

Ing. Evžen P i c h l e r, CSc., VÚHU

Progresivní porušování nadložního masivu v bočním svahu lomu
a při výchozu uhelné sloje

Konečnému projevu svahového skluzu na bočních svazích lomu nebo výchozech uhelné sloje předchází stádium, ve kterém dochází k přetvárným procesům vyvolanými změnami napětí v zemním masivu. Tyto procesy souvisejí s postupným odtěžováním nadložního masivu a jsou zvláště výrazné v anizotropním prostředí okrajových částí hnědouhelných pánví. Novější postupy stabilitního řešení umožňují do jisté míry postihnout i tyto změny v masivu vyvolanými rozsáhlými těžebními zásahy. V podstatě se přihlíží k mechanismu progresivního porušování masivu, podmíněného strukturními jednotkami a jejich kontaktními posuny. Výzkumu progresivního porušení stability svahu v báňských podmínkách jsou věnovány práce /1,2/.

Na základě dlouhodobých pozorování svážných pohybů bylo možné vytypovat tři deformační stádía: počáteční, aktivní a usměrněné. Počáteční stádium deformace je charakterizováno vznikem zón porušení nebo jejich rozšířením souvisejícím se změnou geostatického tlaku masivu. Často již v tomto stádiu pozorujeme drobné posuny na mezivrstevních styčných plochách nadloží-hlava nebo pata sloje nebo v meziložních vrstvách. Příznaky jsou obdobné jako u svahového skluzu, nejsou však spolehlivě vizuálně postihnutečné. Mezní plastická deformace je závislá na dráhách přetvoření masivu, sklonu svahu a jeho výšce H i na řadě dalších geotechnických faktorů. Vyjádříme ji závislostí rychlosti přetvoření na smykovém napětí podle Fisenka

$$v = v_0 e^{E_0 / (\tau - \tau_0)}$$

kde E_0 - modul přetvárnosti

v_0 - počáteční rychlost posunu odpovídající počátečnímu smykovému napětí τ_0 .

S použitím rovnic

$$\begin{aligned} \tau &= \lambda H \gamma \sin \alpha \\ \tau_0 &= \lambda H_0 \gamma \sin \alpha_0 \\ \Delta z &= v_{\text{str.}} \cdot t \end{aligned}$$

a po úpravách dostaneme

$$H \gamma \sin \alpha = \ln \frac{E_0 \cdot \Delta z_{\text{mez.}}}{t}$$

kde kromě známých symbolů je $\Delta z_{\text{mez.}}$ mezní pokles porušovaného masivu v předpolí lomu, t doba po kterou je nezbytné zabezpečit svah jako stabilní.

Analýzou měření vykonávaných v předpolí VČSA od roku 1975 byl prokázán dominantní horizontální posun po strukturních plochách. Tento posun byl pozorován do značných vzdáleností za horní hranou lomu a byl ovlivňován postupem skrývkové fronty. Ke kontinuálnímu pohybu dochází ve všech úrovních svahu; největší byl pozorován v blízkosti potenciální skluzné plochy, aniž došlo k porušení stability svahu. Svah se deformuje vlivem narůstajících vnitřních smykových napětí a ve vrchní části svahu dochází ke vzniku tahových trhlin /obr. 1/. Relativní horizontální posun lze přibližně stanovit z rovnice :

$$\Delta l = \frac{\gamma \cdot H \cdot \tan \varphi_r}{E_h} \cdot \frac{L}{H}$$

kde E_h - horizontální Yongův modul /150 - 300 mNm⁻³/

L - délka strukturní plochy podél níž dochází k pohybu

φ_r - reziduální úhel vnitřního tření.

Prakticky lze otázku mezních deformací řešit na základě dlouhodobých pozorování speciálními měřidly, jejich vyhodnocením a zpracováním ve funkčních závislostech

$$\begin{aligned} v &= f_1 / E_0, \alpha / \\ \Delta z &= f_2 / E_0, \alpha, t / \\ \Delta l &= f_3 / E_h, \alpha, \varphi_r / \end{aligned}$$

Pro aktivní stádium deformace svahu je charakteristická stále rostoucí rychlost posunu a zřetelné vnější příznaky porušení svahu. Průběh i ukončení aktivního stádía porušení svahu závisí na geologické stavbě území a vlastnostech hornin v mezivrstevních predisponovaných plochách. V anizotropním masivu s pevnou strukturou probíhá aktivní stádium deformace po plochách s nejmenší smykovou pevností, na kterých se koncentrují maximální smyková napětí. Pokles smykové pevnosti je zvláště zřetelný v plastických zónách, z nichž se rychle šíří proces progresivního porušování. Jen v ojedinělých případech nekončí aktivní stádium deformace havarijní situací a stav se přechodně konzoliduje. Vlivem nerovnoměrného rozložení napětí odlehčováním masivu na predisponovaných plochách je rozšíření deformací specifickým jevem. V případě ukloněné potenciální plochy je deformacemi postižen masiv před patou svahu. Je-li příčinou progresivního porušení plastická vrstva zemin, vytvoří se v horní části svahu aktivní klín, který se zatlačuje do plastického prostředí a způsobuje vytlačování patní části svahu. I v tomto případě je masiv prostoupen diskontinuitami souhlasného směru s povrchem svahu. Obecně je horninový blok nad odlučnou spárou ve stabilní poloze, když smykový odpor v této spáře je větší, než aktivní složka pohybu

$$V_t = V \sin \beta + \sigma$$

kde β je průměrný sklon odlučné plochy

σ odklon výslednice všech sil V od svislice směrem k patě svahu.

Smykový odpor je dán vztahem

$$T = \tau_0 b + V \cos \beta + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

kde V je výslednice všech sil

b je šířka vytknutého horninového pruhu.

Stupeň bezpečnosti je pak roven

$$k_s = \frac{\tau_0 b 1 + v \cos \beta + \sigma' \tan \varphi}{v \sin \beta + \sigma'}$$

Pro účely stabilitního řešení svahů, podléhajících progresivnímu porušování, modelujeme přetvárné procesy nejčastěji smykovými zkouškami. V tomto směru je ověření geomechanických vlastností nadložních hornin průkopnickou prací SG /3,4/. Byly zkoumány dva základní typy nadložních hornin. Jílovce nižšího stupně zpevnění, tj. jílovce porušené do hloubky 40,0 m od terénu, které byly buď v dosahu oxidačního působení vody a vzdušného kyslíku nebo periglaciálního klimatu během čtvrtohor a diageneticky zpevněné pevné až tvrdé jílovce.

Přehled indexových a klasifikačních vlastností zkoumaných typů jílovců uvádíme v tabulce :

V l a s t n o s t i jílovců	I. typu	II. typu
Objemová hmotnost v sušině kNm^{-3}	14,2	16,1
Objemová hmotnost přirozená kNm^{-3}	18,6	20,0
Měrná hmotnost skeletu kNm^{-3}	26,5	26,4
Pórovitost v %	45,3	33,8
Stupeň nasycení	0,95	1,00
Pevnost v prostém tlaku MPa	< 0,63	> 4,5
Vlhkost v sušině v %	30,5	17,0
Mez tekutosti W_L	104,1	60,9
Mez vláčnosti W_p	33,1	28,1
Index plasticity I_p	71,0	26,9

Vzhledem ke všesměrné struktuře jílovců a různému sklonu a druhu ploch diskontinuity se zřejmě skutečným podmínkám blíží jen některé zkoušky. Počáteční rozptyl naměřených hodnot smykové pevnosti se snižuje v povrchové fázi, kdy se začne

uplatňovat usměrněná struktura. Některé zjištěné hodnoty efektivní vrcholové a reziduální smykové pevnosti SG při rychlosti smykání 0,002 mm/min uvádíme v následujících tabulkách.

I. typ jílovců

Druh zkoušky	Podmínky zkoušky	Obor komorového normálového napětí MPa	Průměr nebo rozměr vzorku mm	Efektivní smyková pevnost	
				vrchol. φ' c'	reziduál. povrchová + φ' c'
triaxiální	CIU	<0,8	38,1	28 110	12 52
triaxiální	CID	<0,8	101,3	14,3 57	- -
krabicová	neusměrněná	<0,6	60,0	19,5 88	14,5 20
krabicová	po puklině	<1,6	60,0	8,5 13	5,3 0
polní	neusměrněná	<0,15	700x700 x200	16,0 18	14 ⁺ 13 ⁺

II. typ jílovců

Druh zkoušky	Podmínky zkoušky	Obor komorového normálového napětí MPa	Průměr nebo rozměr vzorku mm	Efektivní smyková pevnost	
				vrcholová φ' c'	reziduál. povrchová φ' c'
triaxiální	CIU	<0,8	38,1	28,1 128	14,5 ⁺ 31 ⁺
triaxiální	CIU	<7,0	38,1	28,5- -12,0 >500	- -
krabicová	neusměrněná	<2,0	60,0	14,1 420	7,5 ⁺ 14,5 ⁺
krabicová	po puklině	<2,0	60,0	12,9 44	7,5 9
krabicová	vrstevná plocha	<1,0	60,0	17,1 13	7,0 10
polní	neusměrněná	<0,6	700x700 x200	27,0 100	14,5 ⁺ 35 ⁺

Při uvedených zkouškách byly sledovány i další podmínky dráh napětí a přetvoření jak při zatěžování tak i odlehčování. Výsledky zkoušek jednoznačně ukázaly, že k mobilizaci maximálního smykového odporu dochází při deformaci $< 1,5 \%$. Ve skutečnosti však dochází k poklesu smykové pevnosti již při nižších horizontálních deformacích, řádově 0,01 až 0,1 %. Tento poměrně rychlý pokles pevnosti po dosažení vrcholu s podstatným rozdílem mezi vrcholovou a reziduální pevností charakterizuje uvedené typy jílovců jako náchylné k progresivnímu porušení. Přitom bylo zjištěno kontraktantní chování jílovců při vyšších oborech zatěžování než 0,40 až 0,60 MPa. Se vzrůstajícím průměrem vzorku a zřejmě i počtem ploch diskontinuity různé orientace souvisí i pokles smykové pevnosti. Podle dále uvedených skutečných případů progresivního porušení svahů se jeví výsledky krabicových a polních zkoušek pravděpodobnější.

Zjišťovaná pevnost na puklině nebo vrstevní ploše je blízká reziduální hodnotě smykové pevnosti. Vzájemný pohyb odlišných jednotek o několik milimetrů ať již po puklině nebo staré skluzové ploše vede k vysoké orientaci jílových částic v hraniční zóně, která může být jen 10–15 mm silná.

Ve shodě s výsledky výzkumů v zahraničí se ukázalo, že u puklinových, křehkých jílovců na rozdíl od intaktních se s časem zmenšuje efektivní soudržnost a to na hodnoty blízké nule. Vrcholový úhel vnitřního tření prakticky s časem neklesá, určitý pokles lze zaznamenat u reziduálního třecího úhlu plastických zemín. Geostatický tlak podstatně ovlivňuje efektivní i totální úhel vnitřního tření a s narůstajícím tlakem se třecí úhel snižuje. Mobilizace pevnosti ve větších hloubkách je pomalejší při větších deformacích, což má za následek překročení vrcholové pevnosti a její pokles na reziduální v okrajových částech skluzové plochy. Vznik pásem snížené smykové pevnosti má za následek přetížení sousedních oblastí a rozšiřování smykových posunů s využitím vrstevných ploch a ploch diskontinuity, jak bylo prokázáno

uvedenými zkouškami.

Zvlášť náchylné k progresivnímu porušení jsou výchozy slojového souvrství s ukloněnými plochami souhlasného směru se svahem. Pokud nebudeme uvažovat počáteční smykovou pevnost τ_0 , pak z rovnice rovnováhy smykového odporu a aktivní složky pohybu vyplývá, že je svah ve stabilní poloze, je-li

$$\beta + \delta \leq \varphi$$

Odtud plyne i objasnění příčin porušení stability svahu, je-li uhelná sloj ukloněna o více než 6° , když reziduální úhel vnitřního tření kontaktní plochy na mezivrstevním rozhraní činí 5 až 7° .

V báňské praxi se nejčastěji setkáváme s možností progresivního porušení svahu po kontaktní ploše nadloží-sloj, nacházející se v blízkosti hlavy sloje nebo v meziložních a podložních vrstvách. Typický případ progresivního porušení svahu byl pozorován při dotěžování skrývky na bočním svahu velkolomu Čs. armády koncem roku 1974. Počátečním stádiem deformace byly zasaženy první čtyři skrývkové řezy. V předpolí lomu do vzdálenosti 60 m od horní hrany I. řezu byly pozorovány trhliny a na pracovní pláni IV. řezu docházelo ke zvedání plošiny s kolejovými rošty. Jak v odlučné části, tak v patní části svahové deformace byly naměřeny horizontální a vertikální posuny řádově 1 až 2 m. Šlo tedy o pokročilé stádium progresivního porušení svahu, které se projevilo v horní části svahu vysokého 65,0 m vytvarovaného v generálním sklonu 1:3,3. Generální sklon celého svahu výšky 100,0 m /I. až VII. řez/ byl pozvolnější 1:5,5, protože zbývalo na V. až VII. řezu odtěžit 630 tis. m³ zemin, které vázaly v panenském piliři 1349 tis. t uhlí. Podle obr. 3 probíhal deformační proces po hluboko uložené skluzné ploše v hloubce 40 až 60 m sledující hlavu uhelné sloje s úklonem 6° do lomu. Zbytková pevnost porušených jílovců se nadále snižovala provlhčováním skluzné plochy přítoky mělké podzemní vody z kvartérního obzoru. Postupným dotěžováním V. skrývkového řezu se rozšířily deformace na

tento řez a poklesová část v předpolí lomu doznala další pokles o 2 m. V průběhu let 1975 a 1976, kdy byl dotěžován V. až VII. skryvkový řez a uhelná sloj až k demarkaci dobývacího prostoru, docházelo k periodickému ožívování deformací v předpolí lomu a k postupnému rozšiřování na spodní postupující řezy.

Postup těžby v tomto prostoru byl řízen v souladu s předloženými návrhy na sanaci tohoto území. Pro výpočet stability svahu v aktivní zóně svahu bylo počítáno s reziduální pevností $\varphi'_r = 8^\circ$, $c'_r = 0$ a v její pasivní části nepodléhající dosud progresivnímu porušování $\varphi' = 14^\circ$, $c' = 150$ kPa. Na základě stabilitních výpočtů se dospělo k těmto dílčím generálním sklonům:

- v aktivní části svahu I.-IV. řez - sklon 1:4,2
- v pasivní části svahu V.-VII. řez - sklon 1:2,6

Mezi těmito dílčími sklony svahu na plošině IV. řezu byla ponechána plošina 50 m široká. Krátkodobě stabilní svah s $k_s = 1,2$ byl navržen v generálním sklonu svahu 1:4,0 a při tomto sklonu svahu byly těžební práce ukončeny.

V roce 1977 se projevilo aktivní stádium porušení pod celým svahem až po konečnou patu svahu odkrytou na hlavě uhelné sloje. Výpočty bylo prokázáno, že se snížila kontaktní pevnost nadloži-hlava sloje na $\varphi'_{res.} < 5^\circ$.

Průkazným případem progresivního porušení svahu ve výchozové části uhelné sloje a současně názorným příkladem řešení způsobu těžby v oblastech takto postižených byl uhelný piliř Březová těžený lomem Silvestr. K prokazatelnému posunu docházelo po jílovitém proplástku probíhajícím přibližně ve spodní třetině mocnosti uhelné sloje. Odkrytá část proplástku v uhelné sloji se nacházela v měkce-plastickém stavu. V předpolí lomu byly vizuálně pozorovány decimetrové tahové trhliny, které se přiblížily na vzdálenost 10 m od okraje státní silnice I/6 Cheb-Karlovy Vary.

Před rozhodnutím o dalším postupu těžby byla provedena

v oblasti piliře Březová sanace svahu rozsáhlými odvodňovacími pracemi. V předpolí lomu, ve svahu lomu a na dně lomu jako podložky vnitřní výsypky bylo provedeno celkem 72 vrtů, z toho 26 čerpacích, 26 pozorovacích a 20 horizontálních vrtů. Pro připravené vytěžení uhelných zásob blokováných v piliři vypracovali BPT zvláštní technologický postup dobývání. V podstatě byl realizován blokový způsob těžby v úzkých blocích vedených kolmo na ochranný piliř silnice. Tímto způsobem se sledovalo otevření minimálního prostoru pro těžbu uhlí, který se následně zasypával postupem dvou výsypkových etází o celkové výšce 20 m. Výsypka byla zakládána na drénovanou podložku a voda z prostoru podložky uhelné sloje byla odčerpávána pomocí studny vybudované ve výsypce. Odstup paty výsypky spodní etáže od paty těženého uhelného bloku byl stanoven na 25 až 40 m. Při původním paralelním postupu skrývkových a porubních front by byl obnažen svah lomu v délce 1000 m. Uvedeným způsobem se podařilo vytěžit bilanční uhelné zásoby piliře při generálním sklonu svahu 1:3,0.

Deformace nedestruktivního charakteru zřejmě zasahovaly za ochranný piliř silnice až po povrch zvětralého krystalinika /obr. 4/. Nelze ani vyloučit nepříznivý napjatostní stav podmíněný existencí reziduálních napětí, vázaných např. na tektonické pohyby v minulosti. Na porušování stability svahu se podílel i proudový tlak podzemní vody, který mohl dosáhnout značné hodnoty pro velký hydraulický spád a přítomnost řady propustných písčitých vrstev včetně propustné uhelné sloje.

Další případ progresivního porušování zemního masivu s poměrně rychlým vývojem aktivního stádia byl sledován v předpolí bočního svahu lomu Šmeral. Skrývkové řezy lomu byly vedeny v generálním sklonu 1:3,0 až 1:3,5 při celkové výšce 30 až 40 m a uhelné řezy souhrnné výšky 34,8 až 46,3 m 1:1,5 až 1:2,3. Pro vývoj porušení masivu byl však rozhodující generální sklon od terénu po patu posledního uhelného řezu 1:3,0 a v území s počátečními projevy porušení 1:2,5. Nadložní i slojové souvrství se vyznačovalo anomálními geologickými a

geomechanickými podmínkami - přítomností fosilního říčního koryta s nepravidelnou peliticko-psamitickou sedimentací a polohami písků ve svrchní části. Slojové pásmo tvořilo klín s ukončením od paty spodního uhelného řezu ve vzdálenosti 80 až 110 m. Vlivem změny napětí masivu došlo k rozpukání zbytkového uhelného pilíře v místech jílovitých vložek a zvětšení její propustnosti. Dodatečně se nasýtily vodou podložní jíly a tufitické jílovce se sklonem k plastickému tečení. V předpolí lomu souběžně se Slatinickým potokem se vytvořila trhлина s maximálním posunem 6 cm a poklesem 18 cm odtržené kry. Pohybová aktivita se zvyšovala jak v odlučné části, tak před patou uhelných řezů na dně lomu. Posuny se projevovaly nejdříve v úsecích, kde se nacházel podložní jíl v měkce-plastickém stavu, lokálně opadávaly uhelné stěny nebo se sesouval skryvkový svah s původním sklonem 1:1,6 až 1:1,8 na 1:2,0 až 1:2,2 /viz tab. 1/. Aktivní stádium trvalo asi 3 hodiny a bylo jím postiženo 400 m zbytkového vyklíněného uhelného pilíře rozlámaného na bloky po 50 až 80 m. Vytlačené podložní jíly byly pozorovány v širší nestabilní oblasti mezi propláستkovou výsypkou a dotěžovaným III. uhelným řezem v délce 600 m. Progresivní porušení svahu bylo doprovázeno silnými výrony vody z meziložních písčitých zemin, ze sloje a ze dna lomu. Posuny svážného tělesa výšky 70 až 80 m se ustálily při svahovém poměru 1:3,6 až 1:4,0 /foto č. 2/. Maximální posuny byly změřeny v patní části uvolněného tělesa, ve zbytkové části sloje až 35 m /viz profil na obr. 5/.

Závěr

Přímá pozorování deformací svahů potvrdila předpoklad vytvoření smykových ploch na hranici strukturně odlišných horninových jednotek, po nichž dochází k progresivnímu porušování svahu. V případě využití stupně bezpečnosti pro krátkodobou stabilitu existuje v báňské praxi vždy pravděpodobnost porušení stability svahu. Počátek porušení je často avizován tahovými trhlinami v předpolí lomu nebo přesuny na mezivrstev-

ních plochách odkrytých těžebnímy řezy.

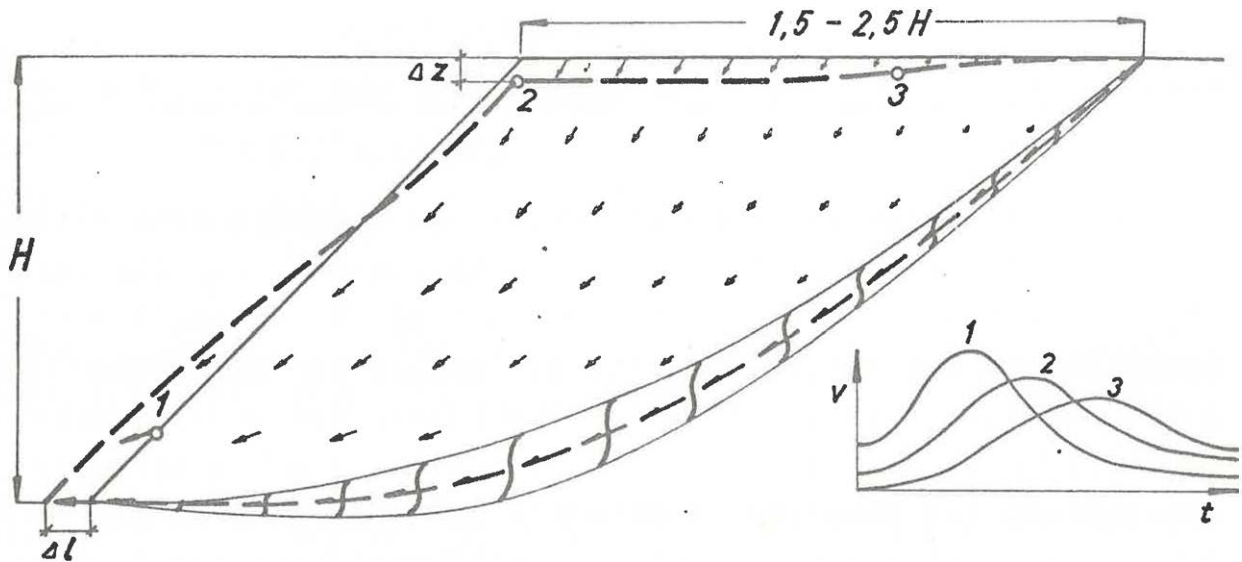
Progresivní porušení definované jako kontinuální rozšiřování zóny porušení podél potenciálních skluzových ploch je vázáno podmínkami :

1. Křehkého chování jílovců a poklesu pevnosti při deformacích větších, než při kterých je mobilizována vrcholová pevnost.
2. Koncentrace napětí na mezivrstevních plochách a puklinách odlehčením masivu postupnou těžbou nadloží a uhelné sloje.
3. Horizontální a vertikální hraniční deformací masivu avizující počáteční stádium deformace svahu.

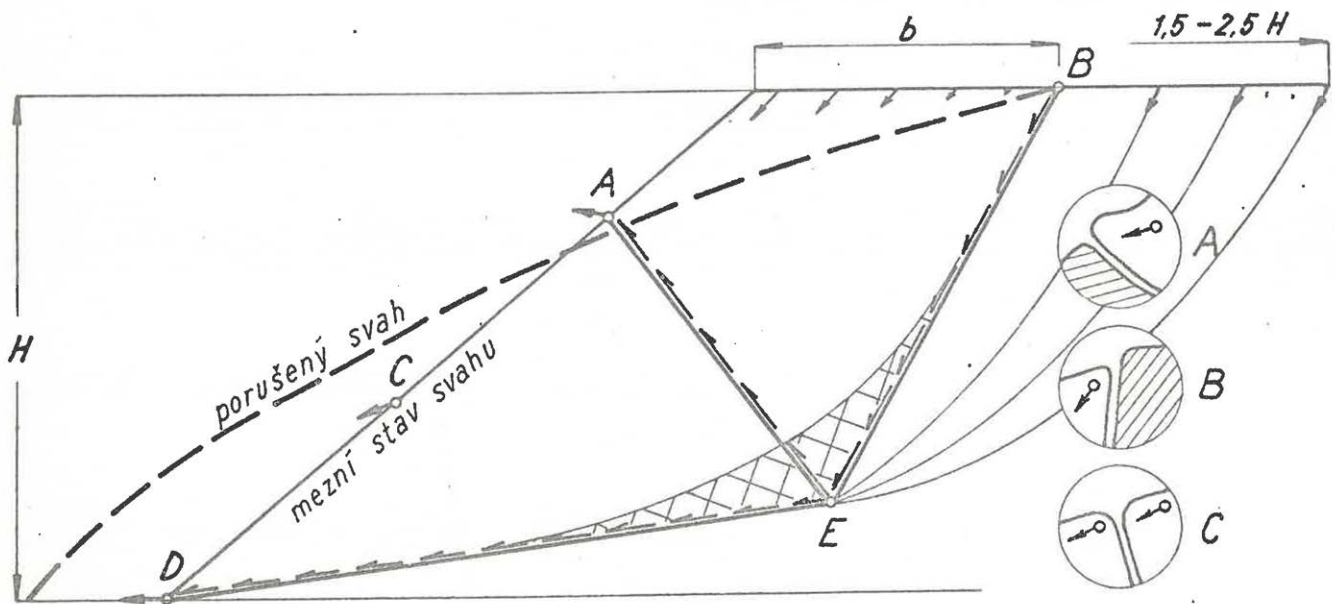
V uvedených podmínkách je na místě prošetřovat stabilitu svahu na základě reziduálních hodnot smykové pevnosti.

Literatura:

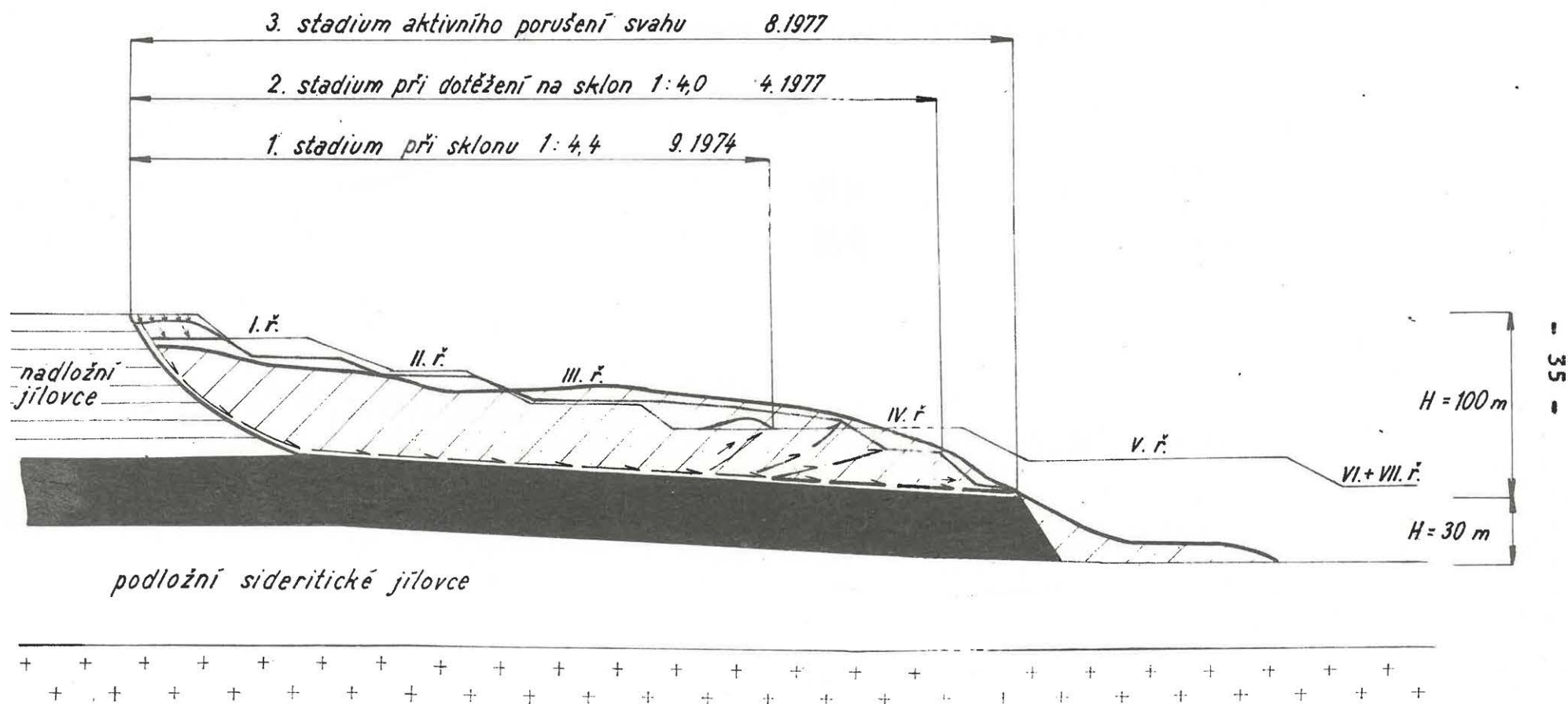
- Vyskočil P. : Vývoj pohybů v předpolí velkolomu Čs. armády v Komořanech za léta 1977 až 1982. Výzkumné zprávy VÚGTK č. 621, 644, 663, 676, 695, 725 a 751
- Pichler E. : Výzkum změn probíhajících v tělese výsypky, ovlivňujících její tvarování a konzolidaci II. etapa - Současný stav a další vývoj aplikované geomechaniky na povrchových dolech. VÚHU, VI. 1977
- Herle Vít. : Ověření geomechanických vlastností nadložních hornin. SG, XII. 1980
- Herle Vít. : Výsledky laboratorních zkoušek Jiřetín - VČSA. SG, XII. 1981
- Pichler E. : Stabilita bočního svahu lomu Šmeral-úsek Slatínice. VÚHU, VIII. 1982.



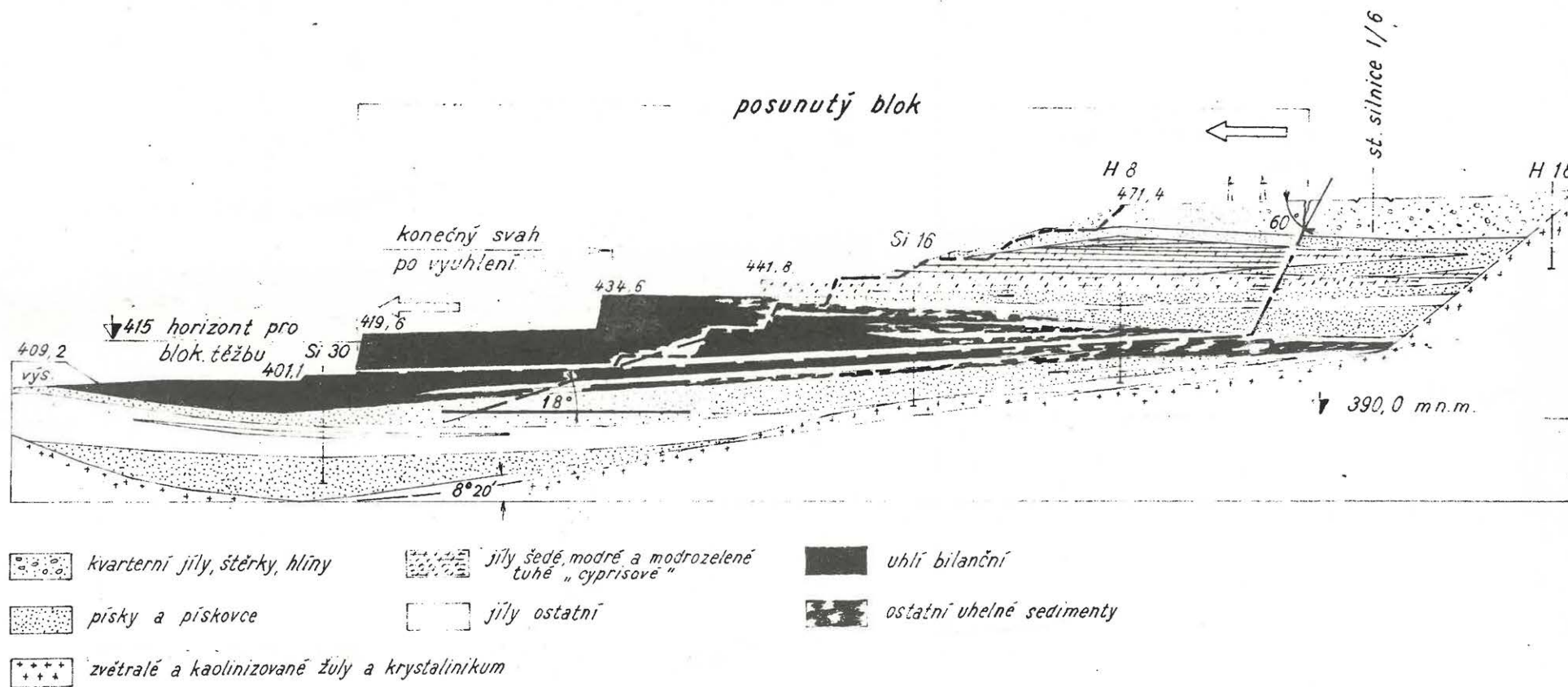
Obr. 1 Počáteční stadium progresivního porušování svahu před dosažením mezního stavu



Obr. 2 Rozšíření deformací po šikmé ploše při progresivním porušení svahu



Obr. 3 Počáteční i aktivní stadium progresivního porušení bočního svahu velkolomu Čs. armády



Obr. 4 Počátek progresivního porušení pilíře Brezová lomu Silvestr

Fot. 1



Jedna z počátečních známek porušování svahu
po patu uhelné sloje.

Fot. 2



Celkové porušení stability uhelného
piliře a skryvkového svahu lomu Šmeral.