovaných úlomkov až kameňov podložných sedimentárnych hornín. Mocnosť týchto vrstiev sa v päte svahu pohybuje v rozsahu od 0,5 m do 3 m.
- **Deluvio-fluviálne a nivné sedimenty:** v priestore zemného telesa vodného diela sú viazané na vodný tok rieky Vlára. Na báze fluviálneho súvrstvia je situovaná terasa, ktorá je vytvorená štrkami s hlinito-piesčitou prímесou alebo pleistocennými hlinitými pieskami. Mocnosť fluviálnych štrkov sa pohybuje v intervale od 2,7 až do 4,5 m. Bazálna vrstva fluviálnych štrkov je prekrytá náplavami, ktoré sa skladajú z jemnozrnných hlinitých pieskov, piesčitých hlín a najvrchnejších povodňových hlín.

8.1.2 Hydrogeologické pomery

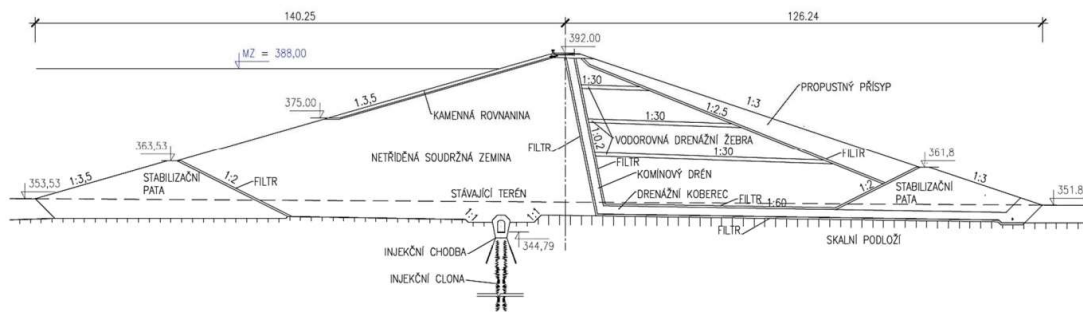
Záujmové územie podľa hydrogeologickej rajonizácie patrí do rajónu *Flyš v pohodí Váhu* – severná časť (základná vrstva 3223). Podzemná voda s plytkým obehom je viazaná na holocénne fluviálne sedimenty – štrky s relatívne vysokou priepustnosťou (10^{-4} až 10^{-5} m/s). Hladina podzemnej vody je voľná až mierne napätá. Tento kolektor je na bázi vymedzený výskytom predkvartérnych hornín, ktoré v dôsledku zvetrania tvoria poloizolátor, nižšie v súvrství potom aj izolátor. Obeh podzemnej vody vo flyšových horninách je hlavne ovplyvnený puklinovou priepustnosťou (veľmi malý podiel má aj prielinová priepustnosť) a je sústredený do povrchovej zvetralej zóny s niekoľkonásobne vyššou priepustnosťou ako v hlbších častiach masívu.



Obrázok 8.2: Výrez z geologickej mapy 1 : 50 000 (ČGS), KVARTÉR: 6 – nivný sediment, 12 – piesčito-hlinitý až hlinito-piesčitý sediment, 13 – kamenitý až hlinito-kamenitý sediment^[W1]

8.1.3 Konštrukcia vodného diela

Priehradný profil je umiestnený v morfológicky výhodnom profile nad obcou Vlachovice vo vzdialenosti zhruba 550 m od sútoku Vlára a Sviborky. Hrádza je uvažovaná ako sypaná s priamou osou, pričom koruna hrádze je navrhnutá vo výške 392,00 m n. m., maximálna výška hrádze nad terénom je približne 40 m. Prevýšenie koruny hrádze nad maximálnou hladinou je navrhnuté 2 m, pričom na korune hrádze bude umiestnený vetrolam. Prípadová štúdia rieši alternatívny variant skladby priehradného telesa, v ktorom sa uvažuje s využitím miestnych^[22, 23, 26] (menej vhodných) zemín a materiálov z priestoru zátopy bez ich zlepšenia (obrázok 8.3).



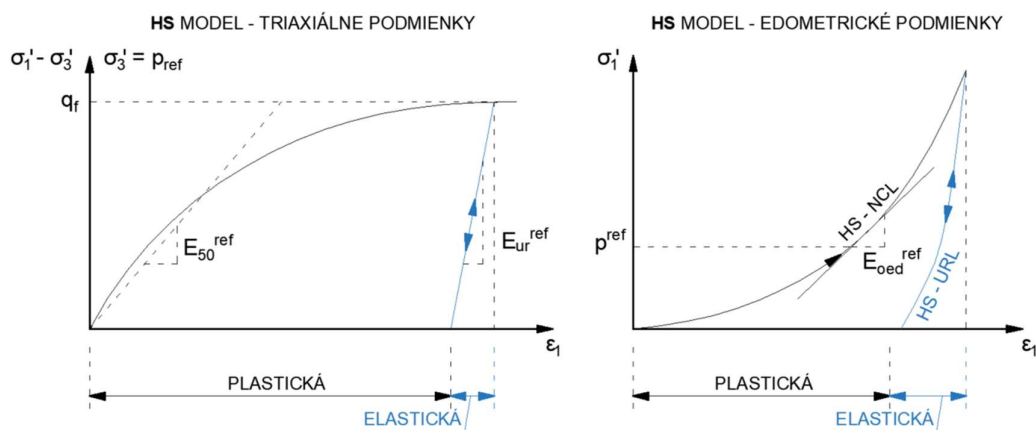
Obrázok 8.3: Profil posudzovanej zemej zonálnej hrádze so stabilizačnými päťami, komínovým drénom a vodorovnými drenážnymi rebami (zaústenými do priepustného prísypu)^[22, 26]

Hrádza je navrhnutá ako homogénna z netriedeného hlinitého a ílovitého materiálu. Návodný svah je navrhnutý v sklone 1:3,5 a vzdušný svah v sklone 1:3,0. Kontrola priesaku hrádzou je zabezpečená kombináciou komínového drénu a drenážneho koberca. Drenážny koberec zároveň plní funkciu zachytenia priesaku z podložia. Na vzdušnej strane je uvažované so zhotovením drenážnych rebier pre urýchlenie primárnej konsolidácie v priebehu výstavby. Rebra môžu plniť odvodňovaciu funkciu, pretože sú na vzdušnej strane vyvedené do priepustného prísypu. Na oboch svahoch vodného diela sú pre zlepšenie stabilných pomerov navrhnuté stabilizačné pätky z kamenitého materiálu.

8.1.4 Materiál hrádze a materiálové modely

Overovacia štúdia sa týka výhradne variantu s materiálovým riešením hrádze s použitím miestnych zemín, ktoré sú podmienené vhodné k priamemu použitiu bez úpravy. Jedná sa o zeminy klasifikované ako GC, CG, CS, MI, MH, CI, CL.

Pre geotechnické typy charakteru zemín bol využitý materiálový model Hardening Soil (HS, obrázok 8.4^[23]). Jedná sa o elastoplastický materiálový model s objemovým a šmykovým spevňovaním. V tomto materiálovom modeli je taktiež zahrnutá závislosť tuhosti na režime zaťažovania (prvotné zaťaženie, odľahčenie a opätovné pritaženie) a na efektívnom napätí. Tieto faktory sú relevantné pre deformačnú analýzu. Z hľadiska stabilných výpočtov je v materiálovom modeli implementovaná štandardná Mohr-Coulombova podmienka porušenia.



Obrázok 8.4: HS model – triaxiálne podmienky a edometrické podmienky (upravené z [23])

Materiálový model je definovaný nasledujúcimi parametrami:

- φ' – efektívny uhol vnútorného trenia,
- c' – efektívna súdržnosť,
- ψ – uhol dilatancie,
- E_{oed}^{ref} – dotyčnicový edometrický modul platný pre $\sigma_1' = p_{ref}$,
- E_{50}^{ref} – sečnicový modul z triaxiálnej skúšky platný pre $\sigma_3' = p_{ref}$,
- E_{ur}^{ref} – modul pružnosti pri odľahčení – opätovnom pritažení pre $\sigma_3' = p_{ref}$,
- μ_{ur} – Poissonovo číslo pri odľahčení – opätovnom pritažení,
- p – referenčné napätie.

Pre skalné podložie do hĺbky 15 m bol využitý Mohr-Coulombov materiálový model (MC). Ide o jednoduchší lineárne elastický – perfektne plastický materiálový model. Nedochádza k vzniku plastických šmykových deformácií pred dosiahnutím podmienky porušenia. V prípade izotropného zaťažovania sa materiál chová elasticky. Tuhosť zeminy v základnom variante modelu nie je závislá na napätosti, režime zaťažovania a aktuálnom pretvorení.

Model je definovaný piatimi základnými parametrami:

- φ' – efektívny uhol vnútorného trenia,
- c' – efektívna súdržnosť,
- ψ – uhol dilatancie,
- E – Youngov modul pružnosti,

μ – Poissonovo číslo.

Pre skalné podložie v hĺbke väčšej ako 15 m bol aplikovaný lineárne-elastický materiálový model (LE).

8.1.5 Hodnoty vstupných parametrov

Použité vstupné parametre pre jednotlivé materiály sú uvedené v tabuľke 8.1 (objemová tiaž nad HPV γ_{unsat} , objemová tiaž nasýtenej zeminy γ_{sat} , efektívna súdržnosť c' , uhol vnútorného trenia φ' , koeficient hydraulického vodivosti nasýtenej zeminy vo vodorovnom smere k_x a v zvislom smere k_y) a v tabuľke 8.2 (deformačné parametre). Parametre tuhosti majú pri stabilitej analýze obmedzený vplyv, sú však dôležité pri deformačnej analýze. Model priehradnej hrádze (vrátane materiálových charakteristík) vodného diela bol prevzatý z Ústavu geotechniky FAST v Brne. Voľba konkrétnych vstupných parametrov na základe laboratórnych skúšok a inžiniersko-geologického prieskumu je odôvodnená v *Závěrečné zprávě k Posouzení vnější stability alternativního profilu hráze (VD Vlachovice)*^[23].

Tabuľka 8.1: Hodnoty vstupných parametrov – objemová tiaž, šmyková pevnosť, hydraulická vodivosť^[23]

ID	Funkčná časť	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	k_x [m/s]	k_y [m/s]
1	Teleso hrádze - netriedená súdržná zemina, íl piesčitéy <i>Nezlepšená zemina</i>	16,8	20	6,4	24	5,0E-07	5,0E-07
2	Komínový drén, vodorovné drenážne rebrá, drenážny koberec	16,8	20	10	24	1,5E-06	1,5E-06
3	Priepustný prísyp, stabilizačná päta	17	20	1	40	1,0E-03	1,0E-03
4		19	21	1	40	1,0E-03	1,0E-03
5	Tesniaca clona	25	25	-	-	1,0E-09	1,0E-09
A	Podložie - deluvio-fluviálne sedimenty	17	20	5	24	1,0E-07	1,0E-07
B	Podložie - pieskovce, ílovce, hĺbka menšia ako 15 m	18	20	1	28	1,0E-07	1,0E-07
C	Podložie - pieskovce, ílovce, hĺbka väčšia ako 15 m	18	20	-	-	1,0E-08	1,0E-08

Tabuľka 8.2: Hodnoty vstupných parametrov – deformačné parametre^[23]

ID	Funkčná časť	E_{50}^{ref} [MPa]	E_{50}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	m [-]	μ' / μ_{ur} [-]
1	Teleso hrádze - netriedená súdržná zemina, íl piesčitý <i>Nezlepšená zemina</i>	10	10	30	1,0	0,2
2	Komínový drén, vodorovné drenážne rebrá, drenážny koberec	70	56	210	0,5	0,2
3	Priepustný prísyp, stabilizačná päta	50	50	150	0,5	0,2
4		100	100	300	0,5	0,2
5	Tesniaca clona	50	-	-	-	0,2
A	Podložie - deluvio-fluviálne sediment	20	20	60	0,5	0,2
B	Podložie - pieskovce, ílovce, hĺbka menšia ako 15 m	75	-	-	-	0,25
C	Podložie - pieskovce, ílovce, hĺbka väčšia ako 15 m	75	-	-	-	0,25

8.1.6 Výpočtový model

Stabilitné posúdenie VD prebehlo ako rovinné deformačná úloha v jednom reze s najväčšou výškou hrádze (geometrické riešenie modelu pre LEM bolo prevzaté z podkladu [23], z tohoto podkladu vychádza aj prevzatý 2D MKP model). Boli použité 6-uzlové trojuholníkové prvky s kvadratickou aproximáciou posunutia vo vodorovnom a zvislom smere. Vytvorená sieť konečných prvkov bola zjemnená (zahustená) v oblastiach okolo drenážneho komína (vysoké hydraulické gradienty) a návodného a vzdušného svahu (aby bola eliminovaná závislosť výstupného stupňa stability na hustote diskretizácie, jedná sa o užívateľské nastavenie hustoty siete konečných prvkov, v jednotlivých oblastiach 2D modelu sa veľkosť konečných prvkov líši).

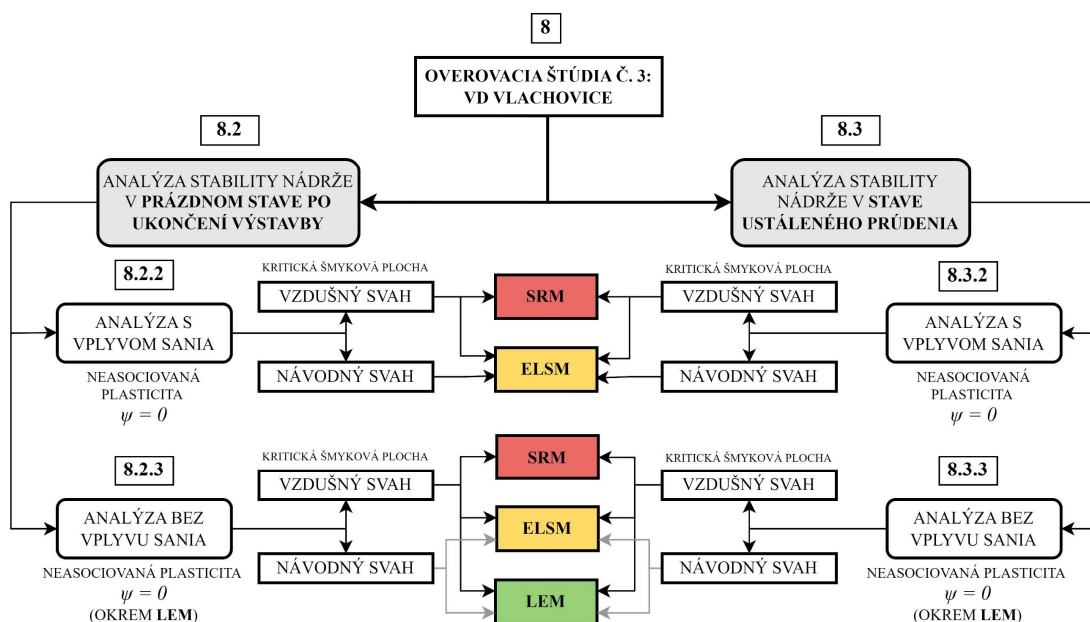
V práci boli analyzované dva zaťažovacie stavy z pôvodného posúdenia (modelu):

- ZS 1: *Nádrž po ukončení výstavby – dlhodobé podmienky, prázdna nádrž*
 - ukončená konsolidácia – odvodnená analýza
 - počiatočný stav HPV (348 m n. m.)
 - hydrostatické podmienky

- ZS 2: Nádrž s hladinou na úrovni zásobnej hladiny $H_z = 388$ m n. m.

- ukončená konsolidácia – odvodnená analýza
- ustálený (stacionárny) stav filtračných podmienok

Výpočty prebehnú v prípade metód ELSM a LEM samostatne pre návrhový a vzdušný svah. V SRM je možné získať vždy len jednu kritickú šmykovú plochu s najnižším stupňom stability. V prípade oboch zaťažovacích stavov bude skúmaný aj vplyv sania na stupeň stability a tvar šmykovej plochy. Vo výpočtoch metódami ELSM a SRM bolo uvažované s neasociovanou plasticitou ($\psi = 0$), v prípade LEM s asociovanou plasticitou (GEO 5). Pre LEM prebehli výpočty len vo variante bez uvažovaného vplyvu sania v nenasýtenej zóne na efektívnu napätosť.

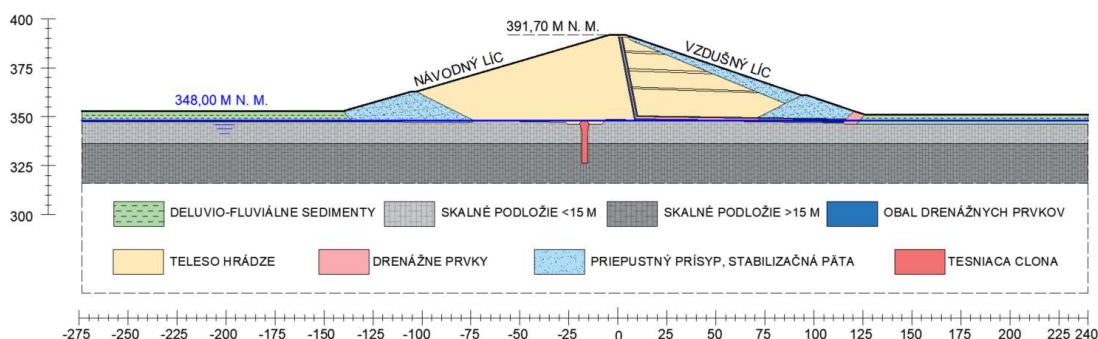


Obrázok 8.5: Schéma organizácie výpočtov v overovacej štúdií č. 3 v rámci posúdenia vonkajšej stability vodnej nádrže VD Vlachovice

8.2 Analýza stability nádrže v prázdnom stave po ukončení výstavby (ZS 1)

8.2.1 Úvodný komentár k riešenej úlohe

Výpočtový model pre tento zaťažovací stav bol zostavený podľa schematickeho zjednodušeného profilu znázorneného na obrázku 8.6.



Obrázok 8.6: Zjednodušenie profilu zemnej zonálnej hrádze pre výpočty a priradenie materiálov (ZS1, prázdna nádrž po dokončení výstavby)

Vo výpočtoch bolo uvažované s hladinou podzemnej vody na úrovni 348 m n. m. Stabilitná analýza pre tento zaťažovací stav prebehla vo variante "s" a "bez" uvažovaním vplyvu sania v nenasýtenej zóne na efektívnu napätosť, a teda aj na šmykovú pevnosť. Uvažovanie s vplyvom sania v nesaturovanej zóne povedie k zvýšeniu efektívneho napätia, čím sa zvýši aj stupeň bezpečnosti FoS . Predpokladá sa, že v tomto zaťažovacom stave bude časť kritickej šmykovej plochy prechádzať aj nenasýtenou zónou.

8.2.2 Analýza s vplyvom sania

Pre výpočet metódou SRM (Plaxis 2D, prevzatý model z FAST GTN^[23]) s vplyvom sania vzniká kritická šmyková plocha na vzdušnom svahu priehrady, ktorý má strmší sklon (1:3) v porovnaní s návodným svahom (1:3,5). Táto šmyková plocha zasahuje aj do saturovanej zóny a pod hladinu podzemnej vody. Stabilitu návodného svahu pomocou SRM nie je možné v tomto prípade stanoviť. Výsledky výpočtu sú uvedené v tabuľke 8.3, tvar šmykovej plochy je zrejмый z obrázku 8.7. V dôsledku malých oscilácií je uvedený interval FoS .

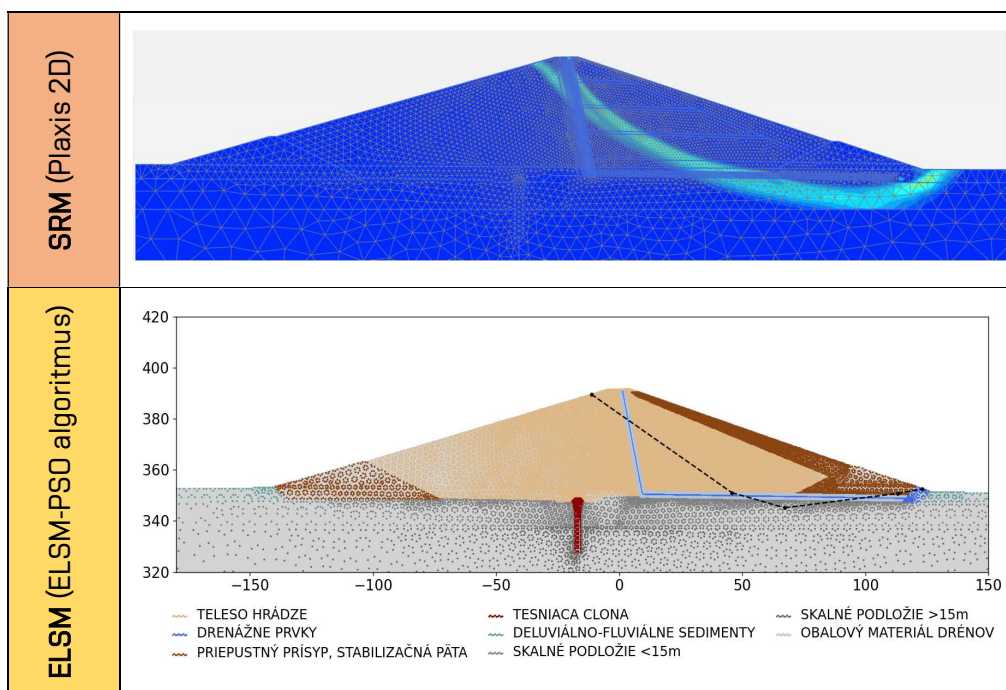
Tabuľka 8.3: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 1, s vplyvom sania)

VD Vlachovice	
SRM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
FoS (Návodný svah)	-
FoS (Vzdušný svah)	2,126 - 2,133

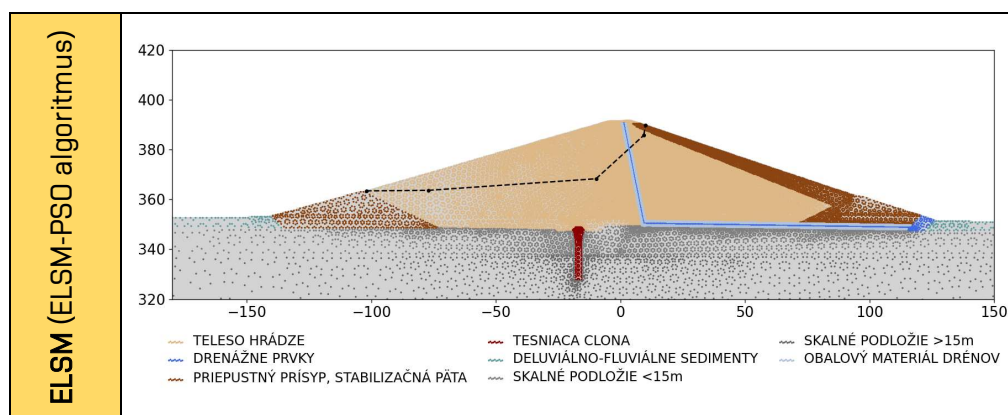
Metóda ELSM umožňuje analyzovať samostatne návodný a vzdušný svah priehrady, výsledky výpočtov sú uvedené v tabuľke 8.4. Tvar kritickej šmykovej plochy odpovedajúci danému stupňu stability je vykreslený na obrázku 8.7 pre vzdušný svah (porovnanie s tvarom z metódy SRM) a na obrázku 8.8 pre návodný svah.

Tabuľka 8.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)

VD Vlachovice	
ELSM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	2,419
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	2,139



Obrázok 8.7: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód SRM a ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)



Obrázok 8.8: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metódy ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)

Z výsledkov vyplýva dobrá zhoda oboch použitých metód (SRM a ELSM) v dosiahnutom stupni stability aj tvare kritickej šmykovej plochy pre vzdušný svah. Stupeň stability získaný ELSM je vyšší pre návodný svah s menším sklonom.

8.2.3 Analýza bez vplyvu sania

Vo variante "bez vplyvu sania" bola stabilita svahu analyzovaná metódami LEM, SRM a ELSM. Sanie v tomto prípade nezvyší efektívnu napätosť, predpokladal sa nižší dosiahnutý stupeň stability oproti predchádzajúcim výpočtom. Výsledky výpočtov prúžkovými metódami LEM (GEO5 – Stabilita svahu^[W4], použité metódy^[30] podľa Sarmu, Spencera, Janbu a Morgenstern-Pricea) sú uvedené v tabuľke 8.5. Zistená kritická šmyková plocha je vykreslená na obrázku 8.9 pre návodný svah a na obrázku 8.10 pre vzdušný svah.

Tabuľka 8.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metód LEM (ZS 1, bez vplyvu sania)

VD Vlachovice				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i> (Návodný líc)	1,84	1,84	1,84	1,83
<i>FoS</i> (Vzdušný líc)	1,82	1,82	1,81	1,81

Pri SRM analýze sa kritická šmyková plocha opäť nachádzala na vzdušnom svahu (tabuľka 8.6, obrázok 8.10).

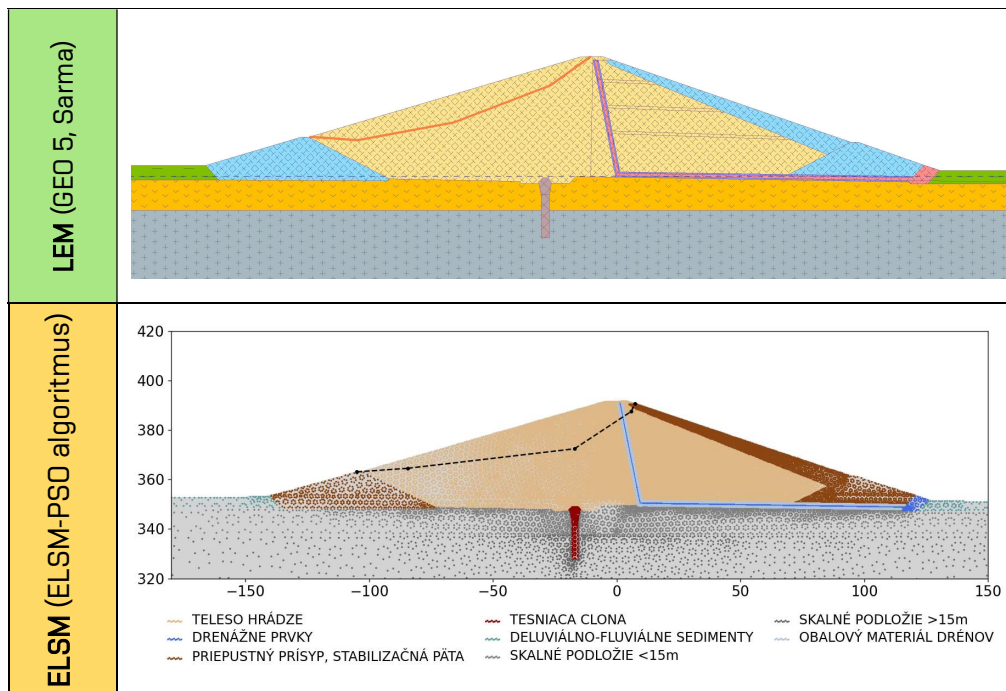
Tabuľka 8.6: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 1, bez vplyvu sania)

VD Vlachovice	
SRM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	-
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	1,735 - 1,742

Zhrnutie výpočtov metódou ELSM je možné nájsť v tabuľke 8.7. Analýza stability prebehla samostatne pre návodný svah (obrázok 8.9) a vzdušný svah (obrázok 8.10).

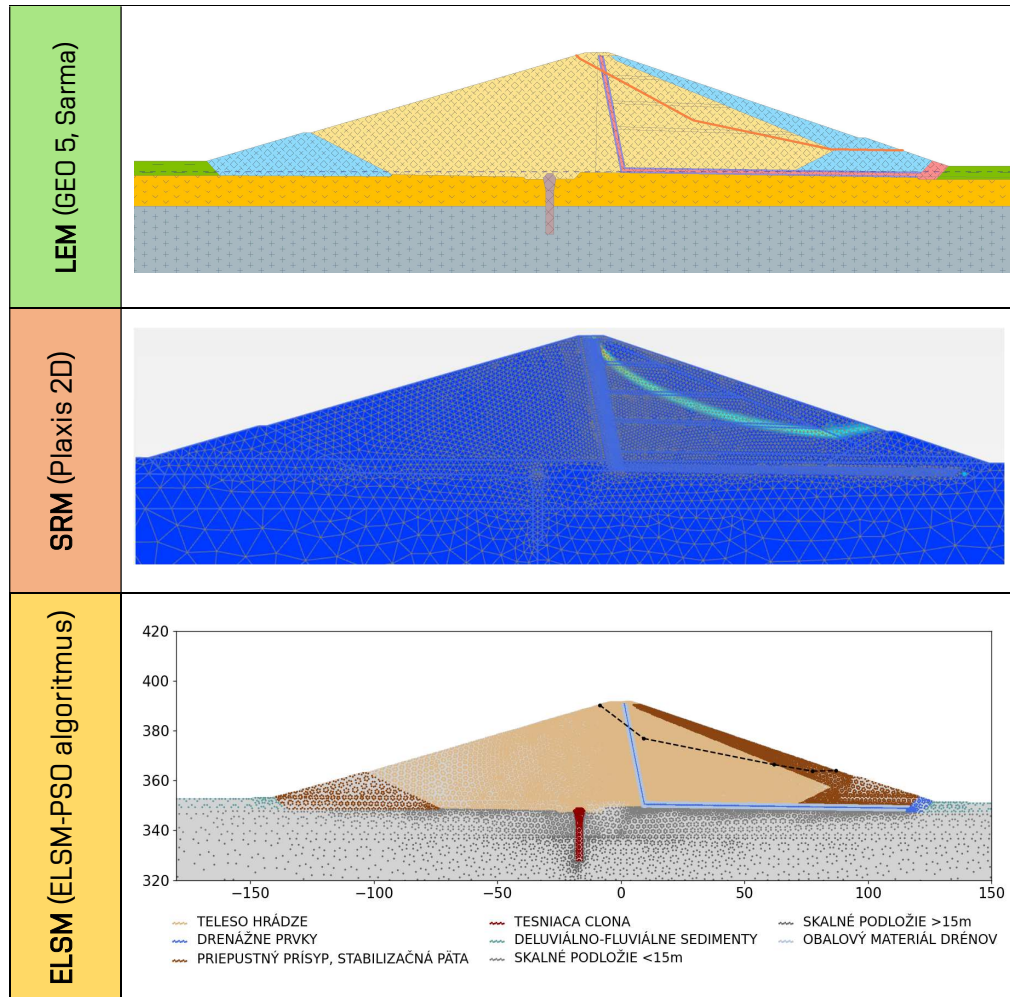
Tabuľka 8.7: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)

VD Vlachovice	
ELSM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	1,818
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	1,798



Obrázok 8.9: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM, SRM a ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)

Kritická šmyková plocha je bez uvažovaného vplyvu sania plytšia, túto úvahu potvrdili výsledky výpočtov všetkými tromi použitými metódami. Stupeň bezpečnosti bez uvažovaného vplyvu sania je teda nižší^[23]. Potvrďuje sa trend z predchádzajúcich dvoch overovacích štúdií, kde je najnižší stupeň stability dosiahnutý pri metóde SRM, nasleduje ELSM a najmenej konzervatívne sú metódy LEM. Výsledky z LEM aj ELSM predikujú nepatrne vyššiu hodnotu stupňa bezpečnosti na menej strmom návodnom svahu.

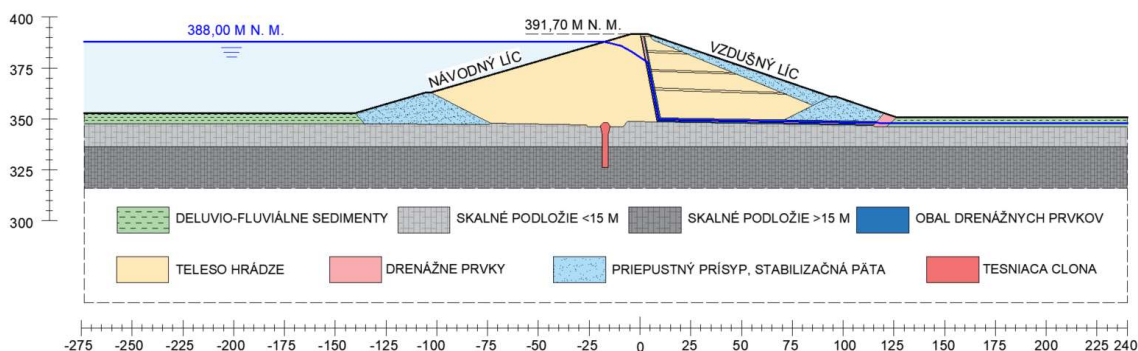


Obrázok 8.10: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM a ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)

8.3 Analýza stability nádrže v stave ustáleného prúdenia (ZS 2)

8.3.1 Úvodný komentár k riešenej úlohe

Výpočty pre zaťažovací stav ZS 2 prebehli s použitím zjednodušeného profilu hrádze, ktorého schéma je uvedená na obrázku 8.11.



Obrázok 8.11: Zjednodušenie profilu zemnej zonálnej hrádze pre výpočty a priradenie materiálov (ZS 2, ustálené prúdenie)

V uvedenom zaťažovacom stave bolo s hladinou zásobnej vody v nádrži uvažované na úrovni 388 m n. m., pred samotným priehradným teleso zostala HPV na pôvodnej úrovni 348 m n. m. V priehradnej hrádzi je stav filtračných podmienok ustálený. Výpočty prebehli vo variante "so saním" a "bez sania".

8.3.2 Analýza s vplyvom sania

Výsledky výpočtov stability svahu metódami SRM a ELSM sú uvedené v tabuľkách 8.8 a 8.9. V prípade SRM vznikla kritická šmyková plocha opäť na vzdušnom svahu priehrady (obrázok 8.12), stabilitu návodného svahu nebolo možné touto metódou stanoviť.

Tabuľka 8.8: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 2, s vplyvom sania)

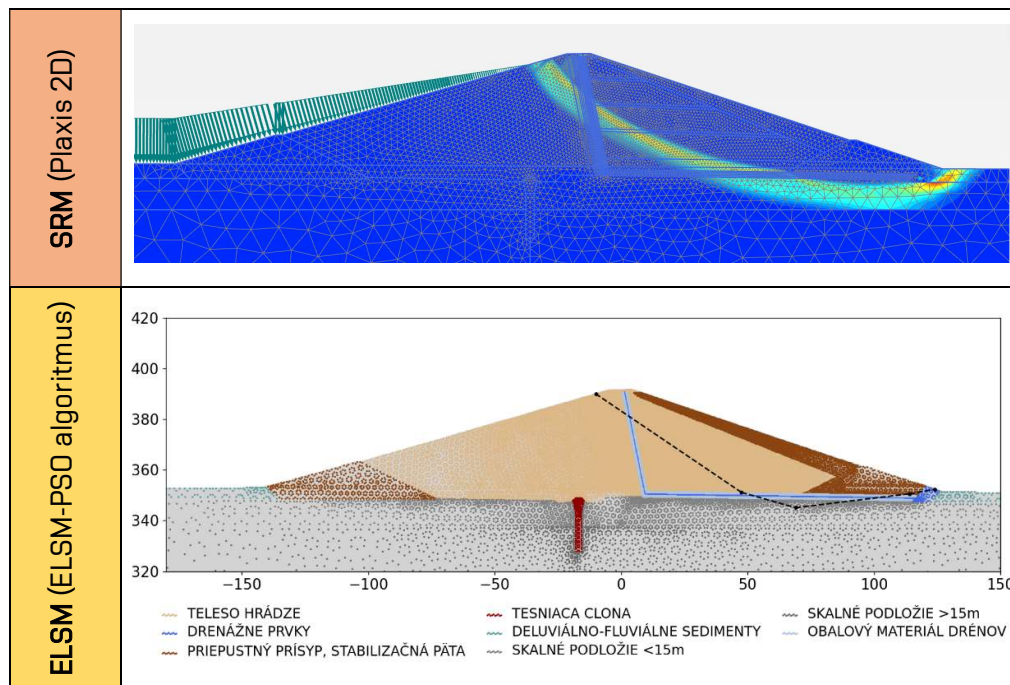
VD Vlachovice	
SRM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	-
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	2,002 - 2,007

Metóda ELSM umožnila vyšetrovať stupeň bezpečnosti (tabuľka 8.9) samostatne na a vzdušnom (obrázok 8.12) a návodnom svahu (obrázok 8.13).

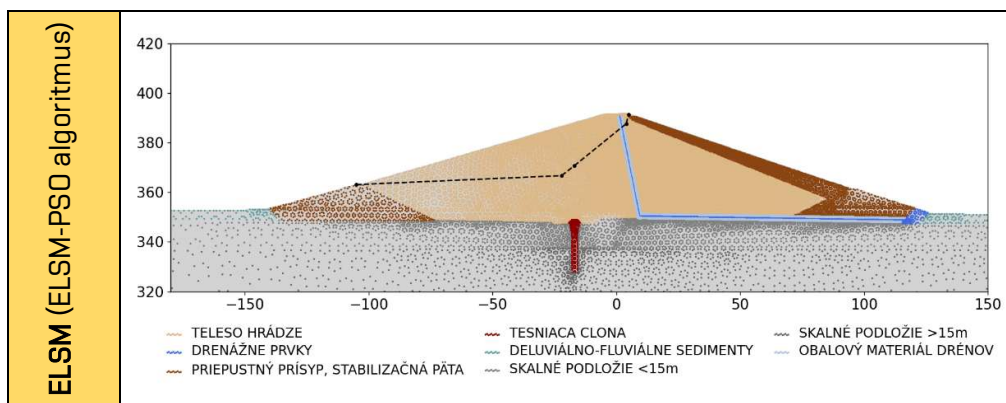
Tabuľka 8.9: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)

VD Vlachovice	
ELSM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	2,278
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	2,006

Z porovnania výsledkov vyplýva veľmi dobrá zhoda stupňa stability získaného z oboch metód pre vzdušný svah. Bezpečnosť návodného svahu je aj v tomto prípade v porovnaní so svahom vzdušným vyššia. Tvar kritických šmykových plôch sa zásadne nelíši od tvaru získaného zo ZS1.



Obrázok 8.12: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód SRM a ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)



Obrázok 8.13: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metódy ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)

8.3.3 Analýza bez vplyvu sania

Analýza pre ZS2 "bez vplyvu sania" prebehla pre všetky 3 v práci zakomponované metódy (LEM, SRM aj ELSM). Výsledky výpočtov pre LEM sa nachádzajú v tabuľke 8.10.

Tabuľka 8.10: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (ZS 2, bez vplyvu sania)

VD Vlachovice				
LEM	Metóda výpočtu			
	Sarma	Spencer	Janbu	Morgenstern - Price
<i>FoS</i> (Návodný líc)	1,98	1,98	1,97	1,96
<i>FoS</i> (Vzdušný líc)	1,84	1,85	1,85	1,85

Aj v tomto prípade sa pri SRM nachádza kritická šmyková plocha na vzdušnom svahu priehradnej hrádze (tabuľka 8.11, obrázok 8.15).

Tabuľka 8.11: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 2, bez vplyvu sania)

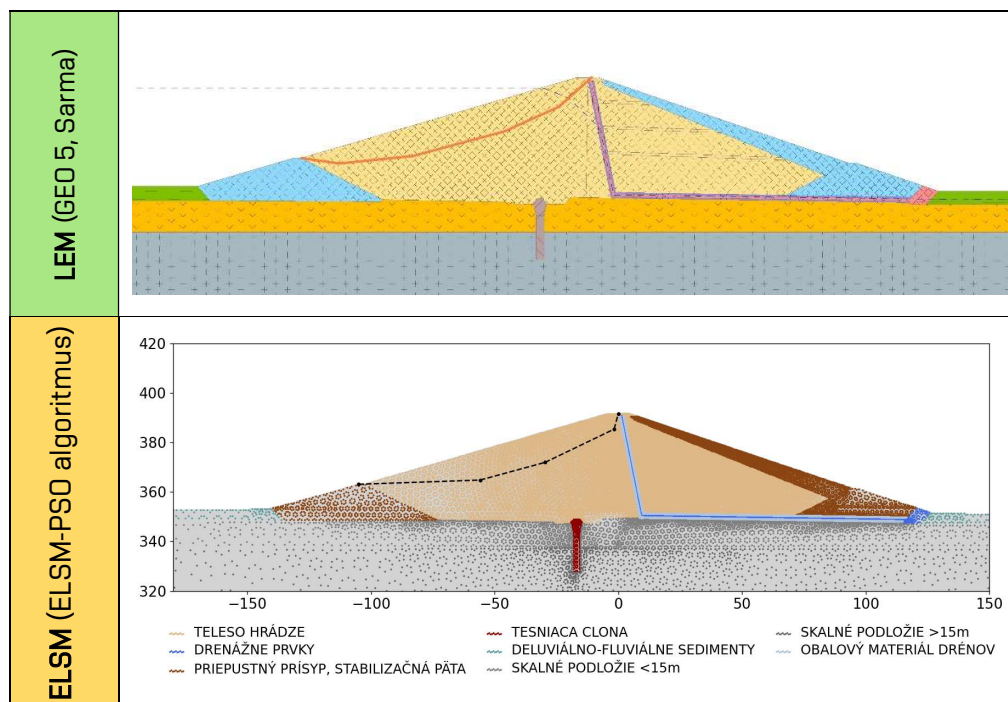
VD Vlachovice	
SRM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	-
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	1,738 - 1,746

Posledný výpočet pomocou ELSM uzatvára výpočtovú časť tretej overovacej štúdie (tabuľka 8.12). Je predikovaný vyšší stupeň bezpečnosti na návodnom svahu v porovnaní so vzdušným svahom, podobne ako v prípade LEM (tabuľka 8.10). Kritické šmykové plochy pre všetky uvedené výpočty sú vykreslené samostatne pre návodný (obrázok 8.14) a vzdušný svah (obrázok 8.15).

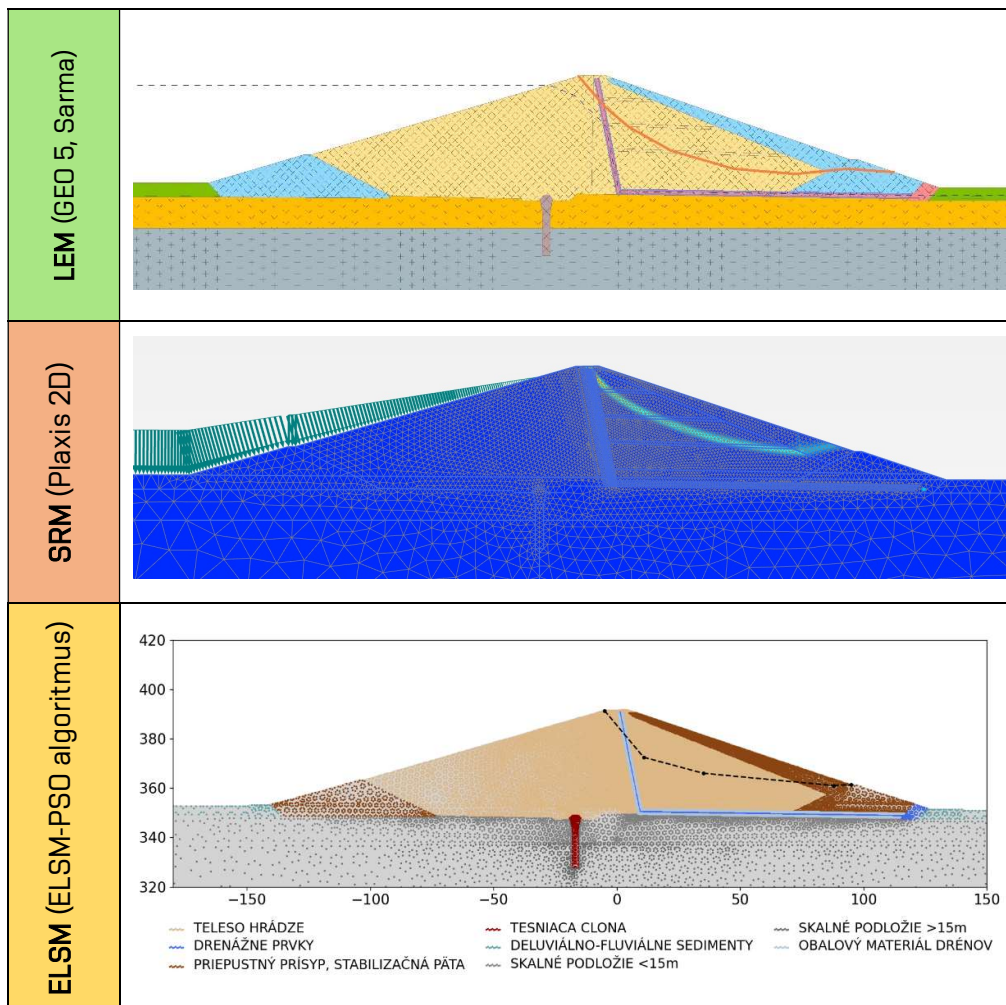
Tabuľka 8.12: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)

VD Vlachovice	
ELSM	Hustota siete KP
	Užívateľské nastavenie
<i>FoS</i> (Návodný svah)	2,089
<i>FoS</i> (Vzdušný svah)	1,752

V tomto prípade je stupeň bezpečnosti predikovaný ELSM oproti LEM vyšší. Tvary kritických šmykových plôch na návodnom i vzdušnom líci sú len veľmi málo odlišné oproti tvarom z analýzy prázdnej nádrže po ukončení výstavby (ZS1) vo variante "bez sania".



Obrázok 8.14: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM a ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)



Obrázok 8.15: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM, SRM a ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)

8.4 Vyhodnotenie výsledkov

Závěrečná štúdia bola zameraná na porovnanie ELSM s SRM a LEM na reálnej okrajovej úlohe. Výpočty (SRM a ELSM) vychádzali z 2D MKP modelu^[23] VD Vlachovice, ktorý bol zostavený na Ústave geotechniky FAST v Brne v softvéri Plaxis 2D. Porovnávané boli výsledky stabilitej analýzy pri prázdnej nádrži po dokončení výstavby a v stave ustáleného prúdenia po naplnení nádrže. V modeloch pre SRM a ELSM bolo uvažované s neasociovanou plasticitou ($\psi = 0$), pre LEM s asociovanou plasticitou ($\psi = \varphi'$). Keďže sa jedná o zemnú vodnú nádrž, v každom zaťažovacom stave prebehli výpočty "s" a "bez" uvažovaním vplyvu sania v nenasýtenej zóne na efektívnu napätosť (pre LEM len bez vplyvu sania).

V prípade výpočtov metódou SRM vznikla kritická šmyková plocha vždy na vzdušnom líci, toto zistenie je v súlade s posúdením^[23] ústavu GTN VUT FAST v Brne, kde je výskyt kritickéj šmykovej plochy na návodnom svahu predikovaný len v prípade havarijného prázdnenia nádrže, tento zaťažovací stav v práci riešený nebol.

Z overovacej štúdie vyplýva dobrá zhoda medzi výsledkami jednotlivých metód. Stupne bezpečnosti sú pre analýzy bez uvažovaného vplyvu sania na efektívnu napätosť podľa predpokladu nižšie a kritické šmykové plochy plytšie. Najnižší stupeň bezpečnosti pri posúdení bez vplyvu sania predikuje metóda SRM, menej konzervatívne sú ELSM a LEM. Ak je zahrnutý vplyv sania do analýz, ELSM vykazuje nepatrne vyšší stupeň bezpečnosti oproti SRM.

Pre výpočty s použitím jednotlivých metód boli vykreslené získané kritické šmykové plochy, ktoré sú v dostatočnej vzájomnej zhode a odchýlky sú veľmi mierne.

9 ZÁVER

V úvodnej teoretickej časti práce boli objasnené základné princípy bežne používaných metód výpočtu stability svahu (LEM, SRM). Následne bola predstavená metóda ELSM, pri ktorej bol popísaný postup generovania skúšobnej šmykovej plochy a princíp stanovenia stupňa bezpečnosti pre kritickú šmykovú plochu a vplyv najdôležitejších činiteľov na výpočet. Ďalšia kapitola sa zaoberala stručným popisom optimalizačného algoritmu pomocou roja častíc (PSO). V teoretickej časti práce je možné nájsť stručný a výstižný popis mechanizmov aplikovaných v praktickej časti.

V piatej kapitole bol čitateľovi vysvetlený základný princíp naprogramovaného algoritmu pre výpočet stability svahu pomocou metódy ELSM s využitím optimalizačného modulu PSO od importu dát cez generovanie a diskretizáciu šmykovej plochy, stanovenie stavu napätosti a integráciu lokálnych zložiek napätosti na šmykovej ploche až po nájdenie a vyčíslenie kritického stupňa bezpečnosti.

Overenie správnosti fungovania algoritmu a porovnanie s metódami SRM a LEM prebehlo na troch overovacích štúdiách.

Prvá overovacia štúdia porovnávala všetky tri metódy výpočtu stability svahu na jednoduchom homogénnom svahu. Výpočty prebehli pre dve rôzne sady parametrov šmykovej pevnosti, pričom jedna predikovala výsledok na hranici straty stability svahu a druhá výpočtu vyhovela s dostatočnou rezervou. V prípade ELSM bol skúmaný vplyv hustoty siete konečných prvkov na stupeň stability pri skúšobnej (neoptimalizovanej) šmykovej ploche (pri rôznom nastavení diskretizácie) a pri kritickej (optimalizovanej) šmykovej ploche, vrátane porovnania výsledku s dostupnými metódami. Z výsledkov vyplýva, že pri oboch skúmaných sadoch parametrov šmykovej pevnosti a neasociovej plasticite ($\psi = 0$) stupeň bezpečnosti s rastúcou hustotou siete konečných prvkov klesá, no vytvorený ELSM-PSO algoritmus je na zmenu hustoty siete menej citlivý ako SRM (výpočet v Plaxis 2D). Zisťovaný bol aj vplyv pomeru uhlu dilatancie ψ a efektívneho uhlu vnútorného trenia φ' na stupeň stability v SRM a ELSM (Davis), ktorý so znižujúcim sa pomerom týchto dvoch uhlov podľa predpokladu klesá. Pri neasociovej plasticite s $\psi = 0$ predikuje ekvivalentný MC model (Davisov prístup, $\beta = \beta_0 = \beta_{failure}$) zakomponovaný v ELSM-PSO algoritme konzervatívnejší stupeň bezpečnosti oproti SRM analýze z dôvodu značnej redukcie parametrov šmykovej pevnosti.

Prvá overovacia štúdia obsahovala aj porovnanie dosiahnutého minimálneho stupňa bezpečnosti a konvergenciu výpočtu pri základných variantoch LBEST a GBEST optimalizačného algoritmu PSO pre menej priaznivú sadu šmykových vlastností. Prístup GBEST sa ukázal byť vhodnejší pre lokalizáciu kritickej šmykovej plochy v modeli pri optimalizácií bez upresnenia polohy šmykovej plochy, LBEST dosahoval relatívne stabilné výsledky po fixácií šmykovej plochy v päte svahu a pri zvýšenom počte iterácií.

V druhej overovacej štúdií bol riešený heterogénny svah s jednoduchým horizontálnym materiálovým rozhraním. V tomto prípade bola zachovaná väčšina trendov a vzťahov medzi výsledkami v porovnaní s predchádzajúcou štúdiou.

Cieľom tretej overovacej štúdie bola aplikácia algoritmu ELSM-PSO na reálnu okrajovú úlohu, ktorou bolo posúdenie vonkajšej stability navrhovaného vodného diela Vlachovice (vo vybraných zaťažovacích stavoch) a porovnanie výsledkov s metódami LEM a SRM. Algoritmus ELSM-PSO umožnil stanoviť samostatne stabilitu návodného a vzdušného svahu pre prázdnu nádrž po ukončení výstavby a nádrž s hladinou na úrovni zásobnej hladiny vo variantoch "s" a "bez" uvažovaním vplyvu sania v nenasýtenej zóne na efektívnu napätosť s dostatočnou zhodou stupňa bezpečnosti s porovnávanými metódami.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

Bibliografické odkazy z knižnej literatúry:

- [1] HULLA J., TURČEK P. *Zakladanie stavieb*. Jaga Group. 2004. 350 s. ISBN 978-8-0807-6023-6
- [2] LIU S. Y., SHAO L. T., LI H. J. *Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods*. Computers and Geotechnics, 2015. 63 s. 291-298.
- [3] FREDLUND Delwyn G., SCOULAR R. E. G. *Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis*. In: Int. Symp. on Slope Stability Engineering, Matsuyama, Shikoku, Japan. 1999. s. 31-47.
- [4] KRAHN John, LAM Leonard, FREDLUND D. G. *The use of finite element computed pore-water pressures in a slope stability analysis*. Rotterdam: Balkema, 1996. 2: 1277-1282.
- [5] CHENG Yung Ming, et al. *Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two-dimensional slope stability analysis*. Computers and Geotechnics. 2007. 34.2: 92-103.
- [6] LI Hongjun, et al. *Particle swarm optimization algorithm coupled with finite element limit equilibrium method for geotechnical practices*. Mathematical Problems in Engineering. 2012.
- [7] GRECO V. *Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface*. J Geotech Eng. 1996. 122(7):517–25.
- [8] MALKAWI A., HASSAN W., SARMA S. *Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques*. J Geotech Geoenviron Eng. 2001. 127(8):688–98.
- [9] ZOLFAGHARI A. R., HEATH A. C., MCCOMBIE P.F. *Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis*. Comput Geotech. 2005. 32(3):139–52.
- [10] CHENG Y. M., LI L., CHI S. C., WEI W. B. *Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two-dimensional slope stability analysis*. Comput Geotech. 2007. 34(2):92–103.
- [11] ZHENG H., SUN G., LIU D. *A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique*. Comput Geotech. 2009. 36(1–2):1–5.

- [12] KENNEDY J., EBERHART R. *Particle swarm optimization*. In: Proceedings of IEEE international conference on neural networks. Perth, Australia. 1995. s. 1942–8.
- [13] KOUDELA Pavel. *Stanovení hodnot vstupních parametrů pokročilých materiálových modelů s využitím optimalizačních metod*. Brno, 2018, 127 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce: Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
- [14] EBERHART R., KENNEDY J. *A new optimizer using particle swarm theory*. In MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. s. 39–43. Piscataway, NJ. 1995. IEEE. doi: 10.1109/MHS.1995.494215. Dostupné z: ISBN 0-7803-2676-8.
- [15] EBERHART R., SHI Y. *Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization*. In Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512). s. 84–88. La Jolla, CA, USA. 2000. IEEE. doi:10.1109/CEC.2000.870279. Dostupné z: ISBN 0-7803-6375-2.
- [16] ALDORF Josef, HRUBEŠOVÁ Eva, ĎURIŠ Lukáš, VOJTASÍK Karel. *Aplikace metody LHS při statickém a stabilitním řešení ostění tunelu Valík*. In: Zborník 6. mezinárodnej geotechnickej konferencie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2003. s. 256-272. ISBN 80-227-1890-4.
- [17] SARMA S. K.: *Stability analysis of embankments and slopes*. Géotechnique 23. 1973. 423-433.
- [18] ZIENKIEWICZ O. C., HUMPHESON C., LEWIS R. W. *Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics*. Géotechnique. 1975. 1975:25(4):671–89.
- [19] MATSUI T., SAN K. C. *Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique*. Soils Found. 1992. 32(1):59–70
- [20] GRIFFITHS D. V., LANE P. A. *Slope Stability Analysis by Finite Elements*, Geotechnique 49(3). 1999. 387-403
- [21] FREDLUND D. G., SCOULAR R., ZAKERZADEH N. *Using a finite element stress analysis to compute the factor of safety*. In: Proceedings of the 52nd Canadian geotechnical conference. Regina, Saskatchewan. 1999.
- [22] NOVÁK J. *Možnosti alternativního použití materiálů do hráze vodního díla Vlachovice*. Brno, 2021. 91 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.
- [23] CHALMOVSKÝ J., MIČA L. *Vlára, Vodní dílo Vlachovice, posouzení vnější stability alternativního profilu hráze*. Brno, 2020. 31 s. Ústav geotechniky, FAST VUT v Brně

- [24] SG GEOTECHNIKA a.s. *Vlára, Vodní dílo Vlachovice, předprojektová příprava, IG průzkum*. Celek 4 – Průzkumy nalezišť materiálů, Předběžný IG průzkum. Praha, 2020.
- [25] AQUATIS, a.s. *Vlára, vodní dílo Vlachovice. Technicko-ekonomická studie*. Brno, 2015.
- [26] ŘÍHA J., KOTAŠKA S. a MEZERA J. *VD Vlachovice. Technická pomoc*. Možnosti alternativního použití materiálů do hráze. Brno, 2020.
- [27] POVODÍ MORAVY, s. p. *Vlára, Vodní dílo Vlachovice, související veřejná infrastruktura - Celek 08 a 09 - kanalizace - DSP, DPS a související činnosti*. Brno, 2022.
- [28] LÍŠKOVÁ I. *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.
- [29] HANUSOVÁ K. *Věty o střední hodnotě*. V Brně dne: 25. 4. 2022, 42 s., Masarykova univerzita, Ústav matematiky a statistiky, Vedoucí práce: doc. RNDr. Michal Veselý, Ph.D., RNDr. Jan Vondra, Ph.D.
- [30] SITI NOORLIYANA MOHD P., NORFARAH NADIA I., AHMAD BUKHARI R. *Comparison on Factor of Safety using Different Method of Analysis for Slope Stability*. 1Department of Civil Engineering, International Islamic University Malaysia, 53100 Kuala Lumpur, Malaysia. JAEDS, Volume 1, Issue 1 (September 2021). eISSN 2805-5756.
- [31] TSCHUCHNIGG F., SCHWEIGER H. F., SLOAN S. W. *Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity*. Computers and Geotechnics 70. 2015. 169–177
- [32] XI Chen, YANNAN Lyu, DONGYONG Wang. *A Modified Davis Approach for Geotechnical Stability Analysis Involving Non-Associated Soil Plasticity*. Géotechnique 70(12). 2019. DOI:10.1680/jgeot.18.p.158
- [33] ZHENG H., THAM L. G., LIU D. *On two definitions of the factor of safety commonly used in the finite element slope stability analysis*. Comput Geotech. 2006. 33(3):188–95.
- [34] PHAM H. T. V., FREDLUND D. G. *The application of dynamic programming to slope stability analysis*. Can Geotech J. 2003. 40(4):830–47.
- [35] KIM J. Y., LEE S. R. *An improved search strategy for the critical slip surface using finite element stress fields*. Comput Geotech. 1997. 21(4):295–313.
- [36] SHAO L., TANG H., HAN G. *Finite element method for slope stability analysis with its applications*. Chinese J Comput Mech. 2001. 18(1):81–7

- [37] ZHENG H., LIU D. F., LI C. G. *Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method*. Int J Numer Meth Eng. 2005. 64(14):1871–88.
- [38] CHENG Y. M., LANSIVAARA T., WEI W. B. *Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods*. Comput Geotech. 2007. 34(3):137-50.
- [39] DELAUNAY B. *Sur la sphère vide*. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. 1934. 6: 793–800.
- [41] SPENCER E. *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces*. Géotechnique. 1967. 17(1): 11-26.
- [42] JANBU N. *Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis*. European Conference on Stability Analysis, Stockholm, Sweden. 1954.
- [43] JANBU N. *Slope Stability Computations*. Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, eds., John Wiley and Sons, New York, pp 47-86. 1973.
- [44] MORGENSTERN N. R., PRICE V. E. *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, 15(1): 79-93. 1965.
- [45] MORGENSTERN N. R., PRICE V. E. 1967. *A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces*. Computer Journal, 9. 1967. 388-393.
- [46] ZHU D. Y., LEE C. F., QIAN Q. H., CHEN G. R. *A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method*. Canadian Geotechnical Journal, 42(1). 2005. 272-278.
- [47] SAZZAD M., RAHMAN F., AL MAMUM A. *Mesh Effect on the FEM Based Stability Analysis of Slope*. Department of Civil Engineering DUET - Gazipur, Bangladesh. 2015. ISBN: 978-984-91467-9-7.
- [48] HARABINOVÁ S., KOTRASOVÁ K., KORMANÍKOVÁ E., HEGEDŮSOVÁ E. *Analysis of slope stability*. Sciendo. 2021. Civil and Environmental Engineering Vol. 17, Issue 1, 192-199, DOI: 10.2478/cee-2021-0020
- [49] ISRAR KHAN M., WANG S. *Comparing the various slope stability methods to find the optimum method for calculating factor of slope safety*. Materials & Corrosion Engineering Management. 2020. DOI: <http://doi.org/10.26480/macem.01.2020.06.09>
- [50] ENGELBRECHT A. P. *Computational Intelligence: An Introduction, Second Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. 2007.
- [51] LI Liang, CHU Xue-Song. *An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmony Strategy for the Location of Critical Slip Surface of Slopes*. China Ocean Eng., Vol. 25, No. 2, pp. 357 – 364. 2011. DOI 10.1007/s13344-011-0030-9, ISSN 0890-5487.
- [52] HIMANSCHU N., BURMAN A., KUMAR V. *Assessment of Optimum Location of Non-circular Failure Surface in Soil Slope Using Unified Particle Swarm Optimization*. Springer Nature, Geotech Geol Eng. 2020.

[53] JELLALI Belgacem, FRIKHA Wissem. *Constrained Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Slope Stability*. International Journal of Geomechanics. 2017.

[54] ZHOU C., SHEN Z., XU L., SUN Y., ZHANG W., ZHANG H., PENG J. *Global Sensitivity Analysis Method for Embankment Dam Slope Stability Considering Seepage–Stress Coupling under Changing Reservoir Water Levels*. Mathematics 2023, 11, 2836. <https://doi.org/10.3390/math11132836>

[55] VERMEER P. A., DE BORST R. *Non-associated plasticity for soils, concrete and rock*. HERON, vol. 29. 1984.

[56] CHALMOVSKÝ J. *Úvod do plastického chování geomateriálů*. **Neveřejný (!)** výukový materiál. Prezentace prezentována v březnu 2022 na VUT FAST v rámci předmětu BF054 Aplikace inženýrských úloh v geotechnice. Brno, 2022.

Použité internetové zdroje:

[W1] ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. *Geovědná mapa ČR (1:50 000)* [2023] [online]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

[W2] MIDAS IT Co., Ltd. *Midax NX - Analysis reference – Chapter – 5 Algorithm* [2023] [online]. Dostupné z: <https://globalsupport.midasuser.com/helpdesk/KB/Category/433701-tutorials-and-technical-documents>

[W3] GEO-SLOPE INTERNATIONAL Ltd. *Stability modeling with Geostudio* [2023] [online]. Dostupné z: <https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/SLOPE%20Modeling.pdf>

[W4] FINE spol. s r.o. *GE05 Software online help – Learning – Slope stability* [2023] [online]. Dostupné z: <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/cs/stabilita-svahu-01/>

[W5] BENTLEY SYSTEMS, Incorporated *Plaxis 2D: Effect of suction on soil strength, compressibility and slope stability* [2023] [online]. Dostupné z: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/66275/effect-of-suction-on-soil-strength-compressibility-and-slope-stability>

[W6] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Svahové deformace - výukové multimediální texty – Modelování stability svahu*. [2024] [online]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/svadef/>

[W7] WIKIPEDIA. *Delaunay triangulation* [2023] [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation

[W8] DEEP EXCAVATION LLC. *Effect of mesh density on finite element-based slope stability analysis* [2023] [online]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/effect-mesh-density-finite-element-based-slope-stability/>

[W9] MIDAS GEOTECH. *Comprehensive Slope Stability Analysis and Design (LEM vs FEM)* [2023] [online]. Dostupné z: <https://www.midasgeotech.com/blog/slope-stability-analysis-and-design>

[W10] BENTLEY SYSTEMS. *PLAXIS 2D-Reference Manual*. [2024] [online]. Dostupné z: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-8/3113.PLAXIS2DCE_2D00_V20.02_2D00_2_2D00_Reference.pdf

[W11] PAPYRUS, BENTSEN Claus. *Package 'PSO'*. [2024] [online]. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/ps0/ps0.pdf>

Použité normy:

[N1] ČSN EN 1997-2. *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N2] ČSN 75 2410. *Malé vodní nádrže*. 04/2011

[N3] ČSN EN ISO 14688-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*. 04/2018. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.



ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

τ_i	šmykové napätie
FoS	stupeň bezpečnosti
σ'_i	efektívne normálové napätie
c'	kohézia (súdržnosť)
φ'	efektívny uhol vnútorného trenia
N_i	normálová sila na úseku šmykovej plochy
T_i	šmyková sila na úseku šmykovej plochy
E_i	normálová sila medzi blokmi (prúžkami) zeminy
X_i	šmyková sila medzi blokmi (prúžkami) zeminy
z_i	hodnota, ktorá určuje pôsobisko sily E_i
l_i	hodnota, ktorá určuje pôsobisko sily N_i
W_i	tiaž bloku (prúžku) vo vybranej prúžkovej metóde
v_i^{t+1}	rýchlosť častice v nasledujúcej iterácií
v_i^t	rýchlosť častice v aktuálnej iterácií
x_i^{t+1}	pozícia častice v nasledujúcej iterácií
x_i^t	pozícia častice v aktuálnej iterácií
ϵ_1 a ϵ_2	vektory náhodných čísel
p_i	najlepšia osobná pozícia častice
g^*	najlepšia globálna pozícia častice

c_1, c_2	akceleračné konštanty (kognitívna a sociálna)
\odot	vektorové násobenie
t	číslo iterácie
p_i	najlepšia osobná pozícia častice
v_i	počiatočná vygenerovaná rýchlosť častíc
$f(x_i)$	účelová funkcia PSO
SRF	koeficient redukcie parametrov (šmykovej) pevnosti (Strenght Reduction Factor)
τ_{f_i}	šmyková pevnosť materiálu
τ_{m_i}	mobilizované šmykové napätie
ΔL_i	dĺžka segmentu šmykovej plochy
ω	koeficient zotrvačnosti (<i>inertia weight</i>), ktorý ovplyvňuje, do akej miery si častice zachovávajú svoju smer a rýchlosť z predchádzajúcej iterácie
ω_{damp}	koeficient tlmenia váhy zotrvačnosti (<i>inertia damping</i>), pomáha postupne znižovať váhu zotrvačnosti (ω) v priebehu optimalizácie (hodnota 1 znamená, že zotrvačnosť sa nemení)
μ	Poissonovo číslo
ψ	uhol dilatancie
β	súčiniteľ prevodu parametrov šmykovej pevnosti do ekvivalentného plastického modelu (Davisov princíp)
$[v]_n, [v]_t$	zložky rýchlostí (Davisov princíp)



$\bar{\varphi}_i$	priemerná hodnota uhlu vnútorného trenia na deliacej rovine
\bar{c}_i	priemerná hodnota súdržnosti na deliacej rovine
rx_i, ry_i	ramená síl FX_i a FY_i
p_{water}	pórový tlak vody
p_a	pórový tlak vzduchu
S_{eff}	efektívny stupeň saturácie
S	stupeň saturácie
S_{res}	reziduálny stupeň saturácie
β_0	súčiniteľ prevodu parametrov šmykovej pevnosti do ekvivalentného plastického modelu (Davisov princíp) na začiatku výpočtu
$\beta_{failure}$	súčiniteľ prevodu parametrov šmykovej pevnosti do ekvivalentného plastického modelu (Davisov princíp) v bode zlyhania
KP	konečné prvky
E_{oed}^{ref}	dotýčnicový edometrický modul platný pre $\sigma'_1 = p_{ref}$
E_{50}^{ref}	sečnicový modul z triaxiálnej skúšky platný pre $\sigma'_3 = p_{ref}$
E_{ur}^{ref}	modul pružnosti pri odľahčení – opätovnom pritažení pre $\sigma'_3 = p_{ref}$
μ_{ur}	Poissonovo číslo pri odľahčení – opätovnom pritažení
p	referenčné napätie

m	(power) určuje závislost tuhosti na napětí, hodnota 1 znamená lineární závislost tuhosti na napětí, hodnota 0 pro žádnou závislost tuhosti na napětí
k_x	koeficient hydraulické vodivosti nasýtené zeminy ve vodorovném směru
k_y	koeficient hydraulické vodivosti nasýtené zeminy v zvislém směru
γ_{unsat}	objemová tíž (nesaturované) zeminy nad HPV
γ_{sat}	objemová tíž (saturované) nasýtené zeminy
E	Youngův modul pružnosti

ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

Obrázok 2.1: Statická schéma bloku pre polygonálnu šmykovú plochu (upravené z [W4])	17
Obrázok 2.2: Schémy pôsobiacich síl medzi jednotlivými prúžkami pre metódy Sarma v časti obrázku [1], Spencer, Janbu a Morgenstern-Price v časti obrázku [2] (oba obrázky upravené z [W4])	18
Obrázok 3.1: Generovaná skúšobná šmyková plocha (upravené z [10])	26
Obrázok 3.2: Diskretizácia šmykovej plochy (plný kruh – primárne riadiace body, prázdny kruh – sekundárne riadiace body, upravené z [2])	27
Obrázok 3.3: Schéma zložiek napätí, pôsobiacich na segment šmykovej plochy (upravené z [2, W2])	29
Obrázok 3.4: Smer šmykových napätí pozdĺž šmykovej plochy ^[2] , pre obrázok [A] v prípade $\mu = 0,49$, [B] s $\mu = 0,30$. V polárnom súradnicovom systéme (zväčšený detail), je uhlová súradnica $\theta = \alpha + 90^\circ$, radiálna súradnica $r = \tau_{\max}/\tau$	30
Obrázok 3.5: Ekvivalentná Mohr-Coulombova (φ^* , c^*) obálka zlyhania prevedená z neasociovanej Mohr-Coulombovej obálky (φ' , c') zlyhania (upravené z [32])	32
Obrázok 3.6: Pórový tlak v zemine	34
Obrázok 4.1: Pohyb častice medzi iteráciami (upravené z [13])	37
Obrázok 4.2: Schéma priebehu optimalizácie pri PSO (GBEST)	39
Obrázok 4.3: Ilustrácia pohybu častíc pre PSO GBEST ^[50]	41
Obrázok 4.4: Ilustrácia pohybu častíc pre PSO LBEST ^[50]	42
Obrázok 5.1: Delaunayova triangulácia ^[W7] v rovine so zobrazenými opísanými kružnicami [A] a vyznačenými stredmi (červenou farbou) [B], zostavený Voronoiho diagram [C]	48
Obrázok 5.2: Jednoduchá štúdia pre overenie spoľahlivosti generovanej siete pomocou Delaunayovej triangulácie	50
Obrázok 5.3: Schéma integrácie napätí pre vyčíslenie stupňa bezpečnosti (vykreslené ako ilustrácia s použitím zloženého obdĺžnikového pravidla)	51
Obrázok 5.4: Schéma algoritmu ELSM-PSO	55
Obrázok 6.1: Zadanie úlohy pre overovaciu štúdiu č. 1	56
Obrázok 6.2: Testovaná skúšobná šmyková plocha pre overovaciu štúdiu č. 1	57

Obrázok 6.3 Schéma organizácie výpočtov v overovacej štúdií č. 1 na jednoduchom homogénnom svahu.....	59
Obrázok 6.4: Tvar optimalizovanej šmykovej plochy dosiahnutý analýzami stability svahu pomocou LEM, SRM a ELSM (homogénny svah, neasociovaná plasticita).....	63
Obrázok 6.5: Krabicový graf (vysvetlenie vykreslených štatistických charakteristík) ..	66
Obrázok 6.6: Vykreslenie výsledných kritických šmykových plôch z jednotlivých výpočtov pre všetky riešené varianty.....	67
Obrázok 7.1: Zadanie úlohy pre overováciu štúdiu č. 2	78
Obrázok 7.2: Testovaná skúšobná šmyková plocha pre overováciu štúdiu č. 2	79
Obrázok 7.3: Schéma organizácie výpočtov pre overováciu štúdiu č. 2 na heterogénnom svahu	80
Obrázok 7.4: Tvar optimalizovanej šmykovej plochy dosiahnutý analýzami stability svahu pomocou LEM, SRM a ELSM (heterogénny svah, neasociovaná plasticita).....	84
Obrázok 8.1: Vizualizácia priestoru sypanej zemnej hrádze vodného diela Vlachovice ^[16]	87
Obrázok 8.2: Výrez z geologickej mapy 1 : 50 000 (ČGS), KVARTÉR: 6 – nivný sediment, 12 – piesčito-hlinitý až hlinito-piesčitý sediment, 13 – kamenitý až hlinito-kamenitý sediment ^[W1]	89
Obrázok 8.3: Profil posudzovanej zemnej zonálnej hrádze so stabilizačnými pätami, komínovým drénom a vodorovnými drenážnymi rebrami (zaústenými do priepustného prísypu) ^[22, 26]	90
Obrázok 8.4: HS model – triaxiálne podmienky a edometrické podmienky (upravené z [23])	91
Obrázok 8.5: Schéma organizácie výpočtov v overovacej štúdií č. 3 v rámci posúdenia vonkajšej stability vodnej nádrže VD Vlachovice	94
Obrázok 8.6: Zjednodušenie profilu zemnej zonálnej hrádze pre výpočty a priradenie materiálov (ZS1, prázdna nádrž po dokončení výstavby)	95
Obrázok 8.7: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód SRM a ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)	96
Obrázok 8.8: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metódy ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)	97
Obrázok 8.9: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM, SRM a ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)	98



Obrázok 8.10: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM a ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)	99
Obrázok 8.11: Zjednodušenie profilu zemnej zonálnej hrádze pre výpočty a priradenie materiálov (ZS 2, ustálené prúdenie)	100
Obrázok 8.12: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód SRM a ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)	101
Obrázok 8.13: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metódy ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)	102
Obrázok 8.14: Tvar šmykovej plochy na návodnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM a ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)	103
Obrázok 8.15: Tvar šmykovej plochy na vzdušnom svahu získaný výpočtom s použitím metód LEM, SRM a ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)	104

ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV

Graf 6.1: Vývoj stupňa bezpečnosti FoS v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie na hranici únosnosti)	61
Graf 6.2: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti FoS (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie na hranici únosnosti).....	62
Graf 6.3: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote <i>medium</i>).....	65
Graf 6.4: Porovnanie variantov algoritmu PSO v krabicovom grafe (bez obmedzení a s fixáciou bodu V_S v päte svahu).....	68
Graf 6.5: Výsledky výpočtov s variantom PSO GBEST (dosiahnuté hodnoty stupňa bezpečnosti pre jednotlivé častice v závislosti na iterácií, vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,28)	69
Graf 6.6: Výsledky výpočtov s variantom PSO LBEST (dosiahnuté hodnoty stupňa bezpečnosti pre jednotlivé častice v závislosti na iterácií, vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,28)	70
Graf 6.7: Vykreslenie priemerných a minimálnych dosiahnutých hodnôt účelovej funkcie v každej iterácií pre varianty PSO GBEST a LBEST (vykreslené pre stupne bezpečnosti FoS od 1,10 do 1,175).....	71
Graf 6.8: Vývoj stupňa bezpečnosti FoS v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie s rezervou únosnosti)	73
Graf 6.9: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti FoS (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, homogénny svah, porovnanie s rezervou únosnosti).....	74
Graf 6.10: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote <i>medium</i>).....	76
Graf 7.1: Vývoj stupňa bezpečnosti FoS v priebehu výpočtu metódou SRM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita).....	82



Graf 7.2: Závislosť hustoty siete KP na stupni bezpečnosti FoS (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita) 83

Graf 7.3: Porovnanie výsledkov analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočty pomocou ELSM (Davis) a SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, heterogénny svah, sieť KP v hustote *medium*) 86

ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK

Tabuľka 4.1: Porovnanie základných variantov PSO (GBEST a LBEST).....	40
Tabuľka 5.1: Príklad štruktúry dát pre import (pre trojúhelníkový prvok s 15 uzlami, teda 12 napäťovými Gaussovými integračnými bodmi)	45
Tabuľka 6.1: Parametre šmykovej pevnosti zemín použité v overovacej štúdií č. 1.....	57
Tabuľka 6.2: Súradnice primárnych radiacích bodov skúšobnej šmykovej plochy.....	57
Tabuľka 6.3: Hustota siete konečných prvkov v MKP modeli v softvéri Plaxis 2D	58
Tabuľka 6.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, materiál 1, asociovaná plasticita).....	60
Tabuľka 6.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy).....	60
Tabuľka 6.6: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, asociovaná plasticita).....	61
Tabuľka 6.7: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita)	61
Tabuľka 6.8: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 1, neasociovaná plasticita)	62
Tabuľka 6.9: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	64
Tabuľka 6.10: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 1, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	64
Tabuľka 6.11: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, materiál 2, asociovaná plasticita).....	72
Tabuľka 6.12: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy)	72
Tabuľka 6.13: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, asociovaná plasticita).....	73

Tabuľka 6.14: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita)	73
Tabuľka 6.15: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, materiál 2, neasociovaná plasticita)	74
Tabuľka 6.16: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	75
Tabuľka 6.17: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (optimalizovaná/kritická šmyková plocha, materiál 2, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	75
Tabuľka 7.1: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (skúšobná šmyková plocha, heterogénny svah, asociovaná plasticita)	80
Tabuľka 7.2: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (skúšobná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita, n – počet podsegmentov pre každý segment šmykovej plochy)	81
Tabuľka 7.3: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, asociovaná plasticita)	81
Tabuľka 7.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)	82
Tabuľka 7.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (optimalizovaná šmyková plocha, heterogénny svah, neasociovaná plasticita)	83
Tabuľka 7.6: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou SRM (heterogénny svah, optimalizovaná/kritická šmyková plocha, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	85
Tabuľka 7.7: Výsledky analýzy vplyvu pomeru ψ a φ' na stupeň stability svahu pre výpočet pomocou ELSM (heterogénny svah, optimalizovaná/kritická šmyková plocha, sieť KP v hustote <i>medium</i>)	85
Tabuľka 8.1: Hodnoty vstupných parametrov – objemová tiaž, šmyková pevnosť, hydraulická vodivosť ^[23]	92
Tabuľka 8.2: Hodnoty vstupných parametrov – deformačné parametre ^[23]	93
Tabuľka 8.3: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 1, s vplyvom sania). 95	
Tabuľka 8.4: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 1, s vplyvom sania)	96



Tabuľka 8.5: Výsledky analýzy svahu s využitím metód LEM (ZS 1, bez vplyvu sania)	97
Tabuľka 8.6: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 1, bez vplyvu sania)	98
Tabuľka 8.7: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 1, bez vplyvu sania)	98
Tabuľka 8.8: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 2, s vplyvom sania)	100
Tabuľka 8.9: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 2, s vplyvom sania)	101
Tabuľka 8.10: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy LEM (ZS 2, bez vplyvu sania)	102
Tabuľka 8.11: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy SRM (ZS 2, bez vplyvu sania)	102
Tabuľka 8.12: Výsledky analýzy svahu s využitím metódy ELSM (ZS 2, bez vplyvu sania)	103