

Ing. Evžen P i c h l e r, CSc., VÚHU

Počáteční projevy porušování stability horninového masívu
vlivem napětodeformačních změn

Jílovité zeminy při velkolomové těžbě podléhají objemovým změnám, které se nutně promítají ve změnách jejich napětového stavu. Je to zapříčiněno jejich postupným odkrýváním, čímž se porušují napětové, do určité míry rovnovážné stavy a současně se porušují teplotní, geotermicky rovnovážné stavy horninového masívu. Při postupné těžbě nadloží a sloje se tedy podstatně mění základní kritéria stabilitního řešení. Odlehčováním masívu zpravidla dochází k pozvolnému poklesu horizontálního napětí a vztlaku podzemní vody, naopak však narůstá proudový tlak vody a smyková pevnost na mezivrstevních plochách porušení klesá. Tyto jevy jsou podmíněny strukturálními jednotkami a jejich kontaktními posuny - poměrným smykovým přetvořením.

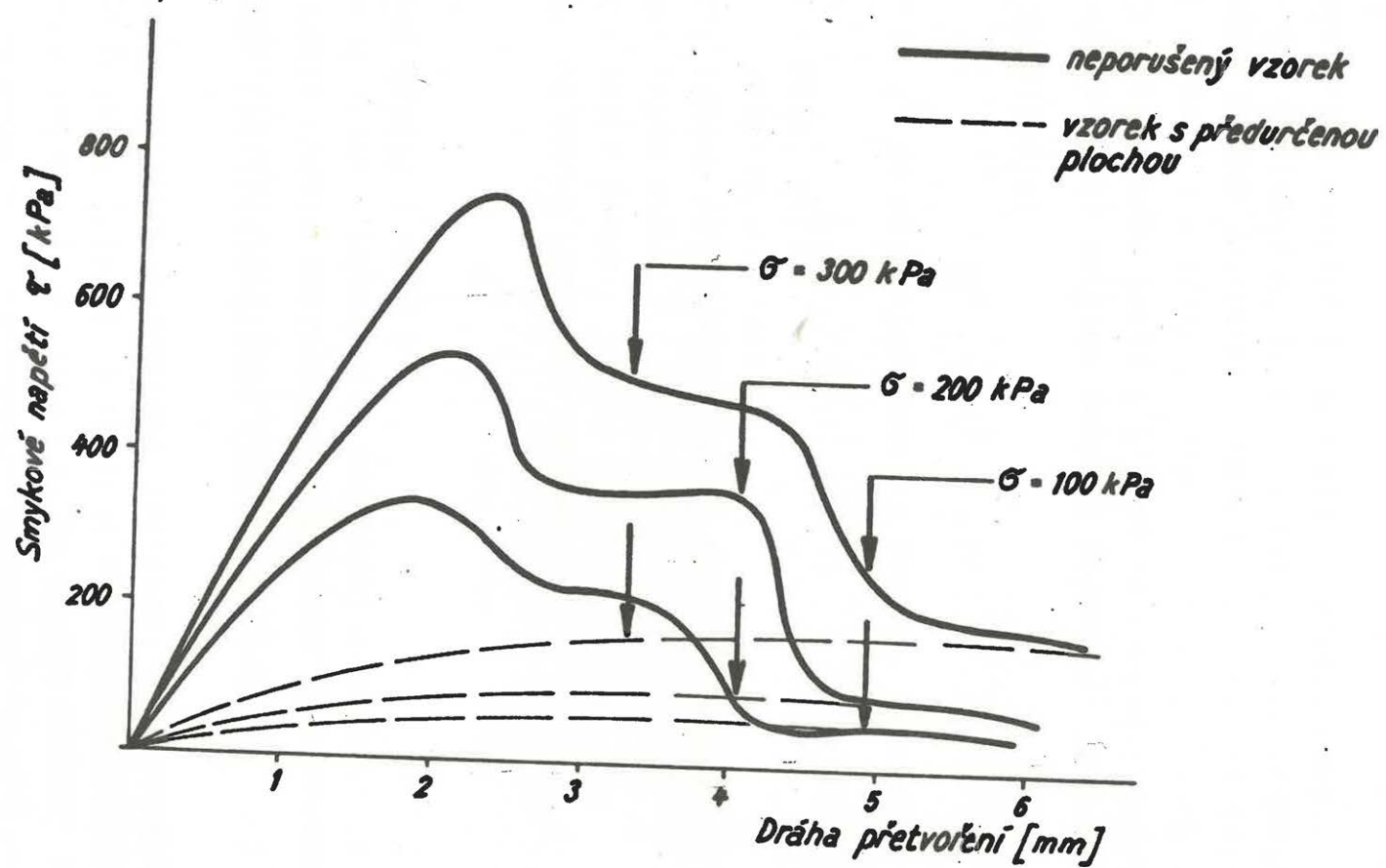
Průvodním jevem odlehčování masívu je jeho progresivní porušování doprovázené poklesem vrcholové smykové pevnosti k její kvazireziduální a posléze konečné reziduální hodnotě. V důsledku koncentrace napětí na plochách diskontinuit a deformační energie závislé na stupni diagenese a stupni porušení masívu existuje u dlouhodobých svahů poměrně vysoká pravděpodobnost vyčerpání smykové pevnosti.

Nepravidelnosti chování zemin vlivem změn napětí

V zemním masívu prostoupeném systémem puklin a diskontinuit se poměrné smykové přetvoření bude vyvíjet především podél diskontinuit. Pokud tyto diskontinuity zasahují do předpolí svahu, je možné tyto posuny přímo měřit. V případě, že je diskontinuita vyvinuta v masívu jako lokální zóna, nemusí

se smykový posun v předpolí lomu vůbec projevit. Poměrné smykové přetvoření (zkos) u výrazně anizotropních vrstevnatých jílovců se projevuje často trhlinami velkého plošného rozsahu přímo v odkryté těžební stěně, případně i v podloží uhelné sloje, kde je velmi nesnadné je pozorovat a měřit. Časový průběh jejich progresivního porušování "in situ" probíhá obvykle pomalu - i několik let. Naproti tomu v laboratorních podmínkách aktivizace odporu proti porušení až do stavu porušení zkušební vzorku usmyknutím trvá poměrně krátkou dobu. Výsledky smykových zkoušek jednoznačně ukázaly, že k mobilizaci smykového odporu dochází řádově při zkosu 10 až 100 ‰. Tento poměrně rychlý pokles pevnosti po dosažení vrcholu s podstatným rozdílem mezi vrcholovou a reziduální pevností charakterizuje jílovce jako náchylné k progresivnímu porušení - bylo zjištěno kontraktantní chování jílovců při přírůstcích normálového napětí vyšších než 400 až 600 kPa. Se vzrůstajícím průměrem vzorku i počtem ploch diskontinuity různé orientace souvisí i pokles smykové pevnosti. Proto se jeví výsledky laboratorních krabicových a polních zkoušek s větším objemem zkušební vzorku pro posouzení stability svahů jako objektivnější, blíží se skutečným přírodním poměrům.

Ve shodě s výsledky laboratorního zkoumání v zahraničí se ukázalo, že u puklinových a křehkých jílovců, na rozdíl od intaktních, se s časem zmenšuje efektivní soudržnost, a to na hodnoty blízké nule. Vrcholový úhel vnitřního tření s časem prakticky neklesá. Určitý pokles lze však zaznamenat u reziduálních hodnot úhlu vnitřního tření plastických zemin. U některých zkoušek se při poklesu vrcholové pevnosti k reziduální hodnotě podařilo prokázat také kvazireziduální chování jílovců. Konečné reziduální pevnosti mohlo být dosaženo teprve smykovým přetvořením po delší dráze. Příčiny tohoto chování nelze přesně zjistit, ale lze předpokládat převládající vliv různé orientace puklin vzhledem ke smykové ploše. Tvar křivky smykových zkoušek neporušených vzorků je nepravidelný - obr. 1, pokles maximálního smykového napětí na re-



Obr. 1 Kvazireziduální charakteristika jílovců

ziduální hodnotu je přerušen na pomyslné střední hodnotě a reziduální hodnoty je dosaženo až po delším posunu. Kvazireziduální chování jílovců, prokázané uspořádáním smykového testu, je zřejmě příčinou planárního sesouvání horninového masívu.

Důsledky kvazireziduálního chování jílovců

Podle modelu sestaveného Bjerrumem, charakterizujícího porušení svahu v podmínkách hnědouhelných lomů, je celkové smykové napětí v bodě O

$$\tau_o = \gamma h \sin \alpha \cos \alpha + k \frac{E}{OA}$$

kde γ - objemová hmotnost horniny

h - výška svahu

α - sklon svahu

k - faktor vyjadřující poměr mezi maximálním a průměrným napětím na ploše OA

E - boční síla.

Jestliže S_p je maximální smyková pevnost jílovců a

$$\tau_o < S_p$$

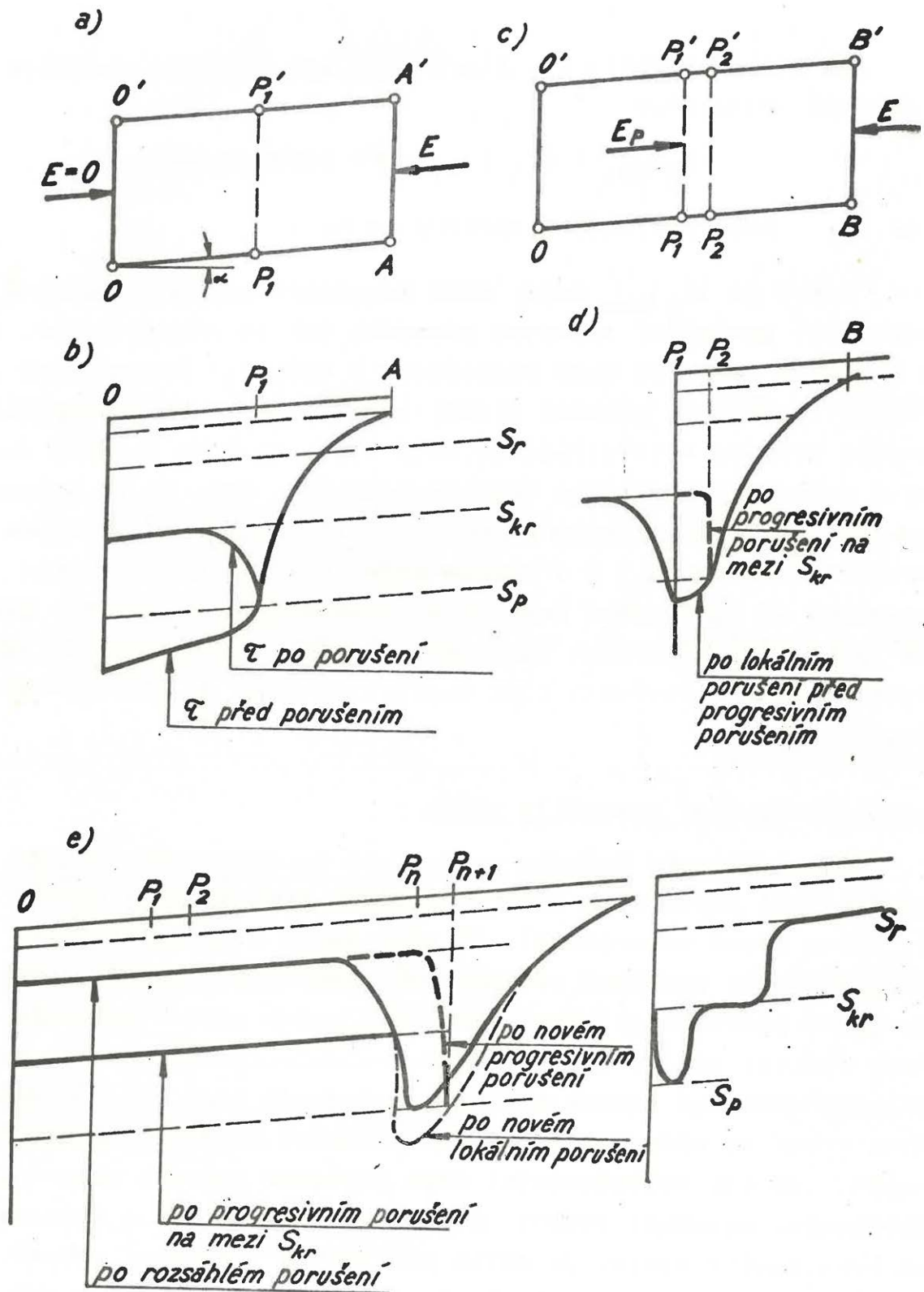
je svah stabilní.

Vznik pásma snížené smykové pevnosti, znázorněného na obr. 2 vertikálním řezem $P_1P'_1$, má za následek přetížení sousední oblasti a rozšíření smykových posunů s využitím vrstevních ploch a ploch diskontinuity. Smyková pevnost na vytvářející se ploše OP_1 postupně klesá na kvazireziduální hodnotu a zároveň nastává boční roztažení. Maximální smykové napětí přechází do bodu P_1

$$\tau_{\max} = \gamma h \sin \alpha \cos \alpha + k' \frac{E - E_p}{P_1B}$$

kde k' - faktor, vyjadřující poměr mezi maximálním a průměrným napětím na ploše P_1B

E_p - pasívní boční síla působící na řezu $P_1P'_1$.



Obr. 2 Princip progresivního porušování svahu na mezi kvazireziduální pevnosti

Maximální hodnota E_p , která může být dosažena uvedeným lokálním sesouváním

$$(E_p)_{\max} = OP_1 (S_{kr} - \gamma h \cos \alpha \sin \alpha)$$

kde S_{kr} - kvazireziduální smyková pevnost.

Pokud je $(E_p)_{\max}$ malá, může maximální smykové napětí $\tau_{\max}$ překročit maximální smykovou pevnost, jak je zřejmé z obr. 2 a planární posuv se bude rozšiřovat k bodu P_2 . Progresivní porušení se děje po skluzné ploše, vzniklé již v předcházejícím stádiu procesu a rozšiřuje se dále vlevo od bodu P_n , kde dochází k vyčerpání maximální smykové pevnosti. Tím, že se koncentruje smykové napětí vpravo od bodu P_1 , smyková napětí v místě P_1 překročí hodnotu S_{kr} a v každém úseku $P_i P_{i+1}$ nastane její zmenšení na reziduální hodnotu S_r postupně až k bodu P_n . Svah se tedy, podle principu Bjerruma, dostává vlivem dalšího snižování smykové pevnosti přes kvazireziduální do reziduálního stavu.

Lokální porušení stability svahu

Při vytváření bočního svahu lomu se zpravidla přenáší progresivní porušení z výše položených řezů na řezy nižší (s časem klesá soudržnost). Je však možný i postup šíření progresivního porušení od spodních těžebních řezů při výskytu měkce-plastických proplástků nebo poloh jíílů v meziloží nebo podloží uhelné sloje. Při kvazireziduálním stavu se již vytváří zřetelné tahové trhliny v předpolí lomu. Do reziduálního stavu se může horninový masív dostat zvýšením smykového napětí (dalším odlehčováním) nebo poklesem smykové pevnosti. Současnými metodami řešení stability, napjatosti a deformace horninového masívu je možné postihnout i lokální stupeň bezpečnosti svahu. V případě, že v některých částech svahu dosahuje hodnoty nižší než 1,0, neznamená to porušení stability svahu jako celku, ale jeho možné lokální porušení.

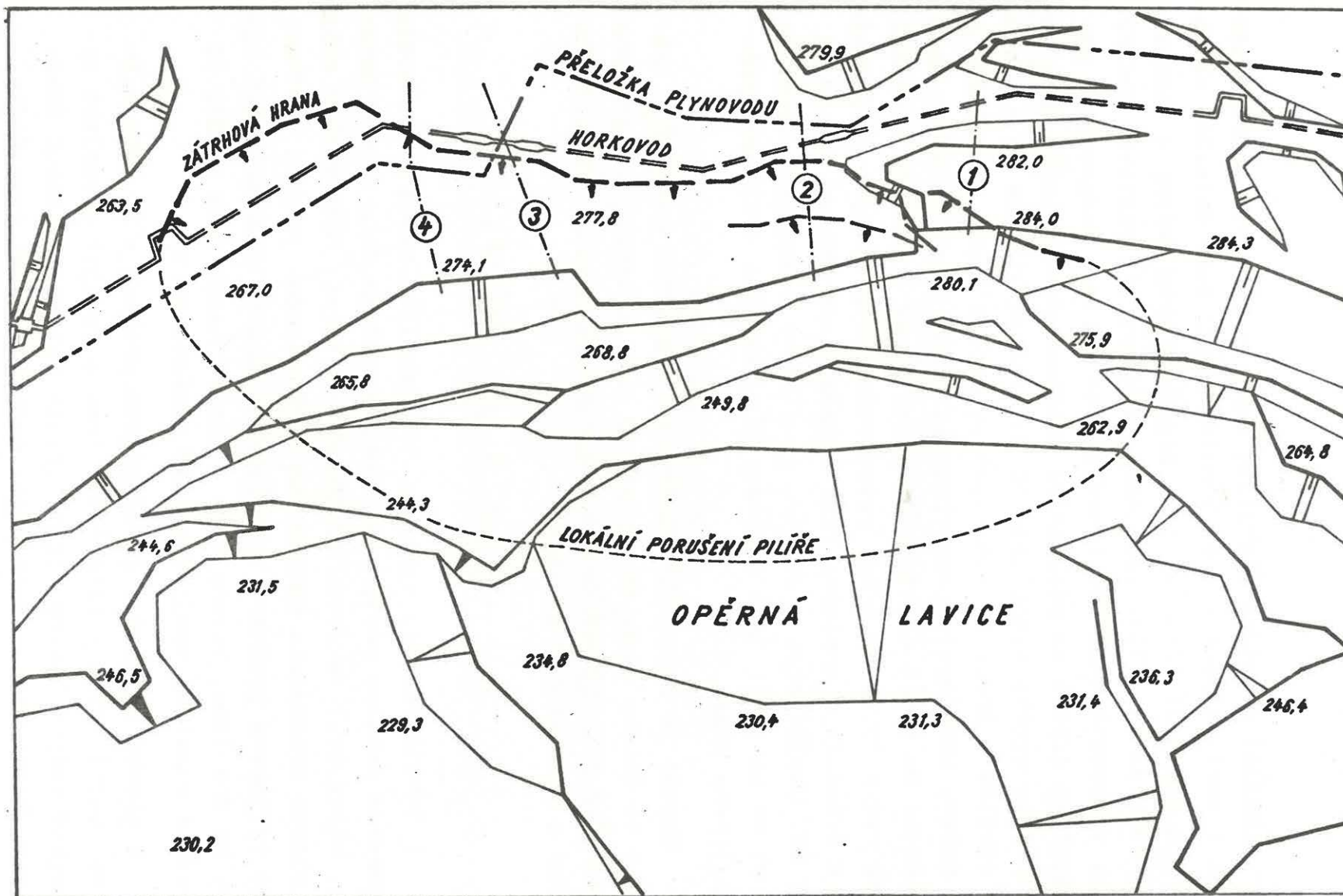
Lokální porušení stability svahu s výraznými horizontálními i vertikálními posuny zemního bloku bylo detailně sledováno v předpolí lomu Šmeral - přídatné pole Hořany v období 10. 1984 až 10. 1985. Lokálnímu porušení byl vystaven uhelný blok s nepodstatnou částí nadložního masívu. Progresivní porušení se šířilo od posledního dotěžovaného uhelného řezu postupně za vrchní hranu lomu až do vzdálenosti cca 80 m. Tahové trhliny v předpolí konečných severních svahů přídatného pole Hořany ohrožovaly inženýrské sítě, horkovod Komořany-Most, plynovod Js 500 a elektrické vedení 35 kV - obr. 3. Svah celkové výšky 35 až 40 m byl vytvářen dvěma nízkými skrývkovými a dvěma 15 m uhelnými řezy v generálním sklonu 1:1,50 až 1:2,00. Uhlenný blok s četnými proplásky o mocnosti několika cm až dm se jevil jako porušený diagonálními trhlinami převažujícího směru S-J.

Obecně je mezní vliv puklin na stabilitu svahu β_{mez} závislý na sklonu svahu α , orientaci puklin vzhledem k povrchu svahu λ a příslušných pevnostních charakteristik horninového bloku a kontaktních ploch

$$\beta_{mez} = f \left(\alpha, \lambda, \frac{c'}{c}, \varphi', \varphi \right) .$$

Z tohoto rozboru vyplývá, že stabilitu svahu ovlivňovaly především pukliny protínající svah v ostrém úhlu k jeho povrchu, které byly ve svahu zřetelně viditelné. Potenciální skluzná plocha procházela podložními šedozelenými jílovci. Přítomnost vztlakové podzemní vody byla avizována roztroušenými vývěry na dně lomu. Výrony vody v uhelné sloji byly vázány na rozsáhlé a patrně spojitě plochy diskontinuity.

V období narůstání deformačních projevů v 3. 1985 bylo nutné omezit těžbu v této části lomu a zahájit urychleně vybudování opěrné lavice, jejíž rozsah byl omezen dosud nevyuhlenou částí lomu a dostupnými mechanizačními prostředky. Vzhledem ke značné proměnlivosti hydrogeologických poměrů,



Obr. 3 Situace lokálního porušení pilíře Hořany

1 : 2000

soudržnosti uhelné sloje a zřetelnému oddělování zemního masívu bylo rozhodnuto o účinnějším způsobu sanace svahu, který spočíval v podepření uhelného bloku výsypkovým stupněm zakladače ZP 6600/88. V té době však byl zakladač nasazen ve vzdálenosti 800 m a bylo nutné zajistit postupnou výstavbu pásového dopravníku na předsypávaném zúženém výsypkovém prstu.

Průběh sledovaných svahových pohybů od 3. 1985 (před tímto datem nebyly pohyby měřičsky podchyceny) naznačoval, že i po realizaci uvedené stabilizační lavice pokračovalo uvolňování horninového bloku - obr. 4. Za tohoto stavu nebylo možné stanovit jednoznačně jak se bude dále vyvíjet situace. Pro případ konstantní rychlosti uvolňování bloku do doby konečné sanace výsypkovým stupněm byly stanoveny nejkrajnější hodnoty posunů v místě horkovodu:

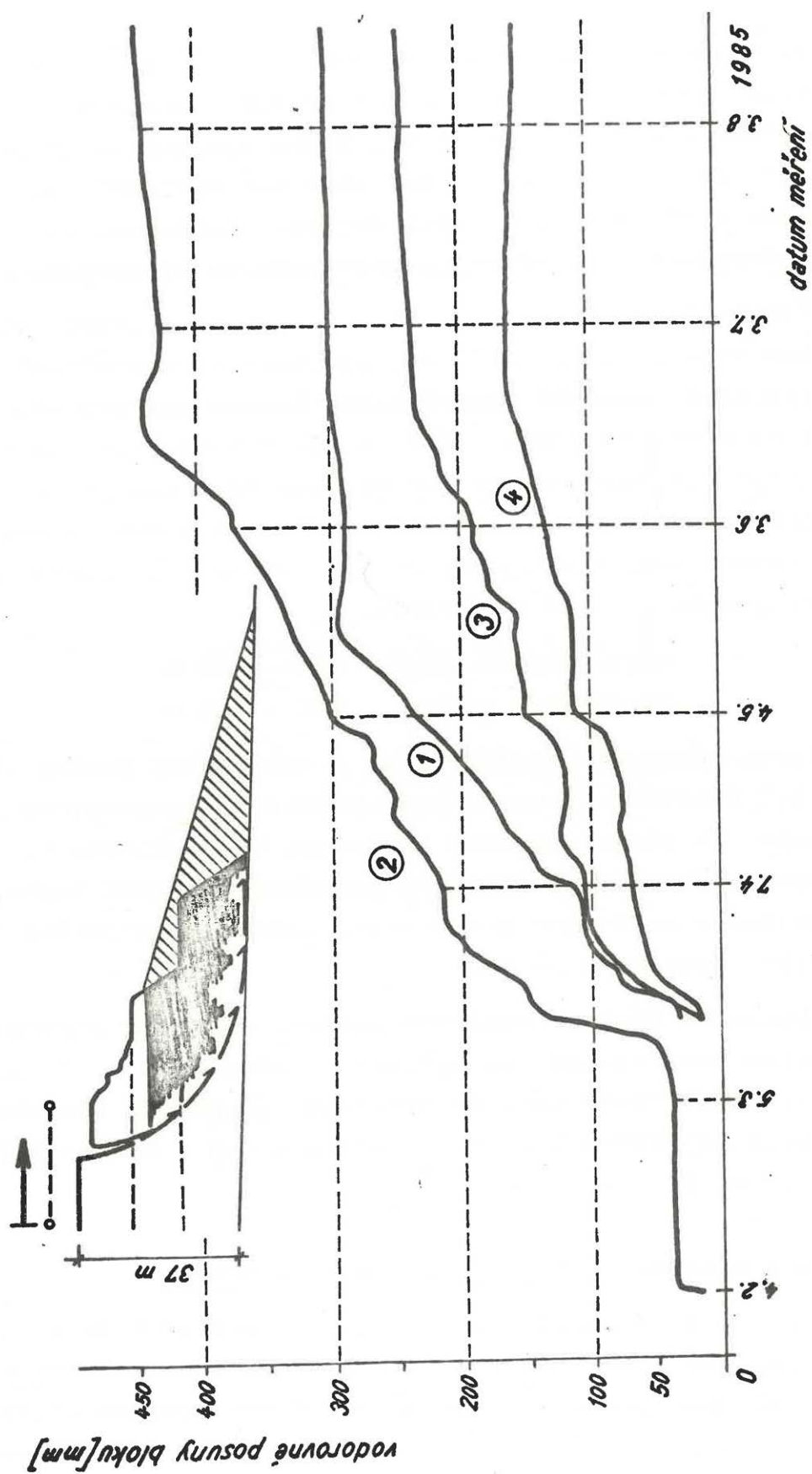
horizontální posun	100 - 300 m
vertikální posun	200 - 500 m.

Takto stanovené horizontální a vertikální posuny však mohly být kritické až mezní pro vertikální kompenzační větev horkovodu. Ze strany správce horkovodu byly učiněny nezbytné přípravné práce pro zabezpečení provozuschopnosti horkovodu, spočívající v podložení pohyblivých patek a odstranění pevného spojení potrubí s patkami.

Teprve po čtyřech měsících zvýšené četnosti pozorování bylo možné konstatovat, že situace se stabilizuje. Porušený svah byl definitivně sanován mohutným výsypkovým tělesem a tím byla zajištěna bezpečnost stávajících a k výstavbě připravených inženýrských sítí.

Kontrolní systémy pozorování porušování masívu

Z uvedeného případu lokálního porušení stability svahu je zřejmé, jak důležité je znát velikosti deformačních charakteristik pro operativní rozhodování při ochraně důležitých zařízení a pro zamezení ztrát uhelné substance. Pozorování



Obr. 4 Sledovaná část vodorovných posunů uvolněného horninového bloku

deformačních projevů kontrolním systémem nejen na povrchu, ale i na plochách a zónách oslabení je tedy nutné pro předvídání vývoje lokálního porušení stability svahu a prognózování možných důsledků ohrožení. První takový projekt kontrolního sledování byl vypracován v letech 1981 až 83 Stavební geologií, n. p. Praha pro specifické podmínky předpolí Velkolomu čs. armády v oblasti vrchu Jezerka. Tento kontrolní systém sledování (monitoring) je zaměřen nejen na povrch svahu, ale pomocí pozorovacích vrtů a průzkumných štol i na předpokládané úrovni porušení v masívu. V období od 10. 1985 do 3. 1986 byl kontrolním systémem indikován stav počátečního porušování stability svahu v povrchové části pilíře Jezerka vázaný na skluznou plochu kontaktu kvartérních a terciérních sedimentů. Cyklický pohyb uvolněných kvartérních sutí do pánve je usměrňován sedlovitým tvarem báze a postupem těžebních řezů a je podmíněn kvazireziduálním chováním povrchu jílu. Rychlost pohybů pozorovaná na posunujícím se bloku $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ části pilíře Jezerka je poněkud nižší než v uvedeném případě Hořany a nepředpokládá se náhlé porušení stability svahu, pokud nedojde k hlubšímu porušení stanoveného pilíře.

Považujeme za účelné tento příspěvek k progresivnímu porušování masívu uzavřít informací o tzv. varovných stavech, které byly pro období 1986-87 s přihlédnutím ke komplexu kontrolního sledování v širší oblasti předpolí VČSA stanoveny Ústavem geologie a geotechniky ČSAV Praha. Varovné stavy charakterizují míru rizika a stanovují potřebná opatření pro operativní rozhodování o dalším postupu. Komplexně tuto problematiku řeší opatření ředitele k.p. DVIL č. 47/86 a jeho příloha č. 1 - Doplněk havarijního plánu dolu Obránců míru a Čs. armády. Svahové pohyby jsou charakterizovány jako stav neklidu, varovný stav, kritický varovný stav a mezný varovný stav. Pro pilíř jako celek jsou definovány přípustnou velikostí deformace nebo její rychlostí, která vzniká v sedimentárních horninách pánevní výplně a na jejich litologických rozhraních v zónách hlubších než je báze kvartéru. Pro kvartérní sutě bylo

stanoveno pět stupňů rychlostí posunů jako výsledného projevu napětodeformačních změn. Indikace náklonů, smykových posunů a poměrných tahových přetvoření pro hluboké krystalinikum a povrchové skalní výchozy je definována specifickými kritérii.

Stanovené varovné stavy odpovídají současnému poznání a zjištěnému pohybu kvartérních sutí po terciéru pilíře Jezerka. Je zřejmé, že pro jiné oblasti na téže lokalitě budou platit jiné hodnoty počáteční, kritické a mezní deformace.

Závěr

Progresivní porušení definované jako kontinuální rozšiřování zóny porušování podél potenciálních skluzných ploch je podmíněno kvazireziduálním a reziduálním chováním jílovité zeminy. V případě systematického kontrolního sledování deformačních projevů, které jsou odrazem napětodeformačních změn odlehčovaného masívu, je možné zabezpečit plynulou těžbu i v oblastech počátečního porušování horninového masívu. Je však velmi důležité, aby v oblastech, kde lze předpokládat lokální projevy nestability, byly kontrolní systémy sledování horninového masívu budovány ještě před jeho ovlivněním těžební činností.

S h r n u t í

Počáteční projevy porušování stability horninového masívu vlivem napětodeformačních změn

Počáteční stádium progresivního porušení nedestruktivního charakteru bylo poprvé prokázáno přesnými geodetickými měřeními prováděnými v předpolí VČSA od roku 1975. V současné době je porušování svahu sledováno komplexně kontrolním systémem v oblasti pilíře Jezerka. Nejenom na VČSA, ale i na případu lokálního vývoje skluzu pilíře Hořany, který byl sledován kontrolním měřickým systémem v roce 1985 se ukázalo, že je nutné vycházet z pravděpodobnosti progresivního porušení sva-