

Ing. Evžen P i c h l e r, VÚHU

Stabilitní řešení na skluzných plochách libovolného tvaru v libovolném
vrstevním prostředí pomocí samočinného počítače

Prognóza stability svahu lomu a výsypky souvisí bezprostředně s otvirkou, přípravou a dobýváním ložiska. Aktuálnost stabilitních prognóz vzrůstá ve spojitosti s povrchovou těžbou hluboko uložených zásob hnědého uhlí.

Při stabilitním řešení se vychází ze smykové pevnosti a hmotnosti zemního masivu, bez přímého ohledu na reologické změny. Ve skutečnosti pevnost masivu je proměnnou fyzikálně-mechanickou veličinou, měnící se v čase v závislosti na měnících se hydrogeologických poměrech a nerovnovážných geotermických a napětových stavech.

Stavů napětí v zemním tělese může být nekonečně mnoho, od počátečního až po stav, kdy dojde k porušení. Tuto změnu nelze plynule statickým výpočtem podchytit, proto se stabilitní výpočty provádějí za jistých definovaných stavů napětí, tzv. mezních stavů, ať již deformačních nebo destruktčních.

Praxe ukazuje, že výpočty podle obecných skluzných ploch, zvláště pak v podmínkách předurčených skluzných ploch, nejsou správné. Např. v NDR 75 % všech skluzů v hornictví je zapříčiněno předurčenými skluznými plochami a k této skutečnosti je nutné přihlédnout při volbě průběhu skluzné plochy.

Při řešení principiálně shodných metod Fröhlichovy, Felleniovy a Pettersonovy se vychází z předpokladu homogenního zemního masivu a posunu skluzného tělesa po kruhové skluzné ploše. To znamená, že řešené těleso sestávalo z jednoho druhu zeminy o konstantních smykových parametrech. Pro vrstevnaté zeminy nebo masiv z různých druhů zemin pozbyly tyto metody platnost, nehledě již k tomu, že u těchto metod nebyly splněny všechny tři podmínky rovnováhy.

Jednou z vhodných metod stabilitního řešení v podmínkách obou podkrušnohorských revírů se jeví silová metoda prof. Borowicky používaná v posledních letech v hornictví NDR. Vzhledem k tomu, že se jedná o meto-

díku u nás dosud nepoužívanou, uvedeme stručně její podstatu.

Stabilitní analýza při libovolném tvaru skluzné plochy

Borowicka vyvinul polografický způsob řešení stability svahu, vychází při tom ze tří podmínek rovnováhy sil na skluzné ploše libovolného tvaru. Místo soudržnosti zavedl pomocí úhlu vnitřního tření vnitřní soudržné napětí:

$$p_k = c \cdot \cotg \varphi \quad /1/$$

Soudržná síla na skluzné ploše délky L

$$P_k = L \cdot p_k = L \cdot c \cdot \cotg \varphi \quad /2/$$

Zjištěnou nebo pravděpodobnou skluznou plochu libovolného tvaru rozdělíme na vhodný počet bloků vertikálními řezy, jejichž horizontální a vertikální průmět je znám.

Sklon n-tého bloku

$$\tg \alpha_n = \frac{\Delta Z_n}{\Delta X_n} \quad /3/$$

Vertikální a horizontální složky všech sil působících na skluzné ploše spolu s příslušnými složkami soudržných sil, proudového tlaku, vztlačky vody a případných vertikálních přídavných sil a bočních tlaků, dávají výslednou vertikální sílu V_n a horizontální sílu H_n . Součet dílčích sil V_n a H_n dává celkovou výslednici vnějších sil R_n (obr.1). Výslednici vnějších sil R_n v n-tém prvku rozložíme do normální složky n_n a aktivní smykové složky t_{tn} a dostaneme:

$$n_n = V_n \cdot \cos \alpha_n - H_n \sin \alpha_n = (V_n - H_n \cdot \tg \alpha_n) \cos \alpha_n \quad /4/$$

$$t_{tn} = V_n \sin \alpha_n + H_n \cos \alpha_n = (V_n \cdot \tg \alpha_n + H_n) \cos \alpha_n \quad /5/$$

Normální síly v n-tém prvku, počítáme-li se stupněm stability k_s , vyvolávají odporující třecí sílu:

$$t_{wn} = \frac{n_n \operatorname{tg} \varphi_n}{k_s} \quad /6/$$

Zatímco vektorový součet sil n_n a t_{tn} dává výslednici R_n , není tato podmínka splněna u sil n_n a t_{wn} , protože nejsou stejně velké, nýbrž v horní části skluzné plochy převládají aktivní síly t_{tn} a v dolní části naopak pasivní síly t_{wn} . Ve složkovém obrázci (obr.2), kde N je výslednicí normálových sil n_n , T_t výslednicí aktivních sil t_{tn} a T_w výslednicí pasivních sil t_{wn} dochází k uzávěrové chybě F . Tuto uzávěrovou chybu odstraníme zvýšením normálových sil n_n a tím i třecích sil t_{wn} . Je-li zvýšení normálových sil n_n provedeno proporcionálně, pak uzávěrová chyba má stejný směr jako výslednice sil R . To však znamená, že součet t_{tn} a t_{wn} od normály, vzhledem k celkové výslednici R musí být roven nule. Z této podmínky a ze vztahu /6/, když úhel δ znamená odklon výslednice sil R od svislice, dostaneme:

$$t_{tn} \cdot \cos(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{k_s} n_n \operatorname{tg} \varphi_n \cos(\alpha_n + \delta) = 0 \quad /7/$$

a dále

$$k_s = \frac{\sum n_n \operatorname{tg} \varphi_n \cdot \cos(\alpha_n + \delta)}{\sum t_{tn} \cdot \cos(\alpha_n + \delta)} \quad /8/$$

S použitím výrazu /4/, /5/

$$k_s = \frac{\sum (V_n - H_n \operatorname{tg} \alpha_n) \cos \alpha_n \cdot \cos(\alpha_n + \delta) \operatorname{tg} \varphi_n}{\sum (V_n \operatorname{tg} \alpha_n + H_n) \cos \alpha_n \cdot \cos(\alpha_n + \delta)} \quad /9/$$

Odstraníme-li výraz $(\alpha_n + \delta)$ z rovnice /9/ a po úpravě dostaneme konečný výraz pro výpočet stupně stability svalu:

$$k_s = \frac{\sum (V_n - H_n \operatorname{tg} \alpha_n) k_\alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{\sum (V_n \operatorname{tg} \alpha_n + H_n) \cdot k_\alpha} \quad /10/$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sum H_n}{\sum V_n} \quad /11/$$

$$k_{\alpha} = \frac{1 - \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha_n}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} \quad /12/$$

Diference smykových sil v jednotlivých proužcích podle obr.1:

$$\Delta_n = t_{tn} - \frac{1}{k_s} n_n \operatorname{tg} \varphi_n \quad /13/$$

Vektorový součet obsahuje uzávěrovou chybu F, kterou obdržíme sečtením diferencí ve směru výslednice sil R:

$$F = \sum \Delta_n \sin(\alpha_n + \delta) = \sum t_{tn} \sin(\alpha_n + \delta) - \frac{1}{k_s} \sum n_n \sin(\alpha_n + \delta) \operatorname{tg} \varphi_n \quad /14/$$

Ve vztahu pro výpočet stability svahu podle /10/ jsou splněny všechny vnější a vnitřní podmínky rovnováhy sil. Z toho důvodu nemusíme zjišťovat difference Δ_n ani přídatné normálové síly Δn_n , případně třecí síly Δt_{vn} .

Při praktickém výpočtu stupně stability není třeba rozdělovat skluzné těleso na pravidelné bloky. Skluzné těleso se rozdělí na výpočetní (dílní) bloky podle geometrie obrysu svahu, geometrie strukturálních vrstev, volné hladiny podzemní vody, geometrie oblastí s proudovým tlakem a podle omezující skluzné plochy.

Zbývá určit velikost vertikálních a horizontálních sil.

Výpočet vertikálních a horizontálních sil působících na skluznou plochu

Již v úvodu jsme se zmínili o tom, že skluzné plochy bývají často předurčeny geologickou stavbou masívu, a také mohou vzniknout v závislosti na těžebním postupu skrývky. Předurčené skluzné plochy obojího typu mají nepříznivý vliv především proto:

- že jsou de facto plochami, po nichž nejpravděpodobněji dojde k porušení svahu (skluzu)
- že je v nich snížena smyková pevnost
- že způsobují koncentraci napětí a deformace ve svahu, což spolu s ostatními faktory může být příčinou progresivního porušení

- že na těchto plochách se zvyšuje vlhkost se všemi nepříznivými důsledky
- že v souhrnu urychlují proces porušení stability svahu.

S některými známými nepříznivými vlivy na stabilitu svahu počítáme při výpočtu vertikálních V_n a horizontálních sil H_n :

$$V_n = \epsilon_n + v_n + p_{kn} \cdot \Delta x_n \quad /15/$$

$$H_n = h_n + p_{tn} - p_{kn} \cdot \Delta z_n \quad /16/$$

kde:

- ϵ_n - tíha zeminy a vody
- v_n - přídavná vertikální síla
- p_{kn} - vnitřní soudržné napětí
- h_n - horizontální síla (boční tlak)
- p_{tn} - proudový tlak
- $\Delta x_n, \Delta z_n$ - příslušné souřadnicové rozdíly

V případě, že smyková plocha prochází zvodněným obzorem se vztla-
kovou nebo volnou vodou, je v oblasti bloku mezi skluznou plochou a
hladinou podzemní vody počítáno s objemovou hmotností zeminy pod vo-
dou γ' . Objemová hmotnost zeminy (případně plně nasycené) a ponořené
pod hladinu podzemní vody, kdy je nadlehčována hmotou vody vytlačené
zeminou.

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

při :

$$\gamma_w \doteq 10 \text{ kN.m}^{-3}$$

$$\gamma' = \gamma - 10$$

Boční tlak h_n lze vyjádřit rovnici:

$$h_n = \frac{1}{2} \lambda_n \gamma H^2$$

kde λ_n - koeficient skutečného vodorovného napětí v zemině definovaný
jako poměr vodorovného a svislého normálního napětí.

Nejspolehlivěji určíme napjatost zemního masivu přímým měřením in situ. Poněvadž experimentální metody jsou časově i finančně náročné uchylujeme se k početnímu zjišťování napjatosti podle vztahu:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Musíme však mít na zřeteli, že ve skutečnosti je koeficient vodorovného napětí variabilní. Při zvětšování vertikálního napětí σ_1 a zmenšování horizontální deformace se zvyšuje boční tlak. V tomto případě koeficient vodorovného napětí se blíží konstantní hodnotě. Při odlehčení závisí velikost bočního tlaku na překonsolidaci, porušení masivu a plasticitě zeminy, koeficient vodorovného napětí se zvyšuje a může dosáhnout hodnoty 1 i více do té doby, dokud pasivní síly zeminy jsou dostatečné, aby nedošlo k jejímu porušení.

Přídavná vertikální síla se uvažuje při statickém a dynamickém zatížení svahu od dobývacích, zakládacích a dopravních zařízení. Jak ukazuje praxe je nutné počítat se statickým, příp. i dynamickým namáháním zeminy při dobývání v hlubokém řezu.

Proudový tlak při filtračním proudění se vypočte za předpokladu rovnoměrného filtračního proudění ve vodorovném směru.

$$p_{\text{tn}} = I \cdot m \cdot l \cdot \gamma_w = \sin \alpha' \cdot m \cdot l \cdot 10$$

kde: I - hydraulický spád
 m - mocnost vrstvy s proudovým tlakem
 l - délka vrstvy

Působení dílčích vertikálních a horizontálních sil je zřejmé z obr.3. Na dalším obrázku 4 je sestavena přehledná tabulka pro stabilitní řešení skluzného tělesa rozděleného na dílčí bloky. Takovýmto postupem je možné provádět stabilitní výpočet jednoduchého skluzného tělesa. Pro řešení stability svahů hlubokých lomů a vysokých výsypkových těles byl zpracován Výpočetní technikou v Mostě program k zpracování na samostatném počítači.

Posouzení stability svahu zemního tělesa na samočinném počítači

Projekt stabilitního řešení na samočinném počítači umožňuje výpočet podle:

- zadaného tvaru skluzných ploch
- libovolného obrysu zemního tělesa
- libovolného průběhu a množství strukturních vrstev (max. 25 vrstev)
- hydrostatického a proudového tlaku vody
- horizontálního (bočního) tlaku na stěnu bloku
- přídatného statického nebo dynamického zatížení svahu.

Aby se sestavený výpočetní program dal použít pro libovolný tvar zemního tělesa a libovolný průběh strukturních vrstev, zadává se úloha ve vlastní souřadnicové síti. Počátek souřadnicové soustavy se umísťuje do paty zemního tělesa tak, aby těleso spočívalo v jednom kvadrantu. Pro vyšetření průsečíku obrysu svahu, strukturních vrstev, hladiny vody, oblastí s proudovým tlakem a skluzných ploch je nutné zadávat jednotlivé body v jednotném pořadí podle stoupající x-ové souřadnice. Ve vyšetřovaném profilu se identifikují příslušné strukturní vrstvy geomechanickými parametry:

- objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy nebo plně nasycené zeminy ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
- totální a residuální hodnota úhlu vnitřního tření (ve stupních)
- soudržnost zeminy (kPa)

Zadávají se jak totální, tak residuální hodnoty smykové pevnosti. Při úklonu skluzné plochy $\alpha_n < 6^\circ$ proběhne výpočet podle totálních parametrů a při $\alpha_n > 6^\circ$ podle residuálních parametrů. Dále probíhá výpočet bez ohledu na úklon skluzné plochy podle zadaných residuálních a totálních parametrů, a s ohledem nebo bez ohledu na boční tlak. Výpočetní sestava obsahuje těchto šest výpočetních variant pro každou z deseti možných kombinací průběhu skluzných ploch.

Rozdělení skluzného tělesa na elementární výpočetní bloky podle polygonálních bodů je zřejmé z příkladu na obr.5.

Závěr

Dosud používané výpočetní metody neumožňovaly zohlednit komplex geologických, hydrogeologických a geotechnických parametrů. Řešení svahu lomu nebo výsypky podle libovolného průběhu skluzné plochy, libovolného složení a průběhu strukturních vrstev ve skluzném tělese s nepříznivým vlivem hydrostatického a proudového tlaku vody, bočního tlaku a statického, příp. dynamického zatížení svahu umožňuje, v článku uvedená, modifikovaná metoda prof. Borowicky.

Zvláště výhodná je u této výpočetní metody možnost použití samočinného počítače. Tímto způsobem se usnadní a zpřesní nejen vlastní řešení geomechanického problému, ale též navržení vhodného svahu lomu nebo výsypky. Výpočetní program pro samočinný počítač je v současné době ověřován.

Recenzoval: Ing. Antonín Jedlička

Literatura

Ing. E. Pichler a kolektiv, 6.1977 - Současný stav a další vývoj aplikované geomechaniky na povrchových lomech, VÚHU Most

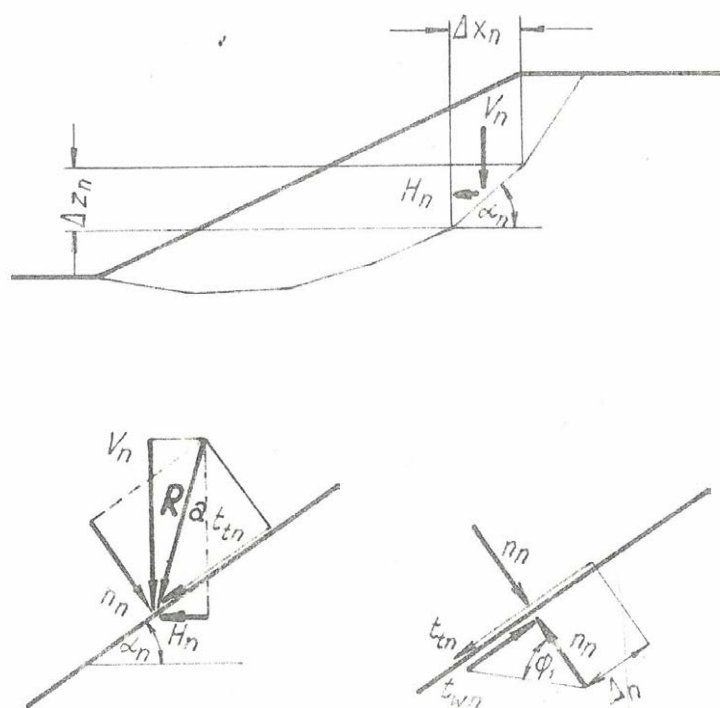
Prof. H. Borowicka, 9.1970, Ein statisch einwandfreies Verfahren zur Ermittlung der Standsicherheit einer Böschung
Der Bauingenieur, Heft 9, Wien

Dipl. ing. Hasso Scheffler, 2.1972, Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Baggerböschungen auf Prüfflächen allgemeiner Form nach Borowicka
Neue Bergbautechnik, Heft 2, Leipzig

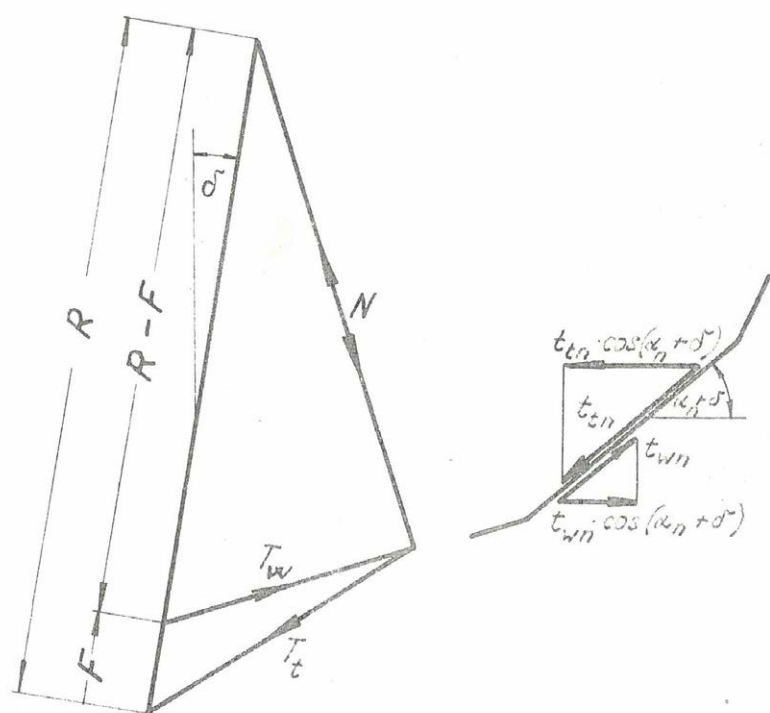
S h r n u t í

Stabilitní řešení na skluzných plochách libovolného tvaru v libovolném vrstevním prostředí pomocí samočinného počítače

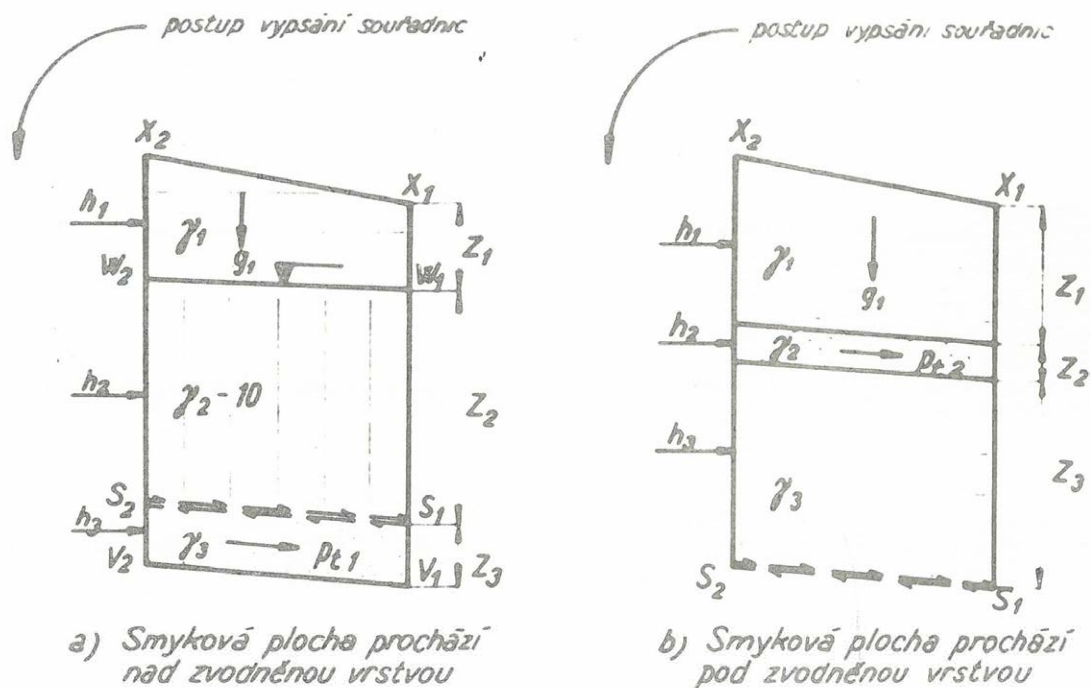
V článku je uvedena stabilitní analýza při libovolném tvaru skluzné plochy podle metody prof. Borowicky. Je uveden též postup výpočtu vertikálních a horizontálních sil působících na zjištěnou nebo předpo-



Obr. 1 Aktivní a pasivní síly na skluzné ploše



Obr. 2 Silový obrazec s uzávěrovou chybou F



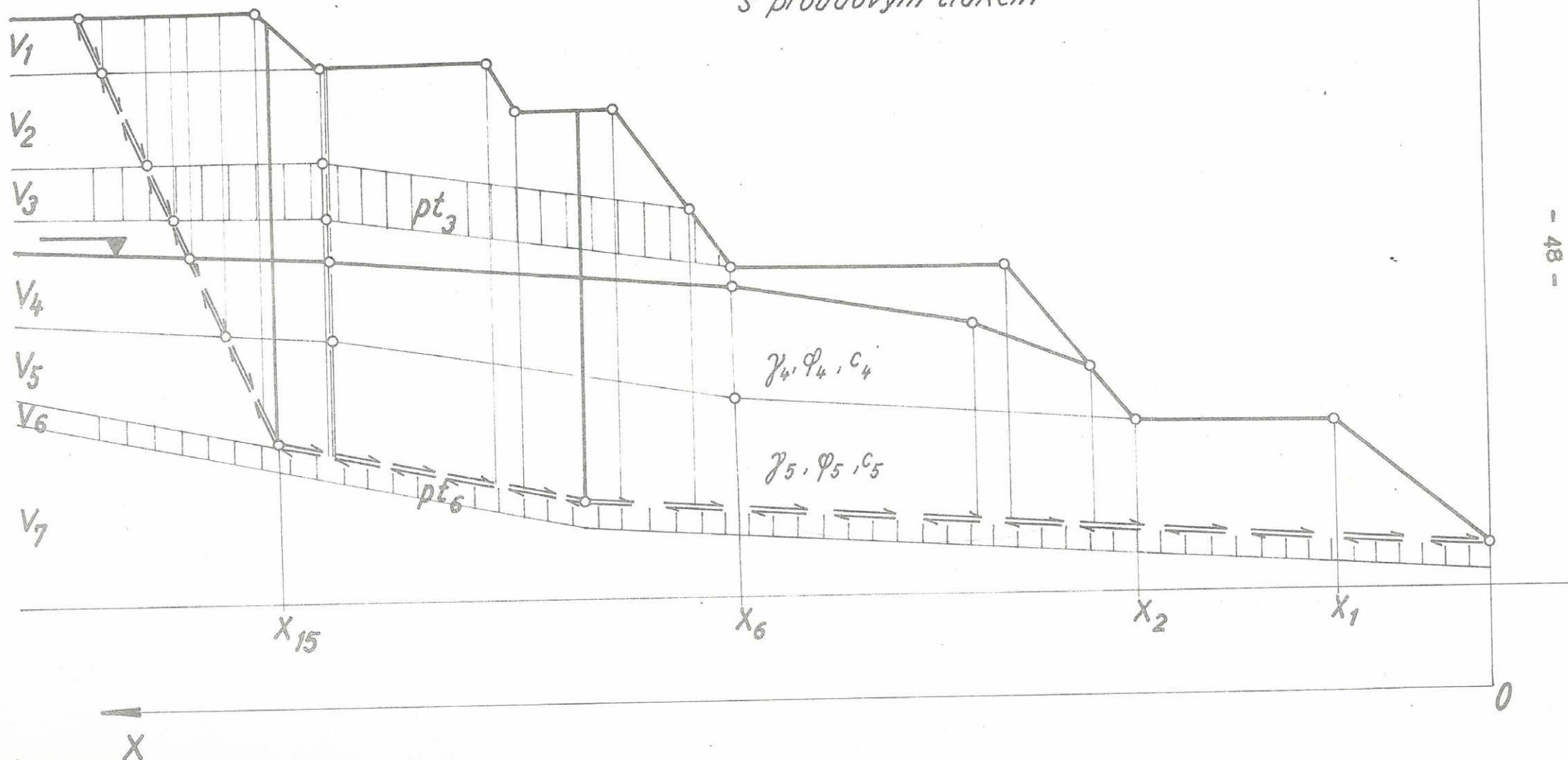
Obr. 3 Působení vertikálních a horizontálních sil v zemním bloku

Výpočetní blok	ΔX_n	ΔZ_n	$\operatorname{tg} \alpha_n$	g_n	V_n	p_{kn}	$p_{kn} \cdot \Delta X_n$	V_n	h_n	p_{tn}	$p_{kn} \cdot \Delta Z_n$	H_n
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			2:1					4+5+7				9+10+11
1												
2												
.								$\sum V_n$				$\sum H_n$

Výpočetní blok	$V_n \operatorname{tg} \alpha_n$	$H_n \operatorname{tg} \alpha_n$	$V_n - H_n \operatorname{tg} \alpha_n$	$V_n \operatorname{tg} \alpha_n + H_n$	k_α	$\operatorname{tg} \varphi_n$	$\frac{(V_n - H_n \operatorname{tg} \alpha_n) \cdot k_\alpha \operatorname{tg} \varphi_n}{k_\alpha}$	$\frac{(V_n \operatorname{tg} \alpha_n + H_n) \cdot k_\alpha}{k_\alpha}$
	13	14	15	16	17	18	19	20
	3 · 8	3 · 12	8 - 14	12 + 13			15 · 17 · 18	16 · 17
1								
2								
.	$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sum H_n}{\sum V_n} \quad k_\alpha = \frac{1 - \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha_n}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_n} \quad k_s = \frac{\sum (V_n - H_n \operatorname{tg} \alpha_n) \cdot k_\alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{\sum (V_n \operatorname{tg} \alpha_n + H_n) \cdot k_\alpha}$							

Obr. 4 Výpočetní schéma stabilitního řešení

- body geometrie obrysu svahu, strukturních vrstev, vodní hladiny, skluzné plochy a uzavřené vrstvy s proudovým tlakem



Obr. 5 Příklad rozdělení skluzného tělesa na elementární bloky