

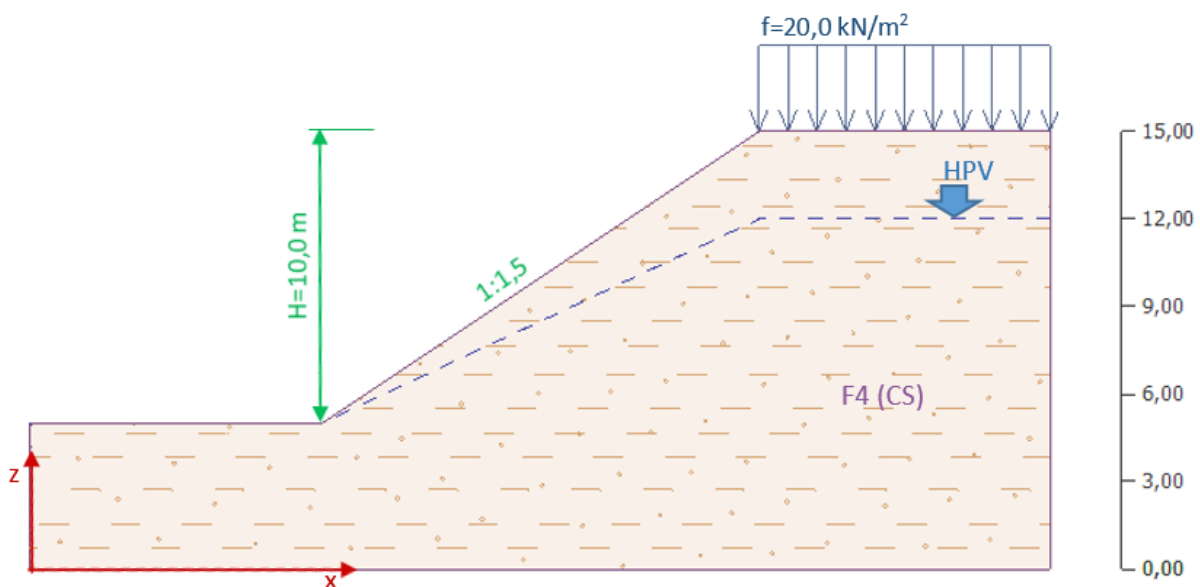
Posouzení stability svahu

Program: Stabilita svahu
Soubor: Demo_vm_03.gst

V tomto verifikačním manuálu je uveden ruční výpočet posouzení stability svahu a posouzení stability svahu zabezpečeného kotvou na trvalou návrhovou situaci. Aby byla dokázána shodnost výsledků, ruční výpočet je porovnán s výsledky programu GEO5 – Stabilita svahu.

Zadání úlohy:

Na obr. 1 je znázorněn příklad svahu. Výška svahu je $H = 10,0\text{ m}$ a jeho sklon je 1:1,5. Na koruně svahu působí zatížení o hodnotě $f = 20\text{ kN/m}^2$. Zemní těleso tvoří zemina F4 (CS). Vlastnosti zeminy (efektivní hodnoty) jsou uvedeny v tabulce 1. Výpočet je rozdělen na dvě fáze. V první fázi je počítaná stabilita svahu bez kotevního prvku a v druhé fázi je počítaná stabilita svahu s kotevním prvkem. Stabilita svahu je počítaná metodou podle Fellenius/Petterson a metodou podle Bishopa (kruhové smykové plochy). Metodika posouzení stability svahu je provedena podle stupňů bezpečnosti.



Obr. 1 Svah - geometrie

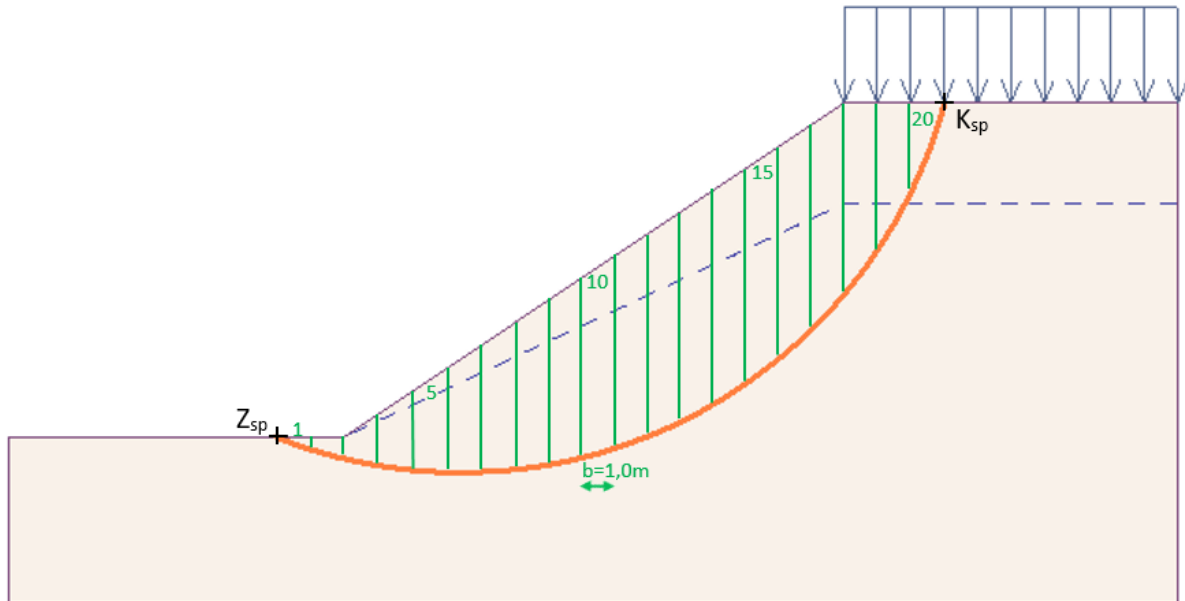
Zemina	Objemová tíha zeminy γ [kN/m^3]	Objemová tíha sat. zeminy γ_{sat} [kN/m^3]	Úhel vnitřního tření φ_{ef} [$^\circ$]	Soudržnost zeminy c_{ef} [kPa]
F4 (CS)	18,50	19,50	27,00	21,00

Tabulka 1 Efektivní vlastnosti zeminy

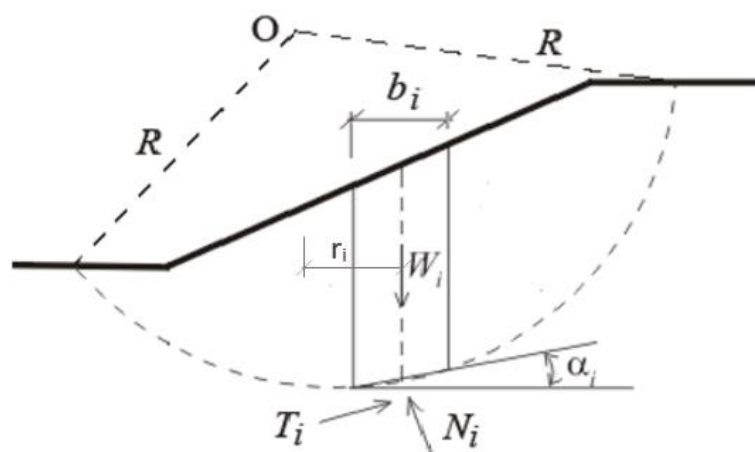
1. Výpočet podle Fellenius/Petterson

Posouzení stability svahu

Jako první byla určena řešená smyková plocha. V tomto případě je smyková plocha určena kružnicí se středem v bodě $O = [x, z] = [13,5279; 18,9443]$ a poloměrem $R = 15,00 \text{ m}$. Body Z_{sp} a K_{sp} označují začátek a konec smykové plochy. Před samotným výpočtem byl svah rozdělen do svislých proužků o šířce $b_i = 1,0 \text{ m}$. Celkově byl svah rozdělen na 20 proužků, které jsou znázorněny na obr. 2. Výpočet pro vlastní tíhy jednotlivých proužků je uveden v tab. 2.



Obr. 2 Svah rozdělený na proužky



Obr. 3 Síly působící na jednotlivé proužky

Výpočet svislé tíhy jednotlivých proužků svahu. Do této síly je započítáno působení tíhy zemního tělesa vymezeného smykovou plochou. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 2. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Stanovení plochy proužky bez podzemní vody (plocha A) a s podzemní vodou (plocha B):

$$A_{13} = 2,100 \text{ m}^2$$

$$B_{13} = 4,2249 \text{ m}^2$$

- Tíha jednotlivých částí proužku:

$$A_{W,13} = A_{13} \cdot \gamma = 2,100 \cdot 18,50 = 38,8500 \text{ kN/m}$$

$$B_{W,13} = B_{13} \cdot \gamma_{sat} = 4,2249 \cdot 19,50 = 82,3856 \text{ kN/m}$$

- Celková tíha proužku:

$$W_{13} = A_{W,13} + B_{W,13} = 38,8500 + 82,3856 = 121,236 \text{ kN/m}$$

- Celkový výpočet tíhy proužku pro celý svah:

Číslo proužku	Plocha		Šířka Proužku	Tíha		Celk. tíha	Zatížení
	A_i [m^2]	B_i [m^2]	b_i [m]	$A_{W,i}$ [kN/m]	$B_{W,i}$ [kN/m]	W_i [kN/m]	f_i [kN/m]
1	0,0000	0,1780	1,000	0,000	3,471	3,471	0,000
2	0,0000	0,4955	1,000	0,000	9,662	9,662	0,000
3	0,1000	0,9714	1,000	1,850	18,942	20,792	0,000
4	0,3000	1,6095	1,000	5,550	31,385	36,935	0,000
5	0,5000	2,1787	1,000	9,250	42,485	51,735	0,000
6	0,7000	2,6807	1,000	12,950	52,274	65,224	0,000
7	0,9000	3,1158	1,000	16,650	60,758	77,408	0,000
8	1,1000	3,4836	1,000	20,350	67,930	88,280	0,000
9	1,3000	3,7828	1,000	24,050	73,765	97,815	0,000
10	1,5000	4,0109	1,000	27,750	78,212	105,963	0,000
11	1,7000	4,1644	1,000	31,450	81,206	112,656	0,000
12	1,9000	4,2381	1,000	35,150	82,643	117,793	0,000
13	2,1000	4,2249	1,000	38,850	82,386	121,236	0,000
14	2,3000	4,1148	1,000	42,550	80,239	122,789	0,000
15	2,5000	3,8937	1,000	46,250	75,927	122,177	0,000
16	2,7000	3,5409	1,000	49,950	69,048	118,998	0,000
17	2,9000	3,0240	1,000	53,650	58,968	112,618	0,000
18	3,0000	2,0544	1,000	55,500	40,061	95,561	20,000
19	2,9692	0,5721	1,000	54,930	11,156	66,086	20,000
20	1,4192	0,0000	1,0000	26,255	0,000	26,255	20,000

Tabulka 2 Výpočet tíhy jednotlivých proužků včetně zatížení v koruně svahu

Určení šikmosti smykové plochy jednotlivých proužků a výpočet vlivu pórového tlaku. Pro zjednodušení výpočtu je kruhová smyková plocha v ručním výpočtu nahrazena polygonem. Šikmost smykové plochy je určena jako odklon smykové roviny od horizontální roviny.

Pro výpočet pórového tlaku je nutné stanovit výšku hladiny podzemní vody. Výška hladiny podzemní vody h_i v jednotlivých proužcích je uvažována v ose proužku. Tíha vody je uvažována jako $\gamma_w = 10,00 \text{ kN/m}^3$. Pro výpočet vodorovné síly od pórového tlaku je nutné stanovit výšky hladin podzemní vody na obou stranách proužků. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 3 a v tabulce 4. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Sklon smykové plochy:

$$\alpha_{13} = 27,7192^\circ$$

- Délka smykové plochy:

$$l_{13} = \frac{b_{13}}{\cos(\alpha_{13})} = \frac{1,000}{\cos(27,7192)} = 1,130 \text{ m}$$

- Sklon hladiny vody:

$$\alpha_{w,13} = 25,0169^\circ$$

- Výška hladiny vody:

$$h_{13} = 4,2369 \text{ m}$$

- Výpočet redukované výšky hladiny podzemní vody:

$$h_{r,13} = h_{13} \cdot \cos(\alpha_{w,13})^2 = 4,2369 \cdot \cos(25,0169)^2 = 3,479 \text{ m}$$

- Výpočet pórového tlaku:

$$u_{13} = \gamma_w \cdot h_{r,13} = 10,00 \cdot 3,479 = 34,790 \text{ kPa}$$

- Výpočet vodorovné síly od pórového tlaku:

$$U_{HL,13} = \frac{[h_{L,13} \cdot \cos(\alpha_{w,13})]^2 \cdot \gamma_w}{2} = \frac{[4,2543 \cdot \cos(25,0169)]^2 \cdot 10}{2} = 74,312 \text{ kN/m} \quad \text{- levá strana}$$

$$U_{HP,13} = \frac{[h_{P,13} \cdot \cos(\alpha_{w,13})]^2 \cdot \gamma_w}{2} = \frac{[4,1955 \cdot \cos(25,0169)]^2 \cdot 10}{2} = 72,272 \text{ kN/m} \quad \text{- pravá strana}$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Sklon smykové plochy α_i [°]	Délka smykové plochy l_i [m]	Podzemní voda			Pórový tlak u_i [kPa]
			Sklon hladiny $\alpha_{w,i}$ [°]	Výška hladiny h_i [m]	Redukovaná výška $h_{r,i}$ [m]	
1	-19,5956	1,061	0,0000	0,1880	0,188	1,880
2	-15,5860	1,038	0,0000	0,5048	0,505	5,050
3	-11,6525	1,021	25,0169	0,9803	0,805	8,050

4	-7,7741	1,009	25,0169	1,6180	1,329	13,290
5	-3,9314	1,002	25,0169	2,1871	1,796	17,960
6	0,1065	1,000	25,0169	2,6890	2,208	22,080
7	3,6119	1,002	25,0169	3,1242	2,566	25,660
8	7,5592	1,009	25,0169	3,4922	2,868	28,680
9	11,4351	1,020	25,0169	3,7917	3,114	31,140
10	15,3650	1,037	25,0169	4,0202	3,301	33,010
11	19,3709	1,060	25,0169	4,1744	3,428	34,280
12	23,4785	1,090	25,0169	4,2489	3,489	34,890
13	27,7192	1,130	25,0169	4,2369	3,479	34,790
14	32,1331	1,181	25,0169	4,1285	3,390	33,900
15	36,7741	1,248	25,0169	3,9099	3,211	32,110
16	41,7186	1,340	25,0169	3,5609	2,924	29,240
17	47,0841	1,469	25,0169	3,0504	2,505	25,050
18	53,0703	1,664	0,0000	2,0928	2,093	20,930
19	60,0828	2,005	0,0000	0,5872	0,587	5,870
20	69,3348	2,834	0,0000	0,0000	0,000	0,000

Tabulka 3 Sklon a délka smykové plochy a pórový tlak

Číslo proužku	Levá strana		Pravá strana	
	$h_{L,i}$ [m]	$U_{HL,i}$ [kN / m]	$h_{R,i}$ [m]	$U_{HR,i}$ [kN / m]
1	0,0000	0,000	0,3560	0,634
2	0,3560	0,634	0,6530	2,132
3	0,6530	2,132	1,3079	7,023
4	1,3079	7,023	1,9110	14,994
5	1,9110	14,994	2,4464	24,573
6	2,4464	24,573	2,9150	34,888
7	2,9150	34,888	3,3166	45,164
8	3,3166	45,164	3,6506	54,718
9	3,6506	54,718	3,9150	62,931
10	3,9150	62,931	4,1069	69,252
11	4,1069	69,252	4,2220	73,188
12	4,2220	73,188	4,2543	74,312
13	4,2543	74,312	4,1955	72,272
14	4,1955	72,272	4,0341	66,818
15	4,0341	66,818	3,7533	57,840
16	3,7533	57,840	3,3284	45,485
17	3,3284	45,485	2,7196	30,368
18	2,7196	30,368	1,3891	9,648
19	1,3891	9,648	0,0000	0,000
20	0,0000	0,000	0,0000	0,000

Tabulka 4 Vodorovné síly od pórového tlaku

Výpočet aktivních momentů. Při výpočtu jsou uvažované celkové svislé síly od jednotlivých proužků včetně působení zatížení, které působí na vodorovném rameni od osy proužku ke středu kružnice smykové plochy (k bodu O). Pro výpočet ramen je nutné znát souřadnici začátku smykové plochy ($Z_{sp} = [x, z] = [8,00; 5,00]$) Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 5. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Výpočet ramena síly:

$$r_{a,13} = X_{zsp} - X_o + \left(i \cdot b - \frac{b}{2} \right) = 8,0000 - 13,5729 + \left(13 \cdot 1,0 - \frac{1,0}{2} \right) = 6,972 \text{ m}$$

- Výpočet aktivního momentu:

$$M_{a,13} = (W_{13} + f_{13}) \cdot r_{a,13} = (121,236 + 0,000) \cdot 6,972 = 845,257 \text{ kNm/m}$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Aktivní moment		Číslo proužku	Aktivní moment	
	$r_{a,i}$ [m]	$M_{a,i}$ [kNm/m]		$r_{a,i}$ [m]	$M_{a,i}$ [kNm/m]
1	-5,028	-17,452	11	4,972	560,126
2	-4,028	-38,919	12	5,972	703,460
3	-3,028	-62,958	13	6,972	845,257
4	-2,028	-74,904	14	7,972	978,874
5	-1,028	-53,184	15	8,972	1096,172
6	-0,028	-1,826	16	9,972	1186,648
7	0,972	75,241	17	10,972	1235,645
8	1,972	174,088	18	11,972	1383,496
9	2,972	290,706	19	12,972	1116,708
10	3,972	420,885	20	13,972	646,275

Tabulka 5 Aktivní momenty jednotlivých proužků

- Sumace aktivních momentů:

$$M_a = \sum_{i=1}^{20} M_{a,i} = 10464,338 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_a = 10447,88 \text{ kNm/m}$

- Výsledná aktivní síla na smykové ploše:

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{a,i}}{R} = \frac{10464,338}{15,00} = 697,623 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_a = 696,53 \text{ kN/m}$

Výpočet pasivních momentů. Je nutné dopočítat normálovou sílu N_i , která působí kolmo ke smykové ploše. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 6. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Výpočet stupně stability FS :

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

- Výpočet normálové síly:

$$N_{13} = (W_{13} + f_{13}) \cdot \cos(\alpha_{13}) - u_{13} \cdot l_{13} + (U_{HL,13} - U_{HR,13}) \cdot \sin(\alpha_{13})$$

$$N_{13} = (121,236 + 0,000) \cdot \cos(27,7192) - 34,790 \cdot 1,130 + (74,312 - 72,272) \cdot \sin(27,7192) = 68,959 \text{ kN} / m$$

- Výpočet pasivního momentu:

$$M_{p,13} = [c_{13} \cdot l_{13} + N_{13} \cdot \tan(\varphi)] \cdot R = [21,00 \cdot 1,130 + 68,959 \cdot \tan(27,00)] \cdot 15,00 = 882,995 \text{ kNm} / m$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Normálová síla	Pasivní moment	Číslo proužku	Normálová síla	Pasivní moment
	N_i [kN / m]	$M_{p,i}$ [kNm / m]		N_i [kN / m]	$M_{p,i}$ [kNm / m]
1	1,488	345,588	11	68,636	858,477
2	4,467	361,111	12	69,563	875,012
3	13,132	421,981	13	68,959	882,995
4	24,264	503,282	14	66,845	882,903
5	34,274	577,582	15	63,166	875,890
6	43,125	644,599	16	57,863	864,340
7	50,906	704,699	17	50,957	852,193
8	57,318	755,910	18	51,169	915,239
9	62,482	798,843	19	39,528	933,683
10	66,269	833,141	20	16,324	1017,472

Tabulka 6 Normálové síly a pasivní momenty

- Sumace pasivních momentů:

$$M_p = \sum_{i=1}^{20} M_{p,i} = 14904,940 \text{ kNm} / m$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_p = 14936,16 \text{ kNm} / m$

- Výsledná pasivní síla:

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{p,i}}{R} = \frac{14904,940}{15,00} = 993,663 \text{ kN} / m$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_p = 995,74 \text{ kN} / m$

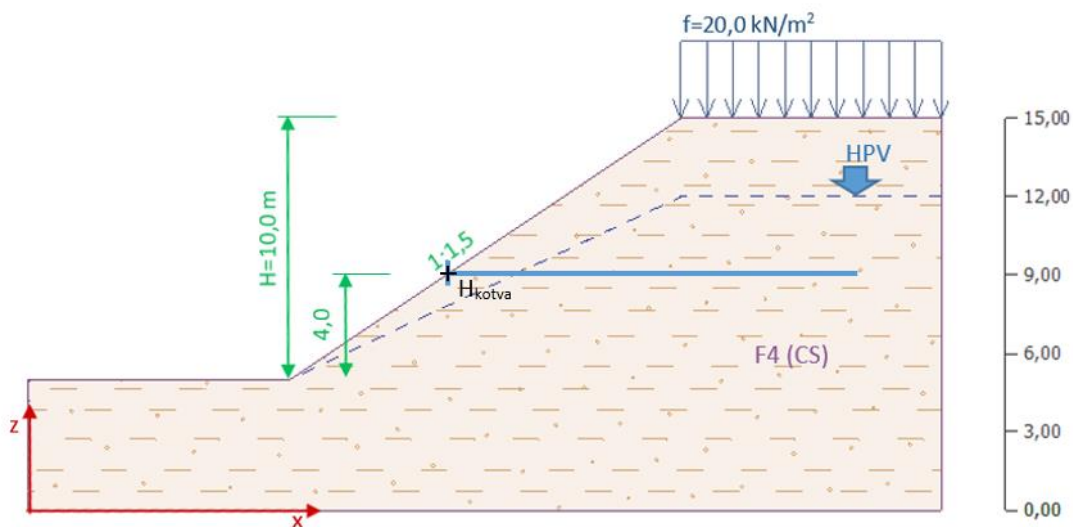
- Výpočet stupně stability FS :

$$FS = \frac{M_p}{M_a} = \frac{14904,940}{10464,338} = 1,424, \text{ NEVYHOVUJE}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $FS = 1,43$, **NEVYHOVUJE**

Posouzení stability svahu s kotvou

Na obr. 4 je znázorněn svah ve druhé fázi výpočtu, jehož stabilita je zlepšená pomocí kotvy. Síla v kotvě je uvažována s hodnotou $F_k = 200,00 \text{ kN}$ a osová vzdálenost po délce svahu je $b_k = 2,00 \text{ m}$. Poloha hlavy kotvy je $H_{kotva} = [x, z] = [16,00; 9,00]$. Hlava kotvy je v proužku č. 9.



Obr. 4 Svah s kotvou - geometrie

Výpočet aktivních momentů. Kotva působí jako pasivní prvek, což znamená, že aktivní momenty budou stejné jako v první fázi výpočtu.

- Sumace aktivních momentů:

$$M_a = \sum_{i=1}^{20} M_{a,i} = 10464,338 \text{ kNm} / m$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_a = 10447,88 \text{ kNm} / m$

- Výsledná aktivní síla na smykové ploše:

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{a,i}}{R} = \frac{10464,338}{15,00} = 697,623 \text{ kN} / m$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_a = 696,53 \text{ kN} / m$

Výpočet pasivních momentů. Je nutné dopočítat normálovou sílu N_i , která působí kolmo ke smykové ploše. Normálová síla na proužku 9 je ovlivněna kotevním prvkem. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 7. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Síla kotvy na 1 m délky svahu:

$$F'_k = \frac{F_k}{b_k} = \frac{200,00}{2,00} = 100,00 \text{ kN/m}$$

- Výpočet ramena kotvy:

Výpočet je proveden z rozdílu souřadnic hlavy kotvy a středu kružnice smykové plochy.

$$r_k = Z_O - Z_{kotva} = 18,944 - 9,000 = 9,944 \text{ m}$$

- Pasivní moment od kotvy:

$$M_{p,k} = F'_k \cdot r_k = 100,00 \cdot 9,944 = 994,400 \text{ kNm/m}$$

- Výpočet stupně stability FS :

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

- Výpočet normálové síly:

$$N_{13} = (W_{13} + f_{13}) \cdot \cos(\alpha_{13}) - u_{13} \cdot l_{13} + (U_{HL,13} - U_{HR,13}) \cdot \sin(\alpha_{13})$$

$$N_{13} = (121,236 + 0,000) \cdot \cos(27,7192) - 34,790 \cdot 1,130 + (74,312 - 72,272) \cdot \sin(27,7192) = 68,959 \text{ kN/m}$$

- Výpočet normálové síly od kotvy na proužku 9:

$$N_{k,9} = F'_k \cdot \sin(\alpha_9) = 100,000 \cdot \sin(11,4351) = 19,826 \text{ kN/m}$$

- Výpočet pasivního momentu:

$$M_{p,13} = [c_{13} \cdot l_{13} + N_{13} \cdot \tan(\varphi)] \cdot R = [21,00 \cdot 1,130 + 68,959 \cdot \tan(27,00)] \cdot 15,00 = 882,995 \text{ kNm/m}$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Normálová síla	Pasivní moment	Číslo proužku	Normálová síla	Pasivní moment
	N_i [kN/m]	$M_{p,i}$ [kNm/m]		N_i [kN/m]	$M_{p,i}$ [kNm/m]
1	1,488	345,588	11	68,636	858,477
2	4,467	361,111	12	69,563	875,012
3	13,132	421,981	13	68,959	882,995
4	24,264	503,282	14	66,845	882,903
5	34,274	577,582	15	63,166	875,890
6	43,125	644,599	16	57,863	864,340
7	50,906	704,699	17	50,957	852,193
8	57,318	755,910	18	51,169	915,239

9	82,308	950,370	19	39,528	933,683
10	66,269	833,141	20	16,324	1017,472

Tabulka 7 Normálové síly a pasivní momenty

- Sumace pasivních momentů:

$$M_p = \sum_{i=1}^{20} M_{p,i} + M_{p,k} = 15056,467 + 994,400 = 16050,867 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_p = 16081,40 \text{ kNm/m}$

- Výsledná pasivní síla:

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{p,i} + M_{p,k}}{R} = \frac{1605,867}{15,00} = 1070,058 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_p = 1072,09 \text{ kN/m}$

- Výpočet stupně stability FS :

$$FS = \frac{M_p}{M_a} = \frac{16050,867}{10464,338} = 1,534, \text{ VYHOVUJE}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $FS = 1,54, \text{ VYHOVUJE}$

2. Výpočet podle Bishopa

Posouzení stability svahu

Smyková plocha a rozdělení řešené části svahu na proužky je stejné jako u metody Fellenius/Petterson (Obr. 2). Výpočet pro vlastní tíhy jednotlivých proužků je uveden v tab. 2.

Určení šikmosti smykové plochy jednotlivých proužků a výpočet vlivu pórového tlaku. Pro zjednodušení výpočtu je kruhová smyková plocha v ručním výpočtu nahrazena polygonem. Šikmost smykové plochy je určena jako odklon smykové roviny od horizontální roviny.

Pro výpočet pórového tlaku je nutné stanovit výšku hladiny podzemní vody. Výška hladiny podzemní vody h_i v jednotlivých proužcích je uvažovaná v ose proužku. Tíha vody je uvažovaná jako $\gamma_w = 10,00 \text{ kN/m}^3$. Výsledný účinek vodorovných sil od pórového tlaku na svislých plochách mezi proužky není významný a byl zanedbán. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 8. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Sklon smykové plochy:

$$\alpha_{13} = 27,7192^\circ$$

- Sklon hladiny vody:

$$\alpha_{w,13} = 25,0169^\circ$$

- Výška hladiny vody:

$$h_{13} = 4,2369 \text{ m}$$

- Výpočet redukované výšky hladiny podzemní vody:

$$h_{r,13} = h_{13} \cdot \cos(\alpha_{w,13})^2 = 4,2369 \cdot \cos(25,0169)^\circ = 3,479 \text{ m}$$

- Výpočet pórového tlaku:

$$u_{13} = \gamma_w \cdot h_{r,13} = 10,00 \cdot 3,479 = 34,790 \text{ kPa}$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Sklon smykové plochy	Podzemní voda			Pórový tlak
		Sklon hladiny	Výška hladiny	Redukovaná výška	
	α_i [°]	$\alpha_{w,i}$ [°]	h_i [m]	$h_{r,i}$ [m]	u_i [kPa]
1	-19,5956	0,0000	0,1880	0,188	1,880
2	-15,5860	0,0000	0,5048	0,505	5,050
3	-11,6525	25,0169	0,9803	0,805	8,050
4	-7,7741	25,0169	1,6180	1,329	13,290
5	-3,9314	25,0169	2,1871	1,796	17,960
6	0,1065	25,0169	2,6890	2,208	22,080
7	3,6119	25,0169	3,1242	2,565	25,650

8	7,5592	25,0169	3,4922	2,868	28,680
9	11,4351	25,0169	3,7917	3,114	31,140
10	15,3650	25,0169	4,0202	3,301	33,010
11	19,3709	25,0169	4,1744	3,428	34,280
12	23,4785	25,0169	4,2489	3,489	34,890
13	27,7192	25,0169	4,2369	3,479	34,790
14	32,1331	25,0169	4,1285	3,390	33,900
15	36,7741	25,0169	3,9099	3,211	32,110
16	41,7186	25,0169	3,5609	2,924	29,240
17	47,0841	25,0169	3,0504	2,505	25,050
18	53,0703	0,0000	2,0928	2,093	20,930
19	60,0828	0,0000	0,5872	0,587	5,870
20	69,3348	0,0000	0,0000	0,000	0,000

Tabulka 8 Sklon smykové plochy a pórový tlak

Výpočet aktivních momentů. Při výpočtu jsou uvažované celkové svislé síly od jednotlivých proužků včetně působení zatížení, které působí na vodorovném rameni od osy proužku ke středu kružnice smykové plochy (k bodu O). Pro výpočet ramen je nutné znát souřadnici začátku smykové plochy ($Z_{sp} = [x, z] = [8,00; 5,00]$) Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 9. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Výpočet ramena síly:

$$r_{a,13} = X_{zsp} - X_O + \left(i \cdot b - \frac{b}{2} \right) = 8,0000 - 13,5729 + \left(13 \cdot 1,0 - \frac{1,0}{2} \right) = 6,972 \text{ m}$$

- Výpočet aktivního momentu:

$$M_{a,13} = (W_{13} + f_{13}) \cdot r_{a,13} = (121,236 + 0,000) \cdot 6,972 = 845,257 \text{ kNm/m}$$

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo proužku	Aktivní moment		Číslo proužku	Aktivní moment	
	$r_{a,i}$ [m]	$M_{a,i}$ [kNm/m]		$r_{a,i}$ [m]	$M_{a,i}$ [kNm/m]
1	-5,028	-17,452	11	4,972	560,126
2	-4,028	-38,919	12	5,972	703,460
3	-3,028	-62,958	13	6,972	845,257
4	-2,028	-74,904	14	7,972	978,874
5	-1,028	-53,184	15	8,972	1096,172
6	-0,028	-1,826	16	9,972	1186,648
7	0,972	75,241	17	10,972	1235,645
8	1,972	174,088	18	11,972	1383,496
9	2,972	290,706	19	12,972	1116,708
10	3,972	420,885	20	13,972	646,275

Tabulka 9 Aktivní momenty jednotlivých proužků

- Sumace aktivních momentů:

$$M_a = \sum_{i=1}^{20} M_{a,i} = 10464,338 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_a = 10447,88 \text{ kNm/m}$

- Výsledná aktivní síla na smykové ploše:

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{a,i}}{R} = \frac{10464,338}{15,00} = 697,623 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_a = 696,53 \text{ kN/m}$

Výpočet pasivních momentů. Výpočet pasivních momentů je nutné iterovat, protože dle Bishopa je výpočet pasivních momentů závislý na stupni bezpečnosti FS . V prvním výpočtu je uvažován odhad pro stupeň bezpečnosti $FS = 1,500$. V ručním výpočtu je uvedených 5 iterací. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 10. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Výpočet stupně stability FS pro jednotlivé iterace:

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

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,500$:

$$M_{p,13} = \frac{c \cdot b_{13} + (W_{13} + f_{13} - u_{13} \cdot b_{13}) \cdot \tan(\varphi)}{\cos(\alpha_{13}) + \frac{\tan(\varphi) \cdot \sin(\alpha_{13})}{FS}} \cdot R$$

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,500}} \cdot 15,00 = 935,258 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,546$ - výsledek 1. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,546$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,546}} \cdot 15,00 = 939,492 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,553$ - výsledek 2. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,553$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,553}} \cdot 15,00 = 940,117 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,554$ - výsledek 3. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,554$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,554}} \cdot 15,00 = 940,206 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,554$ - výsledek 4. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,554$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,554}} \cdot 15,00 = 940,206 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,554$ - výsledek 5. iterace

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo pr.	1. iterace		2. iterace		3. iterace		4. iterace		5. iterace	
	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS
1	395,044	1,546	393,434	1,553	393,198	1,554	393,165	1,554	393,165	1,554
2	401,680		400,433		400,250		400,224		400,224	
3	452,781		451,769		451,620		451,599		451,599	
4	524,644		523,886		523,775		523,759		523,759	
5	588,222		587,8045		587,742		587,734		587,734	
6	644,339		644,351		644,353		644,353		644,353	
7	697,048		697,484		697,548		697,557		697,557	
8	743,745		744,700		744,841		744,861		744,861	
9	787,201		788,710		788,932		788,964		788,964	
10	827,660		829,768		830,079		830,123		830,123	
11	865,500		868,256		868,663		868,721		868,721	
12	901,264		904,725		905,236		905,309		905,309	
13	935,258		939,492		940,117		940,206		940,206	
14	967,766		972,856		973,608		973,715		973,715	
15	999,018		1005,073		1005,969		1006,097		1006,097	
16	1029,345		1036,514		1037,576		1037,727		1037,727	
17	1058,707		1067,203		1068,464		1068,643		1068,643	
18	1190,155		1201,280		1202,933		1203,168		1203,168	
19	1170,095		1183,162		1185,108		1185,385		1185,385	
20	996,701		1010,954		1013,084		1013,387		1013,387	
SUMA	16176,173		16251,854		16263,096		16264,697		16264,697	

Tabulka 10 Pasivní momenty jednotlivých proužků

- Sumace pasivních momentů v 5. iteraci:

$$M_p = \sum_{i=1}^{20} M_{p,i} = 16264,697 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_p = 16280,28 \text{ kNm/m}$

- Výsledná pasivní síla:

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{p,i}}{R} = \frac{16264,697}{15,00} = 1084,313 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_p = 1085,35 \text{ kN/m}$

- Výpočet stupně stability FS v 5. iteraci:

$$FS = \frac{M_p}{M_a} = \frac{16264,697}{10464,338} = 1,554, \text{ VYHOVUJE}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $FS = 1,56, \text{ VYHOVUJE}$

Posouzení stability svahu s kotvou

Na obr. 4 je znázorněn svah ve druhé fázi výpočtu, jehož stabilita je zlepšená pomocí kotvy. Síla v kotvě je uvažována s hodnotou $F_k = 200,00 \text{ kN}$ a osová vzdálenost po délce svahu je $b_k = 2,00 \text{ m}$. Poloha hlavy kotvy je $H_{kotva} = [x, z] = [16,00; 9,00]$.

Výpočet aktivních momentů. Kotva působí jako pasivní prvek, což znamená, že aktivní momenty budou stejné jako v první fázi výpočtu.

- Sumace aktivních momentů:

$$M_a = \sum_{i=1}^{20} M_{a,i} = 10464,338 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_a = 10447,88 \text{ kNm/m}$

- Výsledná aktivní síla na smykové ploše:

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{a,i}}{R} = \frac{10464,338}{15,00} = 697,623 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_a = 696,53 \text{ kN/m}$

Výpočet pasivních momentů. Do výpočtu pasivních momentů vstupuje i kotva. Výpočet pasivních momentů je nutné iterovat, protože dle Bishopa je výpočet pasivních momentů závislý na stupni bezpečnosti FS . V prvním výpočtu je uvažován odhad pro stupeň bezpečnosti $FS = 1,500$. V ručním výpočtu je uvedených 5 iterací. Výpočet je proveden tabulkově a je uveden v tabulce 11. Vzorový výpočet je proveden pro proužek č. 13.

- Síla kotvy na 1 m délky svahu:

$$F_k' = \frac{F_k}{b_k} = \frac{200,00}{2,00} = 100,00 \text{ kN/m}$$

- Výpočet ramena kotvy:

Výpočet je proveden z rozdílu souřadnic hlavy kotvy a středu kružnice smykové plochy.

$$r_k = Z_O - Z_{kotva} = 18,944 - 9,000 = 9,944 \text{ m}$$

- Pasivní moment od kotvy:

$$M_{p,k} = F_k' \cdot r_k = 100,00 \cdot 9,944 = 994,400 \text{ kNm/m}$$

- Výpočet stupně stability FS pro jednotlivé iterace:

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

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,500$:

$$M_{p,13} = \frac{c \cdot b_{13} + (W_{13} + f_{13} - u_{13} \cdot b_{13}) \cdot \tan(\varphi)}{\cos(\alpha_{13}) + \frac{\tan(\varphi) \cdot \sin(\alpha_{13})}{FS}} \cdot R$$

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,500}} \cdot 15,00 = 935,258 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,641$ - výsledek 1. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,641$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,641}} \cdot 15,00 = 947,589 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,662$ - výsledek 2. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,662$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,662}} \cdot 15,00 = 949,272 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,665$ - výsledek 3. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,665$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,665}} \cdot 15,00 = 949,509 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,665$ - výsledek 4. iterace

- Výpočet pasivního momentu pro $FS = 1,665$:

$$M_{p,13} = \frac{21,00 \cdot 1,00 + (121,236 + 0,00 - 34,790 \cdot 1,00) \cdot \tan(27,00)}{\cos(27,7192) + \frac{\tan(27,00) \cdot \sin(27,7192)}{1,665}} \cdot 15,00 = 949,509 \text{ kNm/m}$$

→ $FS = 1,665$ - výsledek 5. iterace

- Výpočet pro všechny proužky:

Číslo pr.	1. iterace		2. iterace		3. iterace		4. iterace		5. iterace	
	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS	$M_{p,i}$ [kNm/m]	FS
1	395,044	1,641	390,429	1,662	389,817	1,665	389,731	1,665	389,731	1,665
2	401,680		398,100		397,623		397,556		398,100	
3	452,781		449,870		449,481		449,427		449,870	
4	524,644		522,461		522,169		522,128		522,461	
5	588,222		587,016		586,855		586,832		587,016	
6	644,339		644,374		644,378		644,379		644,374	
7	697,048		698,308		698,478		698,502		698,308	
8	743,745		746,511		746,885		746,937		746,511	
9	787,201		791,574		792,165		792,249		791,574	
10	827,660		833,776		834,605		834,722		833,776	
11	865,500		873,507		874,595		874,748		865,500	
12	901,264		911,332		912,703		912,896		901,264	
13	935,258		947,589		949,272		949,509		935,258	
14	967,766		982,612		984,642		984,929		967,766	
15	999,018		1016,706		1019,131		1019,474		999,018	
16	1029,345		1050,323		1053,208		1053,616		1029,345	
17	1058,707		1083,621		1087,059		1087,545		1058,707	
18	1190,155		1222,859		1227,393		1228,034		1190,155	
19	1170,095		1208,644		1214,020		1214,781		1170,095	
20	996,701		1039,003		1044,965		1045,810		996,701	
Kotva	994,400	994,400	994,400	994,400	994,400					
SUMA	17170,573		17393,015		17423,844		17428,205		17428,205	

Tabulka 11 Pasivní momenty jednotlivých proužků a účinek kotvy

- Sumace pasivních momentů v 5. iteraci:

$$M_p = \sum_{i=1}^{20} M_{p,i} + M_{p,k} = 16433,805 + 994,400 = 17428,205 \text{ kNm/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $M_p = 17442,70 \text{ kNm/m}$

- Výsledná pasivní síla:

$$F_p = \frac{\sum_{i=1}^{20} M_{p,i} + M_{p,k}}{R} = \frac{16433,805 + 994,400}{15,00} = 1161,880 \text{ kN/m}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $F_p = 1162,85 \text{ kN/m}$

- Výpočet stupně stability FS v 5. iteraci:

$$FS = \frac{M_p}{M_a} = \frac{17428,205}{10464,338} = 1,665, \text{ VYHOVUJE}$$

Výsledek z programu GEO5 – Stabilita svahu: $FS = 1,67, \text{ VYHOVUJE}$