

Teorie

K sesuvu svahu dochází často podél tenké smykové plochy, která odděluje sesouvající se těleso sesuvu nad smykovou plochou od nepohybujícího se podkladu.

Obecně lze říct, že v nesoudrzných zeminách vznikají rovinné smykové plochy (v příčném řezu tvoří úsečku), zatímco v homogenních soudrzných zeminách se vytvářejí válcové smykové plochy (v řezu tvoří kruhový oblouk, obvykle procházející patou svahu). Problematika tvaru a mocnosti smykových ploch a zón je však daleko složitější.

Nejobvykleji používanými metodami pro hodnocení stability svahů jsou **metody mezní rovnováhy**, které jsou založeny na předpokladu, že proti silám aktivizujícím svahový pohyb působí mobilizovaná část smykové pevnosti.

V dalším textu bude představena nejjednodušší proužková metoda pro výpočet stability svahu v soudrzné zemině, která předpokládá válcový průběh smykové plochy (v řezu je smyková plocha částí kružnice).

1 Švédská proužková metoda (Petterssonova / Felleniova metoda; 1927)

Švédská proužková metoda u nás obvykle nazývaná jako Petterssonova metoda předpokládá kruhový průběh smykové plochy ve svahu. Vychází z momentové rovnováhy ke středu otáčení (=středu kruhového oblouku), vzájemné působení mezi proužky se zanedbává.

Z této momentové podmínky musí platit, že smykové napětí τ působící podél smykové plochy¹ a způsobující momenty aktivizující svahový pohyb jsou v rovnováze s mobilizovanou smykovou pevností s působící podél smykové plochy.

$$\tau = s_{mobilizovaná} = \frac{s}{F_s}$$

kde τ je smykové napětí působící ve směru sesouvání podél smykové plochy, s je plná smyková pevnost podél smykové plochy a F_s je stupeň stability svahu.

Svahem se postupně prokládá řada kruhových smykových ploch a pro každou z nich se určí stupeň stability F_s . Čím je tento stupeň vyšší, tím je svah stabilnější. Hledá se tzv. **kritická smyková plocha**, pro kterou **vychází stupeň stability nejnižší**. Běžně je tato řada výpočtů prováděna specializovanými programy. Pro zjednodušení a snížení počtu výpočtů je možno použít Felleniovy metody vyhledávání kritické kružnice.

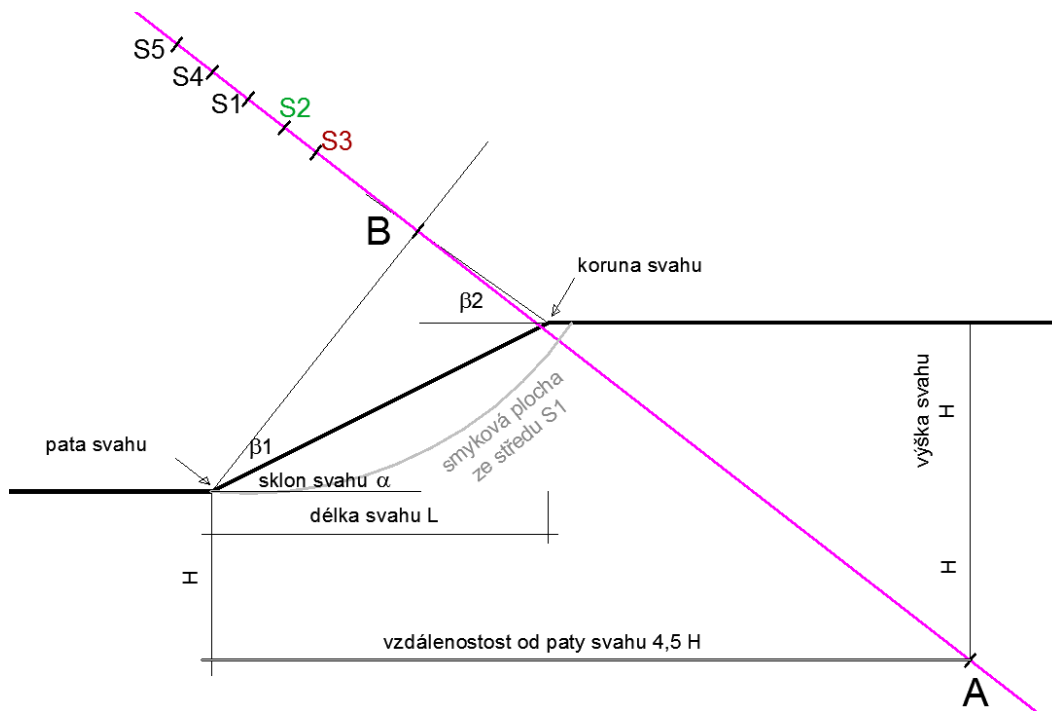
1.1 Felleniova přímka

Felleniova metoda předpokládá, že střed kritické kružnice lze nalézt na přímce AB (viz obr. 1).

- Bod A leží v hloubce H pod úrovní paty svahu a ve vzdálenosti $4,5 H$ směrem do svahu, kde H je výška svahu (viz obr. 1);
- Bod B leží v průsečíku úhlů β_1 a β_2 vynášených z paty svahu a z koruny svahu (viz obr. 1). Velikosti úhlů β_1 a β_2 závisí na sklonu svahu α a jsou uvedeny v tab. 1 přiložené k zadání tohoto příkladu.

Do řezu svahu je třeba vykreslit pozici Felleniovy přímky AB a středy otáčení kruhových smykových ploch volit na této přímce (viz obr. 1). V obr. 1 je zakreslena první smyková plocha se středem v bodě S1, pro který byl proveden výpočet stupně stability při řešení vzorového příkladu uvedeného v dalším textu.

¹ tyto síly působí ve směru tečny ke smykové ploše, tedy na rameni rovném poloměru kruhového oblouku;



Obr. 1: Pozice Felleniovy přímky AB a pozice středů otáčení S1 až S5 zvolených ve vzorovém příkladu

1.2 Stupeň stability svahu F_s

Švédská proužková metoda používá pojem stupeň stability F_s definovaný jako

$$F_s = \frac{\text{moment vzdorujících (pasivních) sil } M_p}{\text{moment aktivních sil } M_a} = \frac{s}{\tau}$$

Teoreticky pokud $F_s > 1,0$, svah je stabilní. Ale při $F_s = 1,0$ je svah na hranici své stability a při sebemenším dalším nepříznivém vlivu (zvýšení zatížení svahu, snížení smykové pevnosti, zvýšení hladiny podzemní vody, podkopání paty svahu apod.) dojde k rozvoji svahového pohybu. Proto je požadováno, aby F_s byl vyšší, např. $F_s > 1,5$, přičemž desetinné místo vyjadřuje „míru stabilitní rezervy svahu“.

1.3 Princip výpočtu švédskou proužkovou metodou pro zvolenou smykovou plochu podle ČSN EN 1997-1, NP3

Švédská proužková metoda se aplikuje do výpočtu podle požadavků normy ČSN EN 1997-1 takto:

1.3.1 Dílčí součinitele návrhového přístupu NP3

V současně platné normě Eurokód 7: ČSN EN 1997-1 je předepsáno navrhovat geotechnické konstrukce podle předepsaných návrhových přístupů NP1 až NP3. „Míra stabilitní rezervy“ je v přístupu této normy do výpočtu stability svahů začleněna pomocí **dílčích součinitelů γ** , kterými se redukuje **zatížení** včetně zatížení způsobeného tíhou zeminy, redukuje se charakteristické **parametry zeminy** a **celková stabilita svahu**.

K zadání tohoto příkladu je přiložena také tabulka těchto dílčích součinitelů potřebných pro řešený příklad pro návrhový přístup NP3 (viz Tab. 2). V tomto přístupu jsou dílčí součinitele pro zatížení a účinky zatížení rovny $\gamma_G = 1,0$, stejně jako dílčí součinitele celkové stability svahu $\gamma_{R;e} = 1,0$. „Míra stabilitní rezervy svahu“ je do výpočtu zavedena pomocí dílčích součinitelů materiálu γ_M , kterými se redukuje parametry smykové pevnosti na nižší návrhové hodnoty: efektivní úhel vnitřního tření se redukuje dílčím koeficientem $\gamma_{\phi'} = 1,25$

a efektivní soudržnost se redukuje dílčím součinitelem $\gamma_c' = 1,25$. Do výpočtu se tedy zavádějí návrhové hodnoty smykových parametrů c'_d a ϕ'_d :

$$c'_d = \frac{c'}{\gamma_c'} = \frac{c'}{1,25} \quad a \quad \tan \phi'_d = \frac{\tan \phi'}{\gamma_{\phi'}} = \frac{\tan \phi'}{1,25}$$

V příkladu jsou zadány přímo návrhové parametry efektivní smykové pevnosti.

1.3.2 Míra využití podél zvolené smykové plochy

Norma ČSN EN 1997-1 nepoužívá pojem stupně stability. Místo něho požaduje, aby při výpočtu se zavedením předepsaných dílčích součinitelů γ bylo prokázáno, že

$$M_a \leq M_p$$

Pro snadnější srovnání dosažených výsledků lze hodnotit míru využití V_u jako

$$V_u = \frac{M_a}{M_p} * 100\% < 100\%$$

Tímto postupem pracuje např. program GEO5 běžně používaný ve stavební praxi pro geotechnické výpočty. Míra využití je udávána v procentech a musí být nižší než 100%.

Řeší se příčný řez svahem o tloušťce 1 m. Zemní těleso nad zvolenou kruhovou smykovou plochou se rozdělí na n svislých proužků a stanoví se tíha jednotlivých proužků a další zatížení působící na dílčí proužky (vliv podzemní vody, dalších vnějších zatížení atd.) (viz obr. 2 a 3).

Tíha i -tého proužku (o tloušťce 1 m) se zjednodušeně do výpočtu zavádí jako

$$G_i = h_i * l_i * \gamma_d$$

kde l_i je šířka i -tého proužku, h_i je délka střednice i -tého proužku a γ_d je návrhová objemová tíha zeminy svahu. Obr. 2 ukazuje geometrii a uvažované působení sil na i -tém proužku. Normálová složka síly působící na bázi i -tého proužku je vyjádřena jako

$$N_i = G_i * \cos \alpha_i$$

smyková složka síly působící na bázi proužku je

$$T_i = G_i * \sin \alpha_i$$

a délka smykové plochy i -tého proužku je zjednodušeně stanovena jako lineární spojnice krajních bodů báze proužku (viz obr. 2)

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos \alpha_i}$$

Pokud je smyková pevnost vyjádřena v efektivních napětích a pokud vlivem přítomnosti podzemní vody situaci neovlivňuje tlak vody v pórech, pak podle ČSN EN 1997-1 se zavedením dílčích součinitelů podle návrhového přístupu NP3 je moment aktivních sil

$$M_a = r \sum_{i=1}^n T_i$$

kde r je poloměr smykové plochy, a moment vzdorujících sil M_p je

$$M_p = r \left(\sum_{i=1}^n N_i * \tan \phi'_d + \sum_{i=1}^n c'_d * \Delta l_i \right)$$

Norma požaduje, aby bylo prokázáno, že

$$M_a \leq M_p$$

tedy

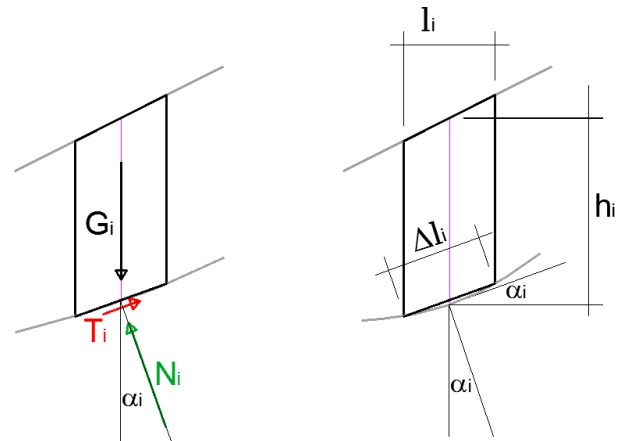
$$r \sum_{i=1}^n T_i \leq r \left(\sum_{i=1}^n N_i * \tan \varphi_{d'} + \sum_{i=1}^n c_{d'} * \Delta l_i \right)$$

obě strany lze vydělit poloměrem r :

$$\sum_{i=1}^n T_i \leq \sum_{i=1}^n N_i * \tan \varphi_{d'} + \sum_{i=1}^n c_{d'} * \Delta l_i$$

Míra využití V_u je

$$V_u = \frac{M_a}{M_p} * 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n N_i * \tan \varphi_{d'} + \sum_{i=1}^n c_{d'} * \Delta l_i}$$



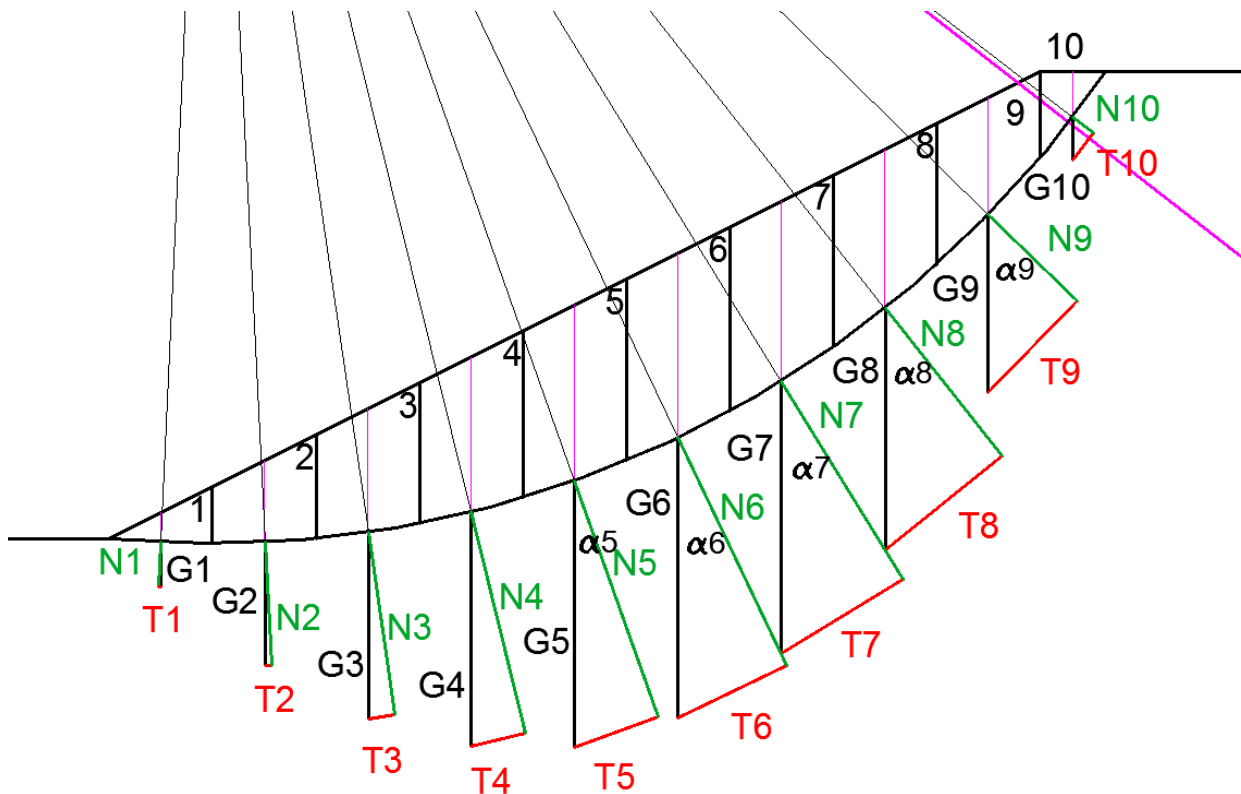
Obr. 2: Švédská proužková metoda - proužek s celkovými působícími silami a geometrie proužku

1.4 Kritická smyková plocha

Postupně se na Felleniově přímce volí další středy otáčení jako středy dalších kruhových smykových ploch. Těleso nad každou další smykovou plochou se rozdělí na proužky, stanoví se tíhy a zatížení jednotlivých proužků, stanoví se velikosti složek N_i a T_i a vyhodnotí se míry využití pro každou smykovou plochu. Na obr. 5 jsou vykresleny dosažené míry využití podél smykových ploch počítané ve vzorovém příkladu pro středy otáčení S1 až S5.

Smyková plocha s nejvyšší mírou využití je tzv. **kritická smyková plocha**. Výpočtem je třeba prokázat, že míra využití podél kritické smykové plochy

$$V_u \leq 100\%$$



Obr. 3: Rozdělení zemního tělesa nad smykovou plochou na dílčí proužky a silové působení na jednotlivých proužcích (vzorový příklad)

2 Vzorový příklad

Zadání

Vyhodnoťte metodou mezní rovnováhy podle Pettersona (= švédská proužková metoda) stabilitu zářezu provedeného v homogenní soudržné zemině. Podzemní voda nebyla v lokalitě zastižena.

Předpokládejte válcový průběh smykových ploch (tj. v řezu je smyková plocha kruhovým obloukem);

Předpokládejte pouze stálé zatížení vlastní tíhou zeminy;

Vyhledání kritické smykové plochy proveďte pomocí Felleniovy metody;

Postupujte podle požadavků 3NP ČSN EN 1997-1.

Rozměry svahu a vlastnosti zeminy:

Výška svahu: $H = 9$ m; Návrhová hodnota objemové tíhy zeminy: $\gamma_d = 19$ kN/m³;

Délka svahu: $L = 18$ m; Návrhová hodnota efektivního úhlu vnitřního tření: $\phi'_d = 29^\circ$;

Návrhová hodnota efektivní soudržnosti zeminy: $c'_d = 4$ kPa;

Postup výpočtu:

2.1 Vykreslení svahu a pozice Felleniovy přímky

Na obr. 1 je vykreslen zadaný svah a do něj vkreslena Felleniova přímka, na které se předpokládá, že leží střed kritické kružnice.

Pozice bodu A: v hloubce $H = 9,0$ m pod patou svahu
ve vzdálenosti $4,5 \cdot H = 4,5 \cdot 9,0 = 40,5$ m směrem do svahu.

Pozice bodu B: sklon zadaného svahu je 1 : 2, tj. sklon svahu α je $26^\circ 34'$

Bod B (viz obr. 1) leží v průsečíku ramen úhlů
 $\beta_1 = 25^\circ$ (vynášeno z paty svahu) a
 $\beta_2 = 35^\circ$ (vynášeno z koruny svahu).

Na Felleniově přímce přibližně nad patou svahu je zvolen první střed otáčení S1 a z něho patou svahu je vedena první smyková plocha tvaru kruhového oblouku.

2.2 Stanovení poměru M_a / M_p pro první smykovou plochu

Pro vyhodnocení stupně stability zářezu se použijí efektivní parametry zemin svahu. Při výpočtu podle normy ČSN EN 1997-1, návrhový přístup NP3, se použijí pro stanovení návrhových hodnot potřebných parametrů dílčí součinitele uvedené v tab. 2 (viz kap. 1.3): Dílčí součinitele pro zatížení a účinky zatížení jsou rovny $\gamma_G = 1,0$, stejně jako dílčí součinitele celkové stability svahu $\gamma_{R;e} = 1,0$. Dílčí součinitele materiálu γ_M , kterými se redukuje parametry smykové pevnosti na nižší návrhové hodnoty, jsou: pro efektivní úhel vnitřního tření $\gamma_{\phi'} = 1,25$ a pro efektivní soudržnost $\gamma_{c'} = 1,25$ (viz kap. 1.3). Tedy:

$$c'_d = \frac{c'}{\gamma_{c'}} = \frac{c'}{1,25} \quad a \quad \tan \phi'_d = \frac{\tan \phi'}{\gamma_{\phi'}} = \frac{\tan \phi'}{1,25}$$

V příkladu jsou zadány přímo návrhové parametry efektivní smykové pevnosti.

Vyhodnocení míry využití $V_u = M_a / M_p$ pro první smykovou plochu je provedeno v tab. 3 (postup viz kap. 1.4): $V_u = M_a / M_p = 68,1\%$.

2.3 Stanovení míry využití M_a / M_p pro další smykové plochy

Postupně byly zvoleny další středy otáčení. Volba středu druhé smykové plochy S2 a rozkreslení proužků nad touto plochou je na obr. 4. V tab. 4 jsou uvedeny míry využití pro smykové plochy 2 až 5. Na obr. 5 je rozkresleno rozdělení na proužky zemních těles nad všemi smykovými plochami. Ve středech S1 až S5 jsou vyneseny ve zvoleném měřítku míry využití stanovené výpočtem v tab. 3 a tab. 4.

Tab. 3: Vyhodnocení stupně stability a míry využití švédskou proužkovou metodou pro 1. smykovou plochu

střed kruhové smykové plochy S1	číslo proužku	šířka proužku l_i (m)	délka střednice proužku h_i (m)	úhel α_i (°)	tíha proužku G_i (kN)	$N_i = G_i \cdot \cos \alpha_i$ (kN)	$T_i = G_i \cdot \sin \alpha_i$ (kN)	délka smyk. plochy v daném proužku $\Delta l_i = h_i / \cos \alpha_i$
poloměr sm. pl. r (m)	1	2	0,57	-2,64	21,7	21,64	-1,00	2,00
21,01	2	2	1,57	2,84	59,7	59,59	2,96	2,00
výpočt. objemová tíha γ_d (kN/m ³)	3	2	2,37	8,32	90,1	89,11	13,03	2,02
	4	2	2,98	13,88	113,2	109,93	27,17	2,06
19	5	2	3,38	19,57	128,4	121,02	43,02	2,12
výpočt. úhel vnitř. tření ϕ_d (°)	6	2	3,55	25,48	134,9	121,78	58,03	2,22
	7	2	3,46	31,68	131,5	111,89	69,05	2,35
29	8	2	3,06	38,36	116,3	91,18	72,16	2,55
výpočt. soudržnost c_d (kPa)	9	2	2,25	45,7	85,5	59,71	61,19	2,86
	10	1,26	0,87	52,51	20,8	12,68	16,53	2,07
4								
Σ						798,53	362,14	22,26

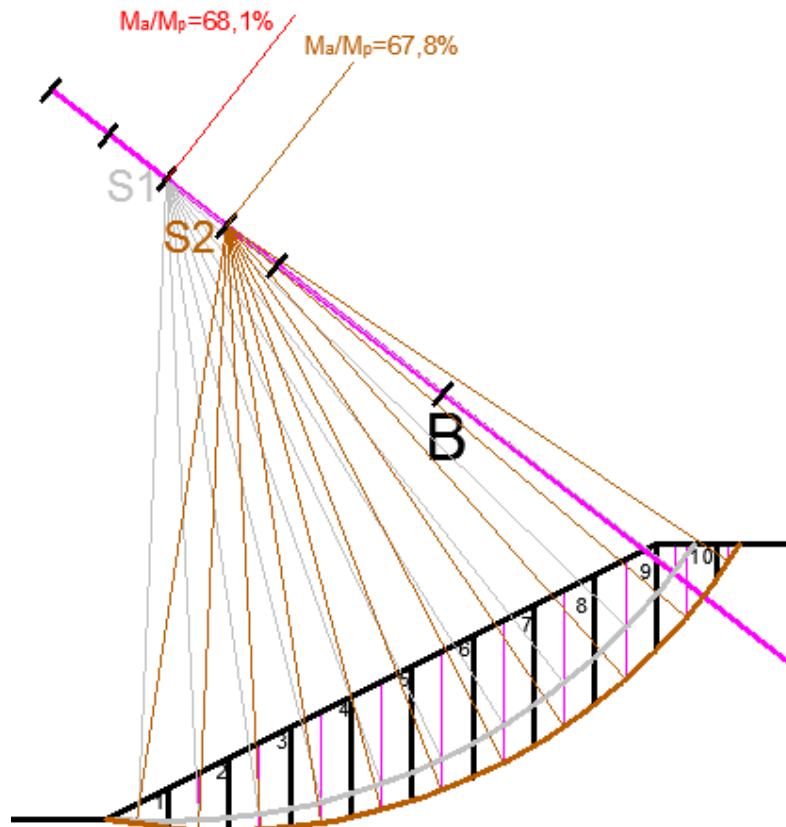
$$M_o = r \cdot \Sigma T_i$$

7 609,32

$$M_p = r \cdot (\Sigma N_i \cdot \tan \phi_d + \Delta l_i \cdot c_d)$$

11 171,36

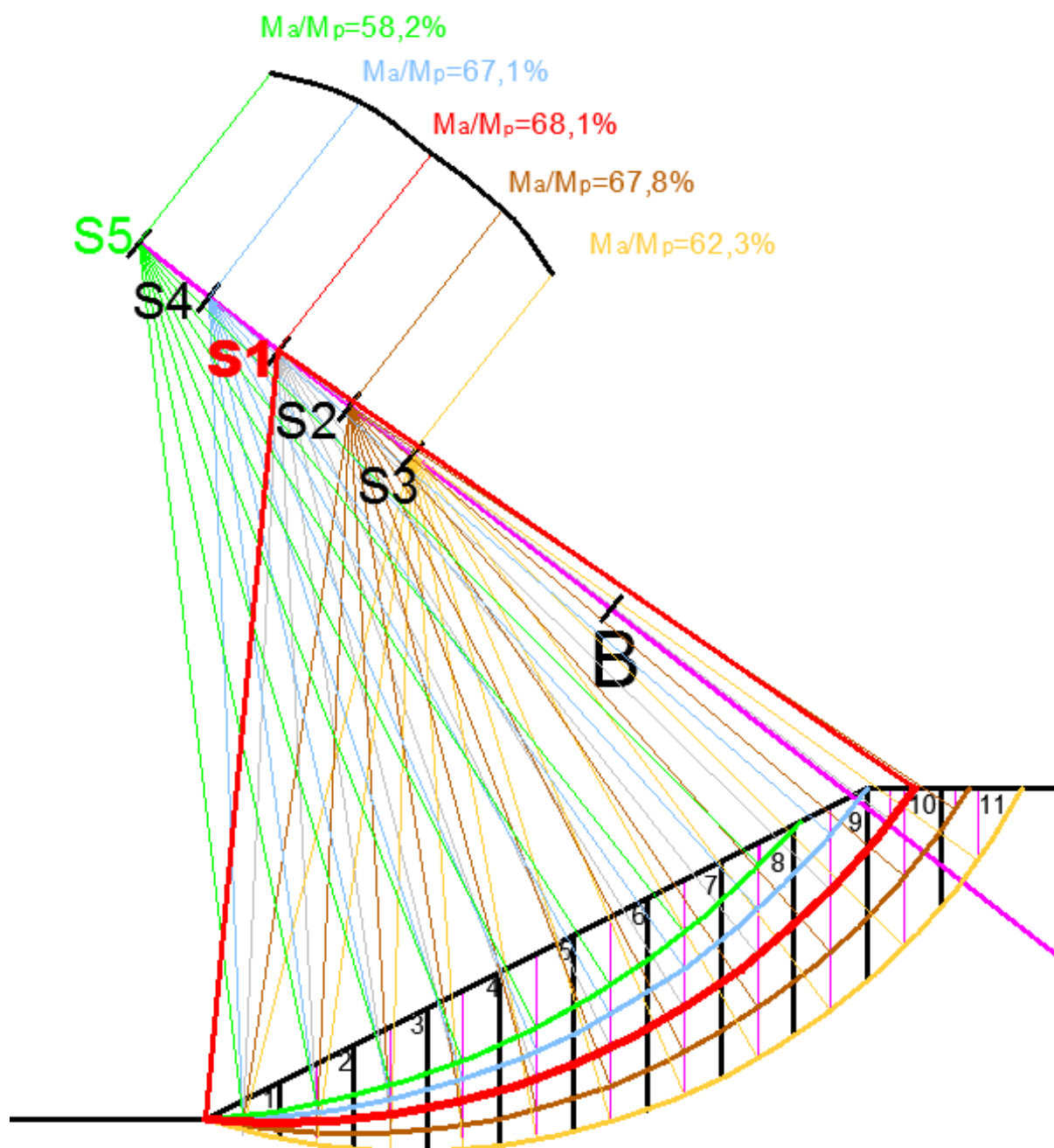
M_o/M_p	68,1%
FS	1,468



Obr. 4: Druhá smyková plocha

Tab. 4: Výpočet stupňů stability a míry využití pro smykové plochy 2 až 5

střed kruhové smykové plochy S5			střed kruhové smykové plochy S4			střed kruhové smykové plochy S3			střed kruhové smykové plochy S2								
poloměr sm. pl. r (m)	číslo proužku	šířka proužku l _i (m)	poloměr sm. pl. r (m)	číslo proužku	šířka proužku l _i (m)	poloměr sm. pl. r (m)	číslo proužku	šířka proužku l _i (m)	poloměr sm. pl. r (m)	číslo proužku	šířka proužku l _i (m)	délka střednice proužku h _i (m)	úhel α (°)	tíha proužku G _i (kN)	M _i =G _i *cos α _i (kN)	T _i =G _i *sin α _i (kN)	délka smyk. plochy v daném proužku Δl _i =l _i /cos α _i
23,92	1	2	22,38	1	2	18,94	1	2	19,80	1	2	0,67	-8,45	25,46	25,18	-3,74	2,02
	2	2		2	2		2	2		2	2	1,87	-2,62	71,06	70,99	-3,25	2,00
výpočet. objemová tíha γ _d (kN/m ³)	3	2	výpočet. objemová tíha γ _d (kN/m ³)	3	2	výpočet. objemová tíha γ _d (kN/m ³)	3	2	výpočet. objemová tíha γ _d (kN/m ³)	3	2	2,86	3,21	108,68	108,51	6,09	2,00
19	4	2	19	4	2	19	4	2	19	4	2	3,65	9,00	138,70	136,99	21,70	2,02
výpočet. úhel vnitř. tření φ _d (°)	5	2	výpočet. úhel vnitř. tření φ _d (°)	5	2	výpočet. úhel vnitř. tření φ _d (°)	5	2	výpočet. úhel vnitř. tření φ _d (°)	5	2	4,22	14,91	160,36	154,96	41,26	2,07
29	6	2	29	6	2	29	6	2	29	6	2	4,57	21,00	173,66	162,13	62,23	2,14
výpočet. soudržnost c _d (kPa)	7	2	výpočet. soudržnost c _d (kPa)	7	2	výpočet. soudržnost c _d (kPa)	7	2	výpočet. soudržnost c _d (kPa)	7	2	7,68	27,34	291,84	259,24	134,03	2,25
4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4,49	34,08	170,62	141,32	95,61	2,41
	9	2		9	2		9	2		9	2	3,94	41,40	149,72	112,31	99,01	2,67
	10	2		10	2		10	2		10	2	2,4	49,67	91,20	59,02	69,52	3,09
	11	0,75		11	0,75		11	0,75		11	0,75	0,58	56,29	8,27	4,59	6,88	1,35
Σ			Σ			Σ			Σ						1 235,23	529,34	24,04
M _o =r*Σ T _i			M _o =r*Σ T _i			M _o =r*Σ T _i			M _o =r*Σ T _i								
3 906,62			5 822,65			11 154,42			10 480,94								
M _p =r*(Σ N _i *tan φ _d + Δ l _i *c _d)			M _p =r*(Σ N _i *tan φ _d + Δ l _i *c _d)			M _p =r*(Σ N _i *tan φ _d + Δ l _i *c _d)			M _p =r*(Σ N _i *tan φ _d + Δ l _i *c _d)								
6 714,54			8 674,71			17 895,01			15 460,90								
M _o /M _p 58,2%			M _o /M _p 67,1%			M _o /M _p 62,3%			M _o /M _p 67,8%								
FS 1,719			FS 1,490			FS 1,604			FS 1,475								



Obr. 5: Rozkreslení řešených smykových ploch a kritická smyková plocha (červeně)

2.1 Kritická smyková plocha a míra využití svahu

Kritická smyková plocha, tj. smyková plocha s nejvyšší mírou využití, je tedy první plocha se středem otáčení S1 (obr. 5, červeně). Její míra využití je výslednou hodnotou pro svah, tj. v tomto řešeném případě pro první plochu:

$$\text{kritické } M_a/M_p = M_a/M_p \text{ 1. kružnice} = 68,1\%$$