

Ing. Evžen P i c h l e r, CSc, VÚHU

Předběžný výpočet stability svahu výsypek s přihlédnutím
k podmínkám zakládání

Metoda pro výpočet stability svahu je podmíněna mechanismem vzniku a průběhu deformací ve výsypkovém tělese podle podmínek zakládání. Kromě empirických metod tvarování výsypkových svahů používaných ve VÚHU ještě v nedávné době nebyly k dispozici takové metody výpočtu stability svahu, které by umožňovaly zavést do výpočtu kromě základních fyzikálně-mechanických vlastností zeminy založené do tělesa výsypky další údaje jako např. kontaktní pevnost mezi výsypkou a podložkou nebo některé vlastnosti měkké zeminy, se kterou se tak často setkáváme u neodvodněných výsypek nebo v podmínkách zakládání na neúnosnou podložku. Ve většině případech se řeší stabilita svahů výsypek z jílovitých zemín, které vykazují nízkou smykovou pevnost a jsou zakládány na neúnosné nebo zvodněné podložky, přičemž často dochází ke změně původních vlastností sypaniny.

Výpočetní metoda tedy musí alespoň částečně postihnout vliv zmenšení smykové pevnosti na kontaktu výsypkových zemín s její podložkou již při malých výškách výsypek, zpravidla v mezích 10-25 m. Je nutné přihlédnout ke stavu podložky, neúnosným vrstvám v tělese výsypky i v jejím podzákladí a změnám v důsledku navyšování výsypky zakládáním dalších etází. V blízkosti vytvořených skluzných ploch je smyková pevnost 2-3x nižší než byla v původním stavu. Ve vrstvě měkce-plastické zeminy o mocnosti několika centimetrů se koncentruje smykové napětí a jsou-li ukloněny ve směru k patě svahu, vyvolávají lokální deformaci svahu a mohou vést k porušení stability svahu. Je-li pevné podzákladí výsypky, prochází skluzné plochy výsypkovým tělesem. Skluzné plochy procházející podzákladím jsou vázány na výskyt vrstvy s nižší smykovou pevností než vykazuje výsypkové těleso.

Podle dosavadního stavu prozkoumanosti granulometrické složení výsypkových zemín spíše ovlivňuje konzolidační proces než stabilitu výsypkových těles. Je však nutné mít na zřeteli, že při vyplnění mezer sypaniny vodou a působení přetvárné energie, přecházejí do měkce-plastického stavu především jemné částičky zeminy a velké kusy si zachovávají po delší dobu původní strukturu. Výsypkové zeminy s převládajícím podílem jemné frakce jsou tedy náchylnější k plastickému tečení.

Při zatěžování vodou nasycené výsypkové zeminy zpravidla při bázi nasypané etáže je část zatížení přenášena skeletem zeminy a část vodou uzavřenou v mezerách sypaniny. To proto, že zatěžování výsypky je vzhledem k možnému pomalému rozptýlení mezerového tlaku vody zpravidla příliš rychlé. Při dosažení určité výšky výsypky se vytvoří souvislá vrstva zeminy s měkce-plastickou až tekutou konzistencí. Na těchto dělicích rovinách působí kapalně tření a tyto plochy při koncentraci smykového napětí umožňují vzájemný pohyb částiček zeminy a jsou také často zdrojem počátečních projevů nestability. Stabilita výsypek zakládaných na jinak pevnou podložku je tak podmíněna těmito vrstvami vyskytujícími se na rozhraní propustné výsypky s nepropustným podzákladem. Podobně vznikají vrstvy zeminy s nízkou smykovou pevností na rozhraní pracovních plání nebo nestabilních svahů s nově zakládanou výsypkovou etáží. Je to dáno především jímací schopností jílu podmiňující akumulaci podstatného množství srážkových vod v povrchových vrstvách výsypky do hloubky několika metrů. Tato jímací schopnost nezávisí pouze na stáří a struktuře výsypkové zeminy, migraci vzduchu v mezerách sypaniny, ale též na stavu zeminy, intenzitě a tvaru srážek. Přesypáním výsypky další etáží je tedy k dispozici potřebná přetvárná energie pro vznik následných plastických zón v tělese výsypky. S těmito zónami je také nutné počítat jako s predisponovanými skluznými plochami, neboť mají vlhkost vyšší než okolní sypanina a tím nižší smykovou pevnost. Velmi nepřízní-

vé právě ze stabilitního hlediska jsou trvalé přítoky podzemních vod z přilehlého podpovodí výsypných prostorů nebo z podloží uhelné sloje. Nejsou-li přítoky do výsypky spolehlivě drénovány, přecházejí značné objemy zemin do měkce-plastického stavu zvláště v místech neodvodněných depresí.

Výšku výsypky při níž vznikají plastické zóny a je mobilizován pórový nebo mezerový tlak vody a tření klesá v závislosti na nelineárním průběhu smykového napětí $\tau_{\max} = f / \sigma$ můžeme teoreticky odvodit z podmínky mezní únosnosti ideálně soudržné zeminy charakterizované $\tau_m = c$, $\varphi = 0$. Mezní zatížení vodorovného povrchu

$$p_m = q + 2\tau / 1 + \omega /$$

Je-li pasivní /svislé/ přitížení $q = 0$ a úhel pootočení skluzných čar $\omega = \frac{\pi}{2}$ obdržíme

$$p_m = 2c / 1 + \frac{\pi}{2} / = 5,14 c \quad /1/$$

Pak maximální výška při níž lze ještě počítat se svahovým úhlem $32-36^\circ$ podle obr. 1 odvodíme z rovnice

$$p_m = \sigma_v - u_v = \gamma_v H_{\max} - u_v$$

$$H_{\max} = \frac{5,14 c + u_v}{\gamma_v} \quad /2/$$

Empirický vztah pro maximální výšku svahu byl odvozen pro komořanskou oblast SHR v závislosti na vlhkosti zeminy v % objemu

$$H_{\max} = \frac{329,060}{w_n - 16,370}$$

Maximální výška výsypky při níž je zachován shodný sklon svahu se sypným úhlem je limitována rozsahem vytváře-

jícího se plastického jádra pod korunou svahu. Při dosažení této výšky se začíná v jádru vytvářet přechodná oblast mezi pásmem aktivního a pasivního tlaku. Rozšířením plastických zón směrem k patě svahu se progresivně snižuje smyková pevnost zeminy a vytváří se souvislá skluzná plocha, na které poklesla původní vrcholová pevnost na residuální. Naznačeným pochodem tvarování svahu, překročením konzolidačního napětí /viz obr.2/se zeminy porušují kontraktantně a přetvářejí intragranulárně.

S výškou nasypaného tělesa zakladačem dochází k přemísťování zeminy z místa dopadu zeminy do středu tělesa, kde následkem strukturní ^{ta}městability se kusy zeminy vytlačují k patě sypaného tělesa. Nejstrmější sklon svahu vykazuje nasypané těleso před dosažením kritické výšky, kdy se začínají v jádru tělesa porušovat a přetvářet úlomky jílovců. Překročením této kritické výšky tělesa jsou vytvářeny podmínky pro vznik souvislé měkce-plastické zóny pod celým svahem a následně porušení stability svahu. Svah při dosažení a překročení kritické výšky je demonstrován na případě pokusného zakládání úseku č. 8 přeložky řeky Bíliny /obr.3/.

V uvedených stabilitních podmínkách použití klasického vztahu K. Terzaghiho pro určení stupně bezpečnosti,

$$k_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n T} / \sum_{i=1}^n N \operatorname{tg} \varphi + \sum_{i=1}^n c L / \quad /3/$$

které předpokládá algebraické sčítání pasivních a aktivních sil, vede k přecenění stupně bezpečnosti. Při takovém postupu se přeceňuje smyková pevnost sypaniny ve vrchní části svahu, která nemůže být využita, protože v této části svahu jsou značná tahová napětí.

V souladu s mechanismem porušení stability svahu, kdy v patní části svahu převládají síly bránící v pohybu a v horní části svahu síly vyvolávající pohyb, rozdělíme svážné těleso

vertikálním řezem lomovým bodem skluzných ploch procházejících tělesem výsypky a po kontaktu výsypky s podložkou /obr. 4/.

Na blok aktivního a pasivního zatížení působí normální složky P_1 a P_2

$$N_1 = P_1 \cos \tilde{\sigma}_1 \quad N_2 = P_2 \cos \tilde{\sigma}_2$$

smykové složky sil P_1 a P_2

$$T_1 = P_1 \sin \tilde{\sigma}_1 \quad T_2 = P_2 \sin \tilde{\sigma}_2$$

soudržné síly

$$c_1 L_1 \quad c_2 L_2$$

reakce

$$R_1 = P_1 \cos \tilde{\sigma}_1 \operatorname{tg} \varphi_1 \quad R_2 = P_2 \cos \tilde{\sigma}_2 \operatorname{tg} \varphi_2$$

a boční síly

$$E_1 = E_2$$

jejichž odklon od horizontály je ψ .

Je-li úklon skluzné plochy procházející tělesem výsypky $\tilde{\sigma}_1 > \varphi_1$ a skluzné plochy při bázi výsypky s podložkou $\tilde{\sigma}_2 < \varphi_2$, platí rovnice rovnováhy

$$\frac{T_1 - N_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - c_1 L_1}{\cos / \tilde{\sigma}_1 - \psi / + \sin / \tilde{\sigma}_2 - \psi / \operatorname{tg} \varphi_1} \left[\cos / \psi - \tilde{\sigma}_2 / - \right. \\ \left. - \sin / \psi - \tilde{\sigma}_2 / \operatorname{tg} \varphi \right] + T_2 - N_2 \operatorname{tg} \varphi_2 - c_2 L_2 = 0 \quad /4/$$

kde c_1, c_2 je soudržnost zeminy v tělese výsypky a na kontaktu výsypky s podložkou

φ_1, φ_2 je úhel vnitřního tření sypaniny a kontaktní plochy výsypky s podložkou

L_1, L_2 je délka rovinných skluzných ploch v zóně aktivního a pasivního tlaku.

Problematické je stanovení odklonu bočních sil od horizontály. V rovnici mezní rovnováhy je možné uvažovat $\psi = 0$ a soudržnost v zóně aktivního tlaku c_1 a kontaktní soudržnost $c_2 = 0$. Jde-li o výpočet stability tělesa na značně ukloněných plochách, je možné položit $\psi = \sigma_1$ nebo $\psi = \sigma_2$, $c_1 = 0$, kde $\sigma_1 = \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right]$. Nejpravděpodobnější se jeví odklon bočních sil od horizontály o $\varphi_1 = \psi$.

Klasickou podmínku rovnováhy /3/ můžeme zapsat ve tvaru

$$\frac{\frac{\operatorname{tg} \varphi}{k_s} \sum_{i=1}^n N + \frac{c}{k_s} \sum_{i=1}^n L}{\sum_{i=1}^n T} = 1 \quad /5/$$

Při určení výšky a sklonu svahu se musí počítat se stupněm bezpečnosti $k_s \geq 1,3$, který se zavádí do smykové pevnosti

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{výp.}} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{k_s} \quad c_{\text{výp.}} = \frac{c}{k_s}$$

Rovnici rovnováhy sil /4/ doplníme stupněm bezpečnosti k_s a podmínkou $\psi = \varphi_1$ a obdržíme

$$\begin{aligned} & \frac{T_1 k_s - N_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - c_1 L_1}{\left[\cos \left[\sigma_1 - \varphi_1 \right] / k_s + \sin \left[\sigma_1 - \varphi_1 \right] \operatorname{tg} \varphi_1 \right] k_s} \cdot \\ & \cdot \left[\cos \left[\varphi_1 - \sigma_2 \right] / k_s - \sin \left[\varphi_1 - \sigma_2 \right] \operatorname{tg} \varphi_2 \right] - \\ & - \frac{N_2 \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2 L_2}{k_s} + T_2 = 0 \quad /6/ \end{aligned}$$

Stupeň bezpečnosti svahu výsypkového tělesa pak určíme z rovnice /6/.

Přesnější rovnici pro výpočet mezní výšky svahu odvodil Okatov. Vychází z obdobného principu rozdělení skluzného tělesa, který byl použit v rovnici /4/ a /6/, avšak skluzné plochy 1. a 2. osnovy mají zakřivený průběh. Svah tělesa je v rovnováze, když blok aktivního tlaku P_1 je v rovnováze s reakcí R_1' a R_2' a blok pasivního tlaku P_2 s reakcí R_3' a R_4' . Rovinný úsek skluzné plochy $\overline{AD}$ je rovnoběžný s ukloněnou podložkou a zakřivený úsek $\overline{DC}$ je odkloněn od rovinného úseku $\overline{AD}$ o úhel

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi - \varphi'}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi} \quad /7/$$

kde φ, φ' je úhel vnitřního tření v sypanině a na kontaktu výsypky s podložkou.

Skluzná plocha 1. osnovy $\overline{CD}$ se v bodě C odklání od povrchu svahu o úhel $\omega = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ a v bodě D o úhel $|\theta + \delta'|$. Skluzná plocha 2. osnovy $\overline{ED}$ je v bodě E odkloněna od horizontály o úhel ω a v bodě D o úhel $|2\omega - \delta' - \theta|$. Z podmínek statické rovnováhy sil, působících na blok aktivních sil, ve směru linie N_2-N_3 a po vyloučení některých neznámých sil dostaneme

$$R_2' = P_1 \frac{\sin |\varepsilon - \varphi|}{\cos} - c \cdot \overline{CD} \quad /8/$$

$$\text{kde } \varepsilon = \frac{\omega + \delta' + \theta}{2}$$

V bloku pasivních sil určíme velikost reakce R_3' vzhledem k linii a-a. Po vyloučení neznámé R_4' dostaneme

$$R_3' = \frac{c \cdot \overline{ED} \sin |\varepsilon - \delta' + \varphi' - \varphi| + c' \cos \varphi' \cdot \overline{AD} + P_2 \sin |\varphi' - \delta'|}{\cos |\varepsilon - \delta' + \varphi'|}$$

Po odvození neznámých sil P_2 , $P_1 = P - P_2$, $\check{C}\check{D}$, $\check{E}\check{D}$ ve vztahu /9/ obdržíme zkrácenou rovnici pro výpočet mezní výšky svahu

$$H = \frac{c}{\gamma} \cdot \frac{A}{B} \left[1 + \sqrt{1 - B / \frac{f'}{A}} \right] \quad /10/$$

kde

$$A = \frac{\sin \varepsilon}{\cos |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi'|} \cdot \left\{ \frac{\pi |\omega - \varepsilon| \sin |\alpha - \tilde{\sigma}| \sin |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi' - \varphi|}{90^\circ \sin (\omega - \varepsilon) \cos (\varepsilon - \alpha - \varphi)} \cdot \right. \\ \cdot \left[\cos \tilde{\sigma} \cos \varphi + k \left[\frac{\cos \varepsilon \sin |\alpha - \tilde{\sigma}|}{\cos |\varepsilon - \alpha - \varphi|} - \frac{\sin \tilde{\sigma} \sin |\varepsilon - \varphi|}{\sin \varepsilon} \right] \right] + \\ \left. + 2 \frac{c'}{c} \cos \varphi' \sin |\varepsilon - \varphi| \left[\sin |\varepsilon - \tilde{\sigma}| - k \frac{\sin \tilde{\sigma}}{\sin \varepsilon} \right] \right\}$$

$$B = \frac{\sin |\varepsilon - \varphi| \sin |\alpha - \tilde{\sigma}|}{\cos \varphi} \left\{ \frac{2 \sin |\varepsilon - \varphi|}{\sin \alpha} \left[\sin |\varepsilon - \tilde{\sigma}| \cdot \right. \right. \\ \cdot \left. \sin \varepsilon - k \sin \tilde{\sigma} \right] - \frac{\sin 2\varepsilon \sin |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi' - \varphi|}{\cos |\varepsilon - \alpha - \varphi| \cos |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi'|} \cdot \\ \cdot \left[\frac{\sin |\varepsilon - \alpha|}{\sin \alpha} - \frac{k}{\sin \varepsilon} \right] \cdot \left[\cos |\varepsilon - \tilde{\sigma} - \varphi| + \right. \\ \left. + k \frac{\sin |\alpha - \tilde{\sigma}|}{\cos |\varepsilon - \alpha - \varphi|} \right] \left. \right\}$$

$$f' = \cos \varphi \left\{ \frac{c'}{c} \frac{\cos \varphi' \sin \varepsilon}{\cos |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi'|} + \frac{\pi |\omega - \varepsilon|}{180^\circ \sin |\omega - \varepsilon|} \cdot \right. \\ \cdot \left[\frac{\sin \varepsilon \sin |\alpha - \tilde{\sigma}| \sin |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi' - \varphi|}{\cos |\varepsilon - \alpha - \varphi| \cos |\varepsilon - \tilde{\sigma} + \varphi'|} - \sin \tilde{\sigma} \right] \left. \right\}$$

$$k = \frac{\frac{\pi / \omega - \varepsilon /}{90^\circ} - \sin 2 / \omega - \varepsilon /}{4 \sin^2 / \omega - \varepsilon /}$$

Použití rovnice mezní výšky svahu /10/ je vhodné nejen v podmínkách ukloněné podložky výsypky, ale též jsou-li výsypkové etáže zakládány na nestabilní svahy. Jako příklad uvedeme svah zakládané etáže ve dvou vrstvách a na ní navazující vyšší zakládané etáže. Nižší etáž byla zakládána z vhodných zemin pro stavbu vysoké výsypky, ale z větší části na starý nestabilní svah. Vyšší etáž byla složena z nevhodných zemin zakládaných na nestabilní svah, který zůstal přes dva roky obnažen. Na rozhraní výsypkových těles se starým svahem byla předpokládána zóna s nízkou smykovou pevností a navrhovaný nový svah výsypky byl výpočtem prokázán jako nestabilní.

Správnost výpočtu se potvrdila po založení přitěžující etáže zakládané s mírným převyšováním vůči pracovní pláni /obr.6/. Porušena byla stabilita celého svahu, přičemž spodní tvarované těleso z vhodných zemin bylo odtlačeno po pracovní pláni i s pásovým dopravníkem. O tom, že svážný pohyb byl podmíněn plastickými deformacemi, na rozhraní výsypkových těles, svědčí rozdělení svážného tělesa na řadu menších bloků. Po ustálení svážných pohybů je možné předpokládat rovnovážný stav každého bloku. Jak se také ukázalo, nejpříznivější stabilitní podmínky pro řešení mezního rovnovážného stavu dává vypuklý tvar svahu.

Podle ještě nedokončených výzkumů se ukazuje, že vyjádření smykové pevnosti rovnicí $\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ pozbývá platnosti již při poměrně malých výškách výsypky. Pro obvyklé výšky výsypek již v současné době bude zřejmě platit $\tau = \tau_{\max.}$. Výsypkový svah tedy bude stabilní pokud se nerozšíří plastické deformace do patní části svahu. Mocnost vrstvy výsypky

při níž k tomuto jevu dochází je možné vypočítat podle

$$m = \frac{\sigma_n'}{\cos^2 (\sigma + \theta)}$$

kde σ_n' je mezní normální napětí, při kterém smyková pevnost je vyjádřena $\tau_{\max}$

θ je úhel odklonu skluzných ploch náležející aktivní a pasivní oblasti skluzného tělesa.

Na většině vnějších výsypkách jsou etáže zakládány s odstupem několika let, tedy za podmínek rozšíření plastických zón pod patní část svahu. V závislosti na stavu zakládaných zemin pozorujeme velmi ploché generální sklony svahů, které se pohybují v mezích 1:6,0 až 1:12,0. Nízké využití výsypných prostorů zvláště vynikne porovnáme-li skutečnou mocnost výsypkového tělesa za mezního rovnovážného stavu na ukloněné podložce z empiricky odvozené rovnice

$$m = \frac{51,688}{\sigma^0 - 2,842}$$

Všeobecně nízké využití výsypných prostorů vyvolává potřebu rozšíření stávajících výsypných prostorů nebo projektování nových vnějších výsypek. Domníváme se, že těžiště řešení nepříznivých důsledků nestabilních výsypkových těles spočívá v možnostech zlepšení stabilitních podmínek v dostatečném časovém předstihu před zahájením stavby výsypkového tělesa.

S h r n u t í

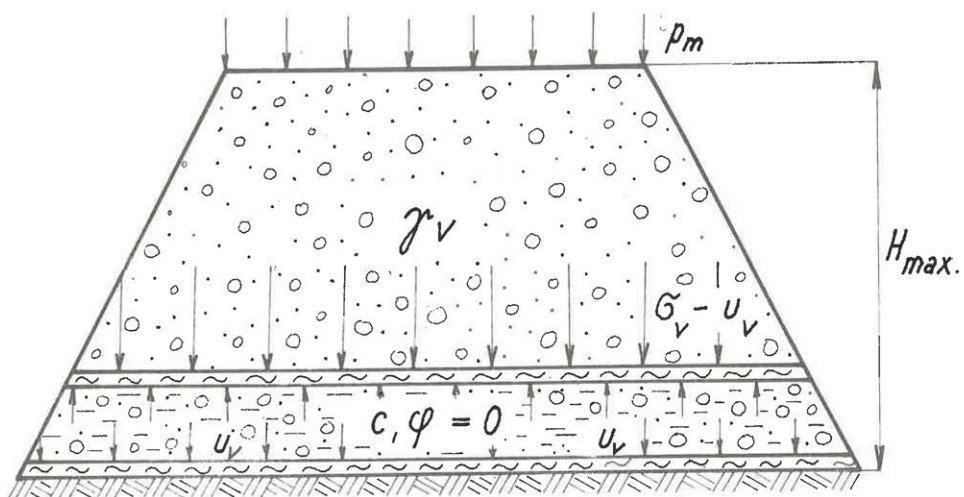
Předběžný výpočet stability svahu výsypek s přihlédnutím k podmínkám zakládání

V článku jsou analyzovány převládající podmínky zakládání, ze kterých je nutné vycházet při řešení stability sva-

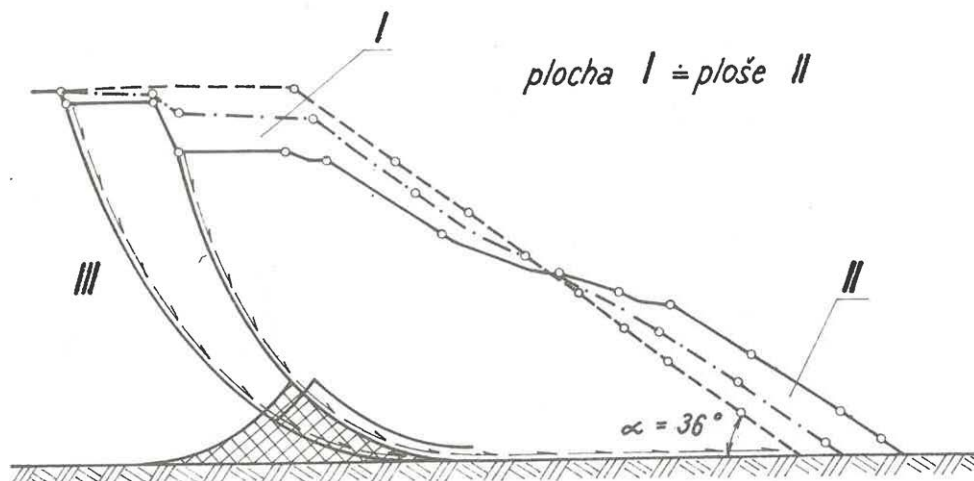
hů. Ukazuje se, že stabilitní řešení musí vycházet ze smykové pevnosti sypaniny a kontaktní smykové pevnosti, přičemž nemusí jít o kontaktní plochu výsypky s podložkou, ale také o rozhraní právě zakládané zeminy se starým svahem. Těmto požadavkům vyhovují metody vycházející z rovnováhy sil na ukloněných skluzových plochách při rozdělení skluzného tělesa na blok aktivních a pasivních sil. Doporučované výpočetní postupy jsou ověřeny pozorovanými přetvárnými procesy v tělese výsypek při poměrně malých výškách.

Literatura

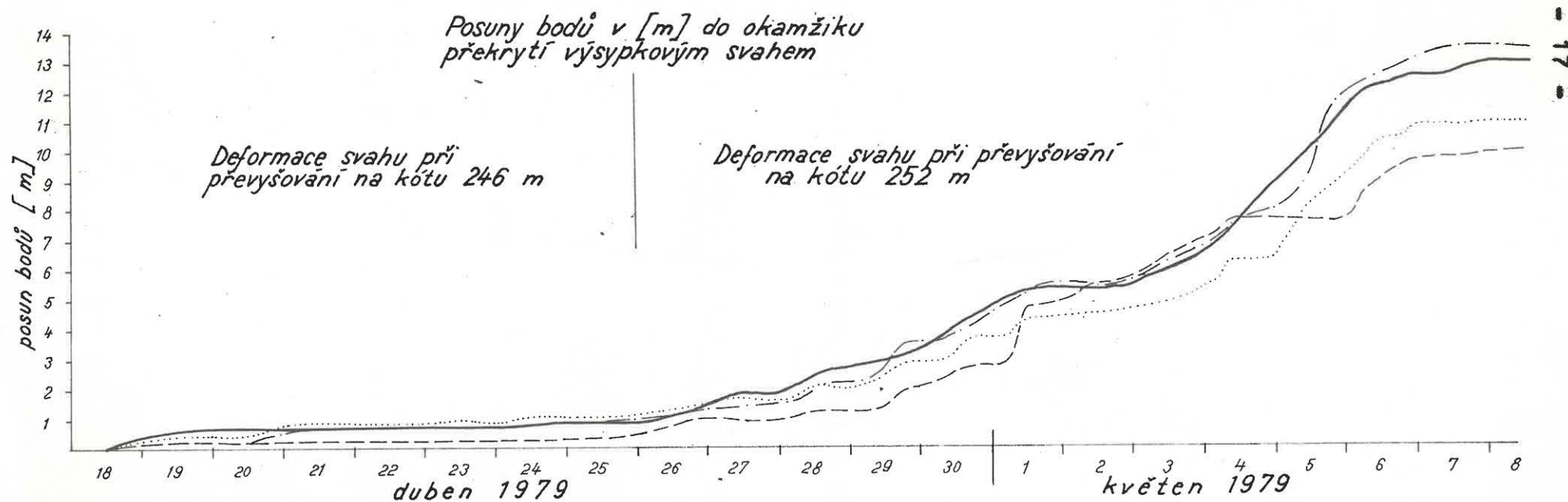
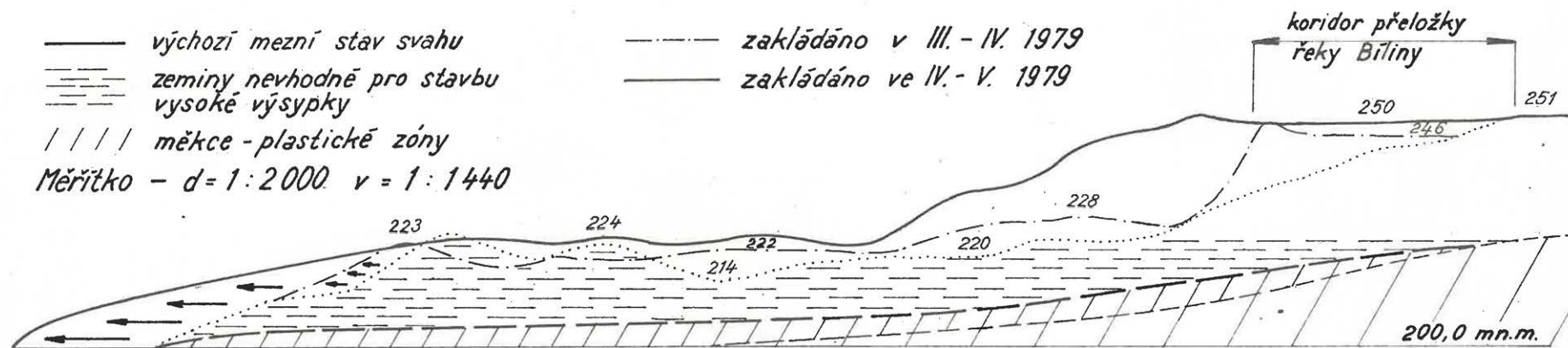
- Pichler E. a kolektiv : Výzkum změn probíhajících v tělese výsypky, ovlivňujících její tvarování a konzolidaci - IV.etapa - Teoretická a empirická analýza změn vlastností sypaniny.
Dílčí zpráva VÚHU, V. 1979
- Okatov R. P. : Ustojčivost otvalov na kontaktnom naklonnom osnovanii. Gornyj žurnal IVUZ 6/1979, str. 23 - 27.
- Krjačko O. J. : Upravlenie otvalami otkrytych gornych rabot. Moskva "Nedra", 1980.
- Panjukov P. N. : Geomechanika otvalnych rabot na karierach. Moskva "Nedra", 1972.
- Přednášky semináře "Stabilitní řešení svahů a jejich zabezpečení", VÚHU Most 1981, str. 120-147.



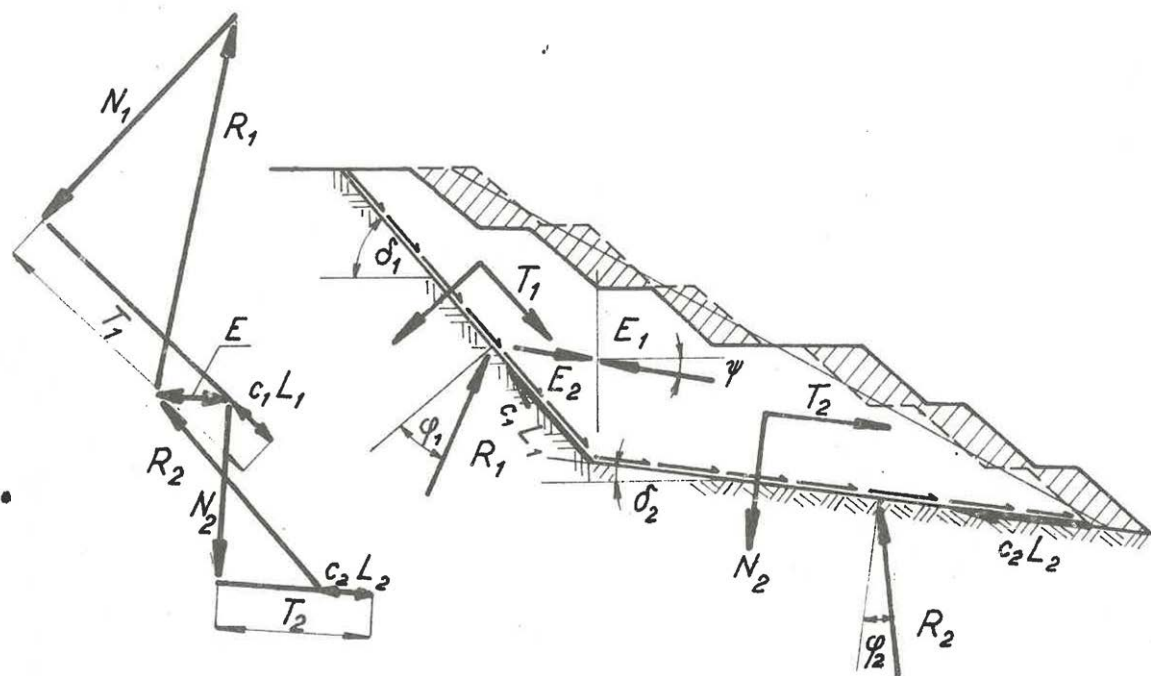
Obr. 1 Maximální výška výsypky z podmínky mezní únosnosti ideálně soudržné zeminy



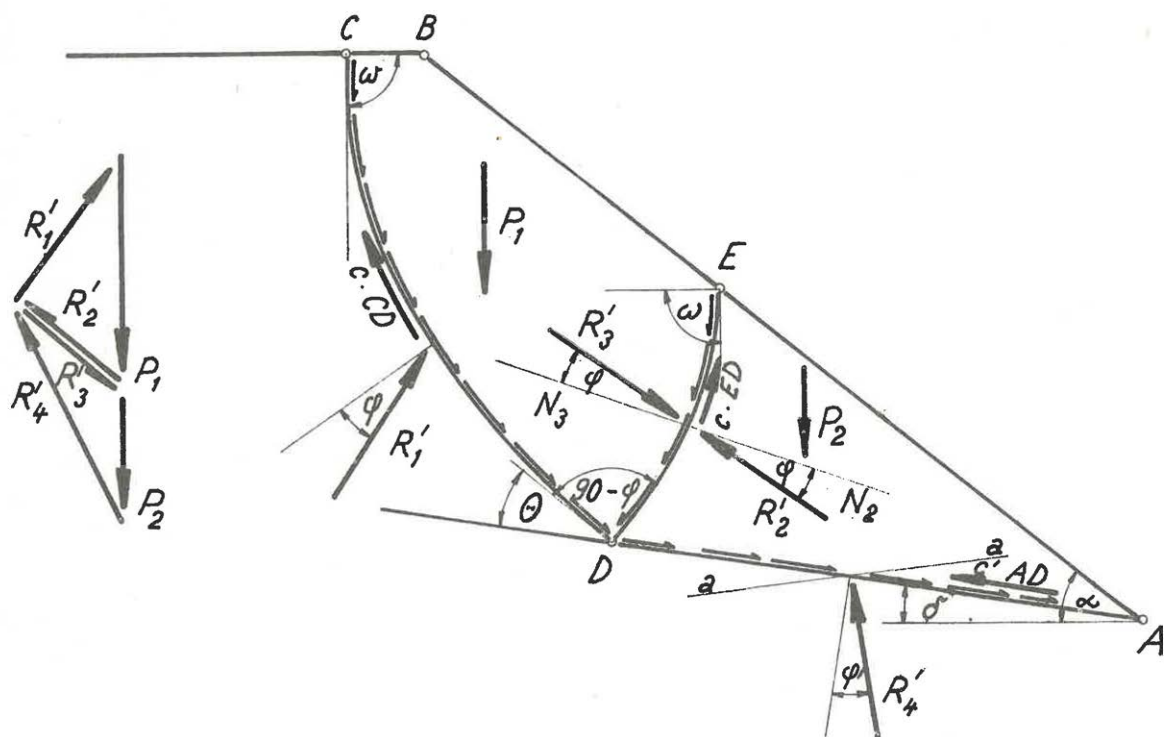
Obr. 2 Tvarování svahu v momentě, kdy je dosažena kritická výška



Obr. 3 Rovnovážné stavy výsypkového tělesa při překročení kritické výšky svahu

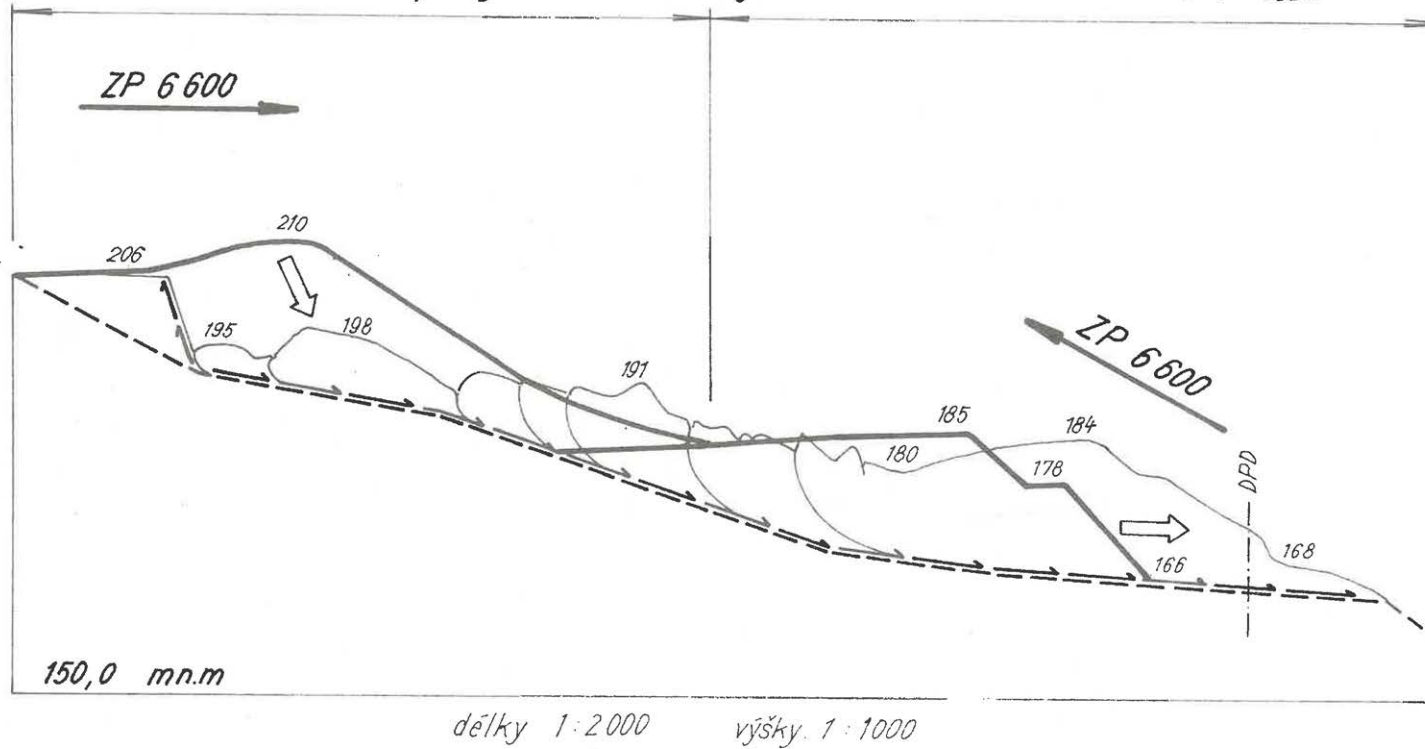


Obr. 4 Schéma k výpočtu stability výsypky na ukloněné podložce



Obr. 5 Schéma pro výpočet výšky svahu výsypky na ukloněné podložce

Hloubkově zakládaná a převyšovaná etáž Výškově zakládaná a tvarovaná etáž



Obr. 6 Deformace svahu výsyvky po předurčených ukloněných plochách