

Sborník geologických věd	Hydrogeologie, inž. geologie, 20	Str. 39–44	1 obr.	– tab.	– příl.	ČGÚ Praha 1994	ISBN 80-7075-174-6 ISSN 0036-5289
--------------------------	----------------------------------	------------	--------	--------	---------	----------------	--------------------------------------

## Stabilita svahu uhelného velkolomu stanovená metodou konečných prvků

### Slope stability of the open pit coal mine defined by the finite element method

KAREL KLOSS<sup>1</sup>

Předloženo 8. dubna 1992

*Key words: Slope stability, Open pit coal mine, Finite element method*

KLOSS, K. (1994): Stabilita svahu uhelného velkolomu stanovená metodou konečných prvků. – Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol., 20, 39–44. Praha.

Výtah: Stabilita svahů Krušných hor je v současnosti postupně narušována těžbou skrývek a uhelné substance při jejich úpatí. Těžbou se vytváří rozsáhlý umělý svah, který navazuje na svahy hor. Výška a sklon vytvářeného svahu má vliv na stabilitu masívu. Článek popisuje postupy a výsledky matematického modelování přirozeného svahu hor a svahu uhelného velkolomu v profilu III lokality Jiřetín. Posudek stability je odvozen z analýzy napětí a deformace masívu provedené metodou konečných prvků. Předložená práce obsahuje popis výpočetního modelu včetně jeho vytvoření, vstupní data, koncepci modelování, postup při konstruování původní napjatosti, popis dosažených výsledků a jejich vyhodnocení.

<sup>1</sup> AGE, s. r. o., Italská 15, 120 00 Praha 2

Na základě analýzy mechanického chování modelovaného masívu byla posouzena stabilita svahu velkolomu Čs. armády (dále jen VČSA) v profilu III lokality Jiřetín. Problém byl řešen metodou konečných prvků (dále jen MKP) na matematických modelech, které byly vyhodnoceny z hlediska přetvoření, napjatosti a porušení. Úloha byla pojata jako rovinný případ napjatosti. Výpočet byl proveden vlastními programy Stavební geologie, s. p., Praha, na zařízeních jejího výpočetního střediska.

#### Vytvoření modelu

Při konstruování matematického modelu svahu velkolomu je třeba respektovat geologická rozhraní, průběhy dislokací, hladiny podzemní vody a navržené těžební stupně. Dále musí model umožnit vytvoření vhodné původní napjatosti.

Částečnou idealizací obrysů geologických vrstev v geotechnickém profilu byl model rozdělen na kvazihomogenní bloky materiálů konstantních velikostí. Celkem bylo modelováno 11 různých geologických prostředí.

Charakter dislokací byl členěn podle jejich rozevření, výplně a kontaktovaných okolních hornin. Pro matematický model byly vytvářeny 4 druhy kontaktů. Za kontaktní linii bylo též určeno rozhraní sedimentů s krystalinikem. Toto rozhraní je charakteristické silně alterovanou kaolinizovanou rulou, jejíž mocnost značně kolísá. Vrstva s mocností cca do 10 m byla modelována pouze kontaktními liniemi, zatímco vrstva s mocností vyšší byla simulována kontaktními liniemi a ještě kvazihomogenními vrstvami. Některé dislokace byly prodlouženy přes sedimenty jako fiktivní linie s vlastnostmi kontaktovaných materiálů.

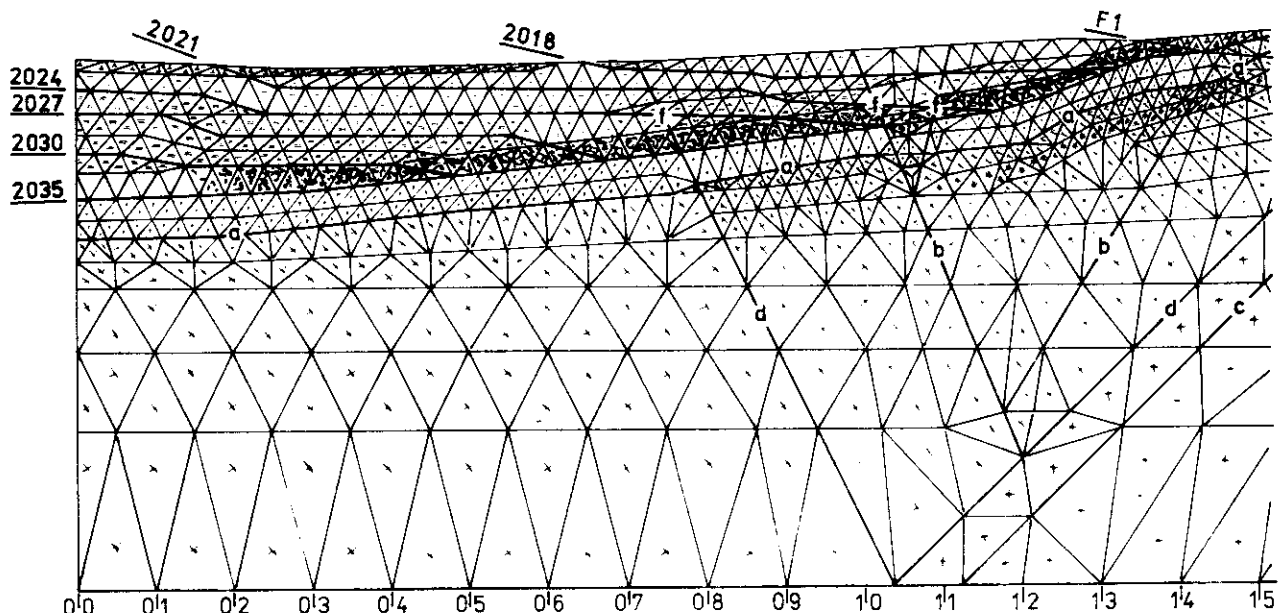
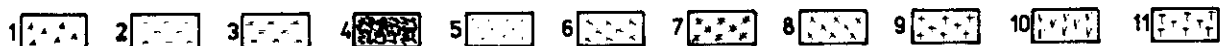
Pro vytvoření původní napjatosti byly použity čtyři pomocné zóny, pomocí nichž byla napjatost dále popsány způsoby konstruována. Původní hladina podzemní vody byla definována následovně: Až do staničení 1,503 km, tj. zhruba do poloviny modelu, byla rozlišena napjatá hladina (artéský strop) a volná hladina tvořená výtlačnou výškou. V druhé polovině modelu byla pouze volná hladina.

Postup těžby zadaný pro léta 2018, 2025, 2030 a 2035 byl doplněn na základě jednání s projektantem vhodnou interpolací pro léta 2021 a 2027. Pro každý odtěžovaný úsek byla prognózována hladina podzemní vody, jejíž kóty byly ve výpočtu respektovány.

Návrh sítě modelu byl konstruován ručně v měřítku 1 : 2 000. Uzlové body byly očíslovány a jejich souřadnice sejmuty na digitalizátoru DG1. Převodním programem byly hodnoty založeny do výpočetního systému GOLEM, pomocí něhož byla vytvořena trojúhelníková síť prvků a deklarovány potřebné zóny. Vytvořená síť byla v tomto systému odladěna bez kontaktních linií a potom převedena do výpočetního systému GEOFEM. Po vložení kontaktních prvků byla síť doladěna a připravena do konečné podoby pro vlastní řešení (obr. 1).

#### Výpočetní programy

Vlastní výpočet napjatosti jednotlivých odtěžovacích kroků byl realizován systémem GEOFEM. Tento systém je obecně určen k řešení rovinných nelineárních úloh mechaniky kontinua příměstkovou metodou. Systém používá trojúhelníkových prvků s bázovými funkcemi ve tvaru lineárních polynomů, má zabudován konstitutivní model



1. Matematický model pro řešení stability svahu VČSA na lokalitě Jiřetín metodou konečných prvků. Materiály blokových prvků: 1 – kvartérní sedimenty, 2 – nadožní jíly, vrstva 1, 3 – nadožní jíly, vrstva 2, 4 – uhelná sloj, 5 – podložní souvrství; 6 – kaolinizovaná rula; 7 – silně alterovaná rula, 8 – navětralá rula, 9 – zdravá žulorula, 10 – vulkanická brekcie, 11 – tektonicky porušená rula. Materiály kontaktních prvků: a – kaolinizovaná rula – rozhraní s krystalinikem, b – písčité jíly tuhé, jílopísčité drť v navětralé rule, c – jílopísčité drť, alterovaná rula ve zdravé žulorule, d – jílopísčité drť, alterovaná rula v tektonicky porušené rule, e – alterovaná rula v zdravé žulorule, f – dislokace v sedimentech obecně. Plán skryvek je udán letopočtem 2018, 2021, 2024, 2027, 2030 a 2035. Vytvoření původní napjatosti přispíváním zón: F0 – základní, F1 – 1. fáze, F2 – 2. fáze, F3 – 3. fáze.

(DOLEŽALOVÁ 1985) respektující dráhy napětí a je vybaven pre-processingem vstupních údajů. Systém pracuje na podnikovém počítači I 102 F a je uživatelsky ovládan z terminálu. Segmentová struktura systému GEOFEM a frontální metoda řešení soustavy lineárních rovnic umožňuje řešení rozsáhlých úloh (až 2 000 uzlů) v poměrně krátkém časovém prostoru.

Pro přípravu modelu byly využity přednosti systému GOLEM v oblasti tvorby sítě. Tento systém má podobné pracovní charakteristiky jako výše popsany systém, ale úlohy zpracovává na počítačích typu IBM dávkovým způsobem. Vzhledem k vysokým cenovým relacím za strojový čas a problémům s vlastnsky vstupních periférií jsme volili cestu převedení úlohy na systém GEOFEM a tímto systémem ji vyřešili.

### Konstitutivní model

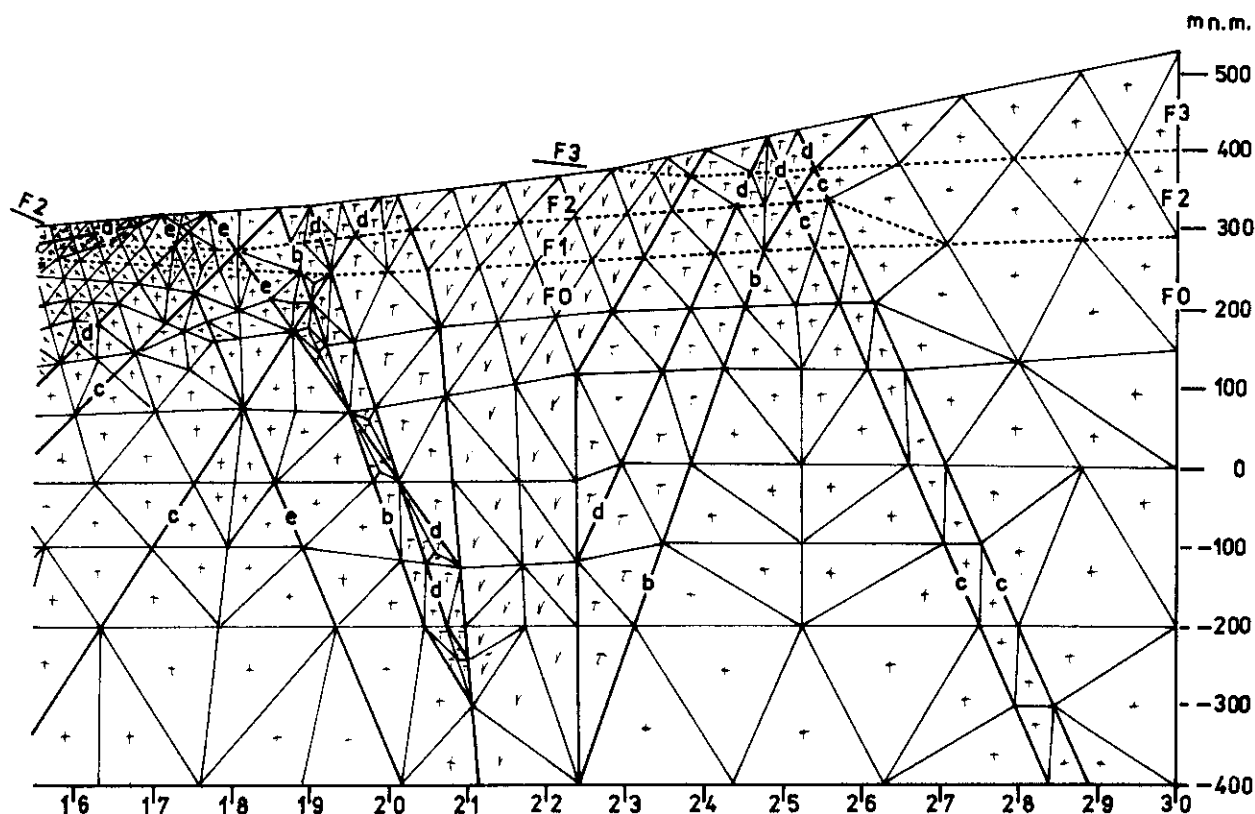
Základním problémem aplikací numerických metod v geomechanice je matematické vyjádření vztahů mezi napětím, přetvořením a časem. Tyto vztahy se nazývají

konstitutivní a jejich soubor potřebný pro řešení úlohy označujeme jako konstitutivní model.

V použitém výpočetním programu je zabudován prakticky vyzkoušený a osvědčený konstitutivní model (DOLEŽALOVÁ 1986). Model je dráhově závislý a přírůstkově nelineární, pracuje s krokovým zpožděním a respektuje rozdílné chování látek v tlaku a tahu, při přetížení, odlehčení a porušení. Příslušné programové zabezpečení má k dispozici algoritmus pro redistribuci nezachycených napětí v případě překročení pevnosti dané látky v tahu a smyku.

### Síť prvků a okrajové podmínky

Při dělení modelované oblasti na konečné prvky byly respektovány hranice geologických vrstev a zadané stupně odtěžovaných etap. V oblasti těžbou vytvářeného svahu byla síť zahuštěna, aby se zachytily důsledky případného zvýšení gradientů napětí. Všechny dislokace zobrazené v geotechnickém profilu byly na modelu simulovány kontaktními liniemi složenými z kontaktních prvků.



Vytvořený matematický model sestává z 1 054 uzlů, z 1 501 trojúhelníkových prvků a z 214 kontaktních prvků. V modelu je rozlišeno celkem 11 geologických materiálů pro blokové prvky a 6 materiálů pro kontaktní prvky (viz obr. 1).

Situování modelu a jeho délka byly voleny tak, aby model dostatečně vykryval okolí těžbou vytvořeného svahu. Do matematického modelu nebyla zahrnuta část geotechnického profilu v délce 1 km s poddolovaným územím. Bylo konstatováno, že tento fenomén nebude mít v žádném případě vliv na stabilitu vytvářeného svahu vzhledem k jeho značné vzdálenosti od analyzovaného místa.

Modelovaná oblast byla na svém spodním okraji limitována horizontální linií na kótě minus 400 m n. m. Styčnický v této linii jsou pevné, tj. neposuvné ve směru obou souřadných os.

Matematický model byl omezen svislými liniemi ve staničení geotechnického profilu  $x_1 = 1\ 000$  m a  $x_2 = 4\ 000$  m. Jeho délka je 3 000 m. Ve svislých bočních stranách modelu byly definovány styčnický jako posuvné ve směru osy Y. Ostatní styčnický v modelu byly volné.

### Vstupní data

Výchozím podkladem pro vytvoření souboru vstupních dat k řešení zadané úlohy byly vlastnosti hornin, zemín a dislokací zjištěné geotechnickým průzkumem. Korelační

s dřívějšími pracemi (KLOSS - ŠILAR 1987, 1988, 1989) byla data revidována a pomocnými výpočty, resp. odborným odhadem, doplněna o potřebné koeficienty konstitutivních vztahů.

Vzhledem k sedmnácti modelovaným materiálům a devatenácti, resp. jedenácti, potřebným hodnotám ke každému blokovému (kontaktnímu) materiálu není možné takto rozsáhlý soubor údajů zde publikovat.

### Koncepce řešení

Účelem řešení zadané úlohy bylo posoudit stabilitu přirozeného a uměle vytvářeného svahu. Umělý svah se bude vytvářet při úpatí Krušných hor v důsledku odtěžování skrývek a uhelné substance ve VČSA. Předpokládá se, že těžba postoupí k modelované lokalitě ve 20. a 30. letech příštího století.

Analyzovaný profil III má své specifikum v tom, že protíná sopouch – lokální geologický fenomén – o údajném průměru 200 m, při povrchu se rozšiřující. Je otázkou, zda volba průběhu profilu je vhodná pro rovinné řešení, resp. zda rovinné řešení vhodně postihne tento prostorový element. Po konzultaci uvedeného problému s příslušnými experty jsme se rozhodli zahrnout sopouch do základní varianty výpočtu. O účinku jeho vypuštění (tj. posunutí profilu mimo něj) jsme se chtěli přesvědčit na základě alternativního výpočtu.

Základní varianta (a) respektuje zadanou geologii, za-

dané vstupní parametry a zadané kóty hladiny podzemní vody. Podzemní voda tvoří v levé části modelu pod pánevními sedimenty napjatou zvodeň se stropním izolátorem představovaným polohou kaolinizované ruly. Výtlačná výška dosahuje horní vrstvy jílu. V průběhu těžby skrývek dochází k postupnému snižování hladiny podzemní vody v daném profilu. Tento proces je na modelu simulován snížením hladiny v každém modelovaném skrývkovém stupni.

Vzhledem k důležitosti řešeného stabilitního problému jsme považovali za žádoucí provést kromě výpočtu základní varianty ještě další alternativní výpočty. Otázkou bylo, který parametr alternovat. Při pohledu na problematiku stability svahů Krušných hor v jiných řešených profilech se nabídl otázka posoudit stabilitu svahu se sníženými pevnostními a přetvárnými vlastnostmi rozhraní sedimentů a krystalinika, tvořeného kaolinizovanou rulou.

Doplňková varianta (b) je počítána ze stejné výchozí původní napjatosti jako varianta základní. Pro výpočet jednotlivých odtěžovacích kroků byly změněny pevnostní a přetvárné parametry kontaktu č. 1 (kaolinizovaná vrstva rul) podle výsledků sblížovací studie MKP na dole Jiří (DOLEŽALOVÁ 1987).

## Původní napjatost

Stěžejním problémem řešení stability svahů pomocí MKP je vytvoření původní geostatické napjatosti masívu v okolí analyzovaného svahu. Tento problém je obtížně řešitelný a není jednoznačný. Nejdůležitějším požadavkem je, aby původní napjatost byla v rovnováze s vlastní tíhou materiálů. Dále se požaduje, aby vodorovná napětí odpovídala naměřeným hodnotám v masívu (pokud se prováděly např. vodní tlakové trhací zkoušky či jiné zkoušky vedoucí ke stanovení bočního součinitele  $K$ ). Důležitým hodnotícím faktorem původní napjatosti je též výchozí stav porušení. Požaduje se, aby napjatost nepřekročila pevnostní meze, resp. aby výskyt tahem porušených prvků byl minimální.

Splnění všech uvedených požadavků obvykle vyžaduje provést řadu variant. Jejich vyhodnocením se zváží realnost vytvořené napjatosti a nejhodnější varianta, resp. varianty, se zvolí za výchozí stav výpočtu.

Pro dosažení optimální původní napjatosti, která je ve skutečnosti výsledkem dlouhodobých geologických procesů, máme obecně k dispozici několik možností: (a) můžeme změnit (přechodně jen pro účely vytvoření původní napjatosti) přetvárné vlastnosti kvazihomogenních bloků, (b) můžeme volit různý postup „přisypávání“, tj. vytváření přírodního svahu, (c) v průběhu vytváření původní napjatosti můžeme dočasně upravovat okrajové podmínky modelu.

K postupu (a) nutno dodat, že skutečné hodnoty přetvárných vlastností (zjištěné standardními metodami) nelze obvykle pro účely vytvořené původní napjatosti použít. Důvodem je skutečnost, že v takovém případě se měkčí

bloky zavěšují na tužší a výsledek je pak nereálný. To potvrzují zkušenosti z četných prací (DOLEŽALOVÁ 1983, KLOSS - ŠILAR 1987).

V našem případě jsme provedli studii původní napjatosti o šesti různých variantách. Za výchozí stav výpočtu byla zvolena varianta, ve které jsme aplikovali různé moduly pružnosti pro různé geologické vrstvy:  $E = 10, 20, 30, 40$  a  $50$  MPa pro materiály č. 1, 2, 3, 4 a 5. Pro ostatní materiály včetně kontaktů jsme zavedli  $E = 200$  MPa. U všech materiálů bylo použito Poissonovo číslo  $\mu = 0,4$ . Pro prostor sopouchu jsme zvolili snížený modul pružnosti v poměru odpovídajícímu poměru objemové tíhy tektonické brekcie (výplně sopouchu) a krystalinika v okolí sopouchu, a to pouze v nultém výpočetním kroku. Ve všech třech přitěžovacích krocích byl dosazen modul pružnosti stejný jako u ostatních materiálů.

Výsledná napjatost vyhovuje na začátku popsaným požadavkům. Čtyři porušené prvky v prostoru sopouchu jsou vzdáleny cca  $0,5$  km od svahu lomu, přičemž jejich stupeň bezpečnosti, jako převrácená hodnota čerpání smykové pevnosti, se pohybuje okolo  $0,8$ . Tato skutečnost nemůže podstatně ovlivnit napjatost v průběhu těžby.

Pro posouzení vlivu přítomnosti či nepřítomnosti sopouchu na mechanické chování masívu jsme vytvořili další verzi původní napjatosti. Z vnesených průběhů součinitelů bočního tlaku ve čtvrtině a polovině modelu je patrné, že vypuštění sopouchu z modelu nemá podstatný vliv na napjatost v okolí svahu. Lze proto předpokládat, že také výpočet odtěžovacích stupňů s tímto modelem by nevedl k výsledkům lišícím se od výsledků základní varianty.

Pokusili jsme se zkonstruovat ještě původní napjatost se zvýšeným horizontálním napětím. Při jejím vytváření bylo naším cílem zvýšit napjatost v prostoru, kde byly prováděny polní zkoušky. Postupovali jsme následovně: Po druhém přitěžení jsme zvýšili přetvárné moduly z hodnot použitých v základní variantě na  $200$  MPa. Výsledná napjatost ve čtvrtině modelu vyhovuje zadanému požadavku, avšak srovnání těchto variant uprostřed modelu ukazuje pokles hodnoty součinitele bočního tlaku v hloubkách  $50$  až  $250$  m pod terémem.

Právě z tohoto prostoru jsou však k dispozici vodní tlakové trhací zkoušky, a proto můžeme konstatovat, že základní varianta se naměřeným hodnotám blíží více než varianta posledně vytvořená. Na základě tohoto poznatku nebyl výpočet odtěžovacích kroků s touto původní napjatostí realizován.

## Vyhodnocení výsledků MKP

Chování masívu jako odezva na odtěžování skrývek se obecně jeví jednak jako odlehčení, způsobující posuny převážně vzhůru, a jednak jako posun do odebraného prostoru (v případě povrchu krystalinika). Velikost vektorů je ovlivněna tloušťkou odtěžované vrstvy, modulem přetvárnosti a přítomností dislokací. Maximální posuny se vyskytují v prostoru pánve vždy na povrchu odtěžovaného

stupně. Pokud je odtěžovaná vrstva rovnoměrná, mají posuny vertikální směr s orientací vzhůru. Maximální hodnota přírůstku posunu v jedné etapě činí 20–30 cm u základní varianty a 25–35 cm u doplňkové varianty. Celkové maximální nadzvednutí činí u první varianty cca 60 cm a u druhé varianty cca 80 cm. Celkový vodorovný posun krystalinika do pánve má maximum 5 cm, resp. 6 cm.

Stav napjatosti charakterizovaný osami hlavních napětí svědčí o dostatečné hladkosti řešení, tj. o vhodné podrobnosti sítě a pozvolných přechodech z více zahuštěných oblastí do méně zahuštěné sítě. Tahové zóny rozhodující pro posouzení stability se v průběhu odtěžování u obou variant nevytvářejí.

Nejinformativnější údaje o tendenci porušování masívu lze získat z výkresů porušení a z výkresů hodnot lokálních stupňů bezpečnosti. Ojedinelý výskyt porušených prvků v průběhu celého výpočtu nemá praktický význam a žádný dopad na stabilitu. Z hlediska čerpání smykové pevnosti je možné konstatovat, že lokální stupně bezpečnosti ojedinele poklesnou na povrchu pod hranici 1,5.

Výsledky řešení MKP jsme použili pro výpočet celkové stability svahu. K výpočtu stupně stability svahu ( $S$ ) jsme zvolili smykovou plochu, jdoucí kontaktem č. 1 v místě nejstrmějšího svahu a vybíhající na povrch v místě klínu. Dále jsme použili hodnoty vypočtených napětí a parametry smykové pevnosti.

Stupeň stability svahu byl stanoven jako poměr součtu pasívních sil k součtu sil aktivních. Pro základní variantu byly počítány stupně stability za předpokladu  $c = 70$  kPa (výsledek  $S = 2,6$ ) a za předpokladu  $c = 0$  (výsledek  $S = 2,2$ ). Obdobně pro doplňkovou variantu byly počítány stupně stability za předpokladu  $c = 30$  kPa (výsledek  $S = 2,7$ ) a za předpokladu  $c = 0$  (výsledek  $S = 2,5$ ).

## Závěr

Z provedeného řešení stabilitního problému na matematických modelech (za uvedených okrajových podmínek

a při zadaných vstupních údajích) vyplývá, že závěrné svahy velkolomu, navržené ve III. profilu lokality Jiřetín včetně svahu krystalinika, jsou stabilní. Lokální stupně bezpečnosti jsou vesměs větší než 1,5 – jen ojedinele se vyskytují při povrchu nižší hodnoty, které jsou z hlediska celkové stability nepodstatné. Provedený výpočet stupně stability svahu podle zvolené smykové plochy, o níž si myslíme, že je jednou z nejnebezpečnějších, vykázal u obou výpočetních variant hodnoty větší než 2. Vzhledem k těmto zjištěním by z hlediska stability území neměly nastat žádné větší problémy při těžbě v daném profilu. Pro další postup jsme doporučili, aby na základě výsledků modelového řešení MKP byla vytvořena síť monitorovacích objektů, které by umožňovaly měření deformací masívu během těžby. Srovnáním deformací s výpočtem by se ověřila správnost provedeného řešení a z toho vyplývající bezpečnost těžby v analyzovaném profilu.

*K tisku doporučil J. Rybář*

## Literatura

- DOLEŽALOVÁ, M. (1983): Jezeří – výpočet stability bočního svahu uhelného velkolomu pomocí MKP. – MS Hydroprojekt. Praha.
- (1985): Požadavky na přípravu vstupních dat při řešení geomechanických úloh MKP. Zpráva 48 úkolu C-52-347-205. – MS Staveb. geol. Praha.
  - (1986): Dráhově závislý pseudoelastický konstitutivní model pro zeminy a horniny užívaný při výpočtech MKP. – MS Dopravoprojekt Brno.
  - (1987): Modelování povrchového velkolomu s využitím výsledků měření. Čs. příspěvky pro 11. konferenci O mechanice zemín. – ÚTAM ČSAV, Praha.
- KLOSS, K. - ŠILAR, J. (1987): Zpráva o výsledku analýzy stability svahů provedené MKP na profilech „13“ a „JZ“ Jánského vrchu. – MS Staveb. geol. Praha.
- (1988): Stabilitní studie MKP - kap. 3. 4. 2 ze závěrečné zprávy o výsledcích IG, HG a GT prací úkolu: Prunčřov - Chomutov - realizace. – MS Staveb. geol. Praha.
  - (1989): Matematické modelování stability závěrného svahu lomu Sítěleč. – MS Staveb. geol. Praha.

## Slope stability of the open pit coal mine defined by the finite element method

*(Summary of the Czech text)*

KAREL KLOSS

Received April 8, 1992

The article describes the techniques, procedures and results of mathematical modelling of the natural slope and the artificial slope of the open pit coal mine in section No. 3 near Jiřetín, North Bohemia. The slope stability has been derived from the finite element analysis of stress and deformation state. The stability of the Krušné hory mountain slopes is affected by overburden removal and by the dip and height of the subsequently created artificial slope.

An outline of the conception of the modelling method is given. The computational model and the procedure of its composition are described. The original stress generation, the FEM results and their interpretation are presented.

### Explanation of the text-figure

1. Mathematical model for finite element method applied to the slope stability problem at the Jifetín locality.

Block materials: 1 – Quaternary sediments, 2 – overlying clays, layer 1, 3 – overlying clays, layer 2, 4 – brown coal seam, 5 – underlying formation, 6 – kaolinized gneiss, 7 – highly weathered gneiss, 8 – low weathered gneiss, 9 – fresh granite-gneiss, 10 – volcanic breccia, 11 – highly fractured gneiss.

Contact materials: a – kaolinized gneiss, crystalline rocks – sediments

boundary, b – plastic sandy clay, clay-sandy rubble in low weathered gneiss, c – clay-sandy rubble, weathered gneiss in fresh granite-gneiss, d – clay-sandy rubble, weathered gneiss in highly fractured gneiss, e – weathered gneiss in fresh granite-gneiss, f – faults in sediments generally.

Plan of the overburden disposal is given by the years 2018, 2021, 2024, 2027, 2030 and 2035.

Initial state of stress was created by adding of zones: F0 – basic, F1 – first, F2 – second, F3 – third.