

Svahové deformace: blok 2
Dynamika svahových pohybů

Syllabus

- faktory vzniku S.D.
- spouštěcí mechanismy
- cykličnost v průběhu porušení svahů
- modelování svahových deformací (stabilitní analýzy, kinetické modelování, numerické modelování hlubokých svahových deformací)
- aplikace GIS při predikci svahových pohybů

Faktory vzniku svahových deformací:

primární: zemská gravitace

strukturně-geologické: tektonické X litologické (puklinatost, vrstevnatost, geotechnické parametry materiálu)

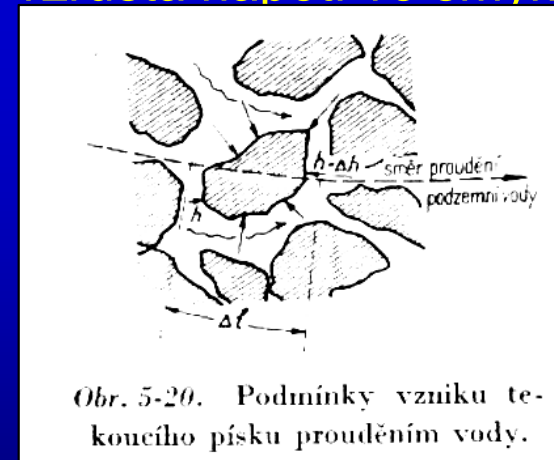
geomorfologické (sklon svahu, eroze, potenciální energie)

seizmické (zemětřesení)

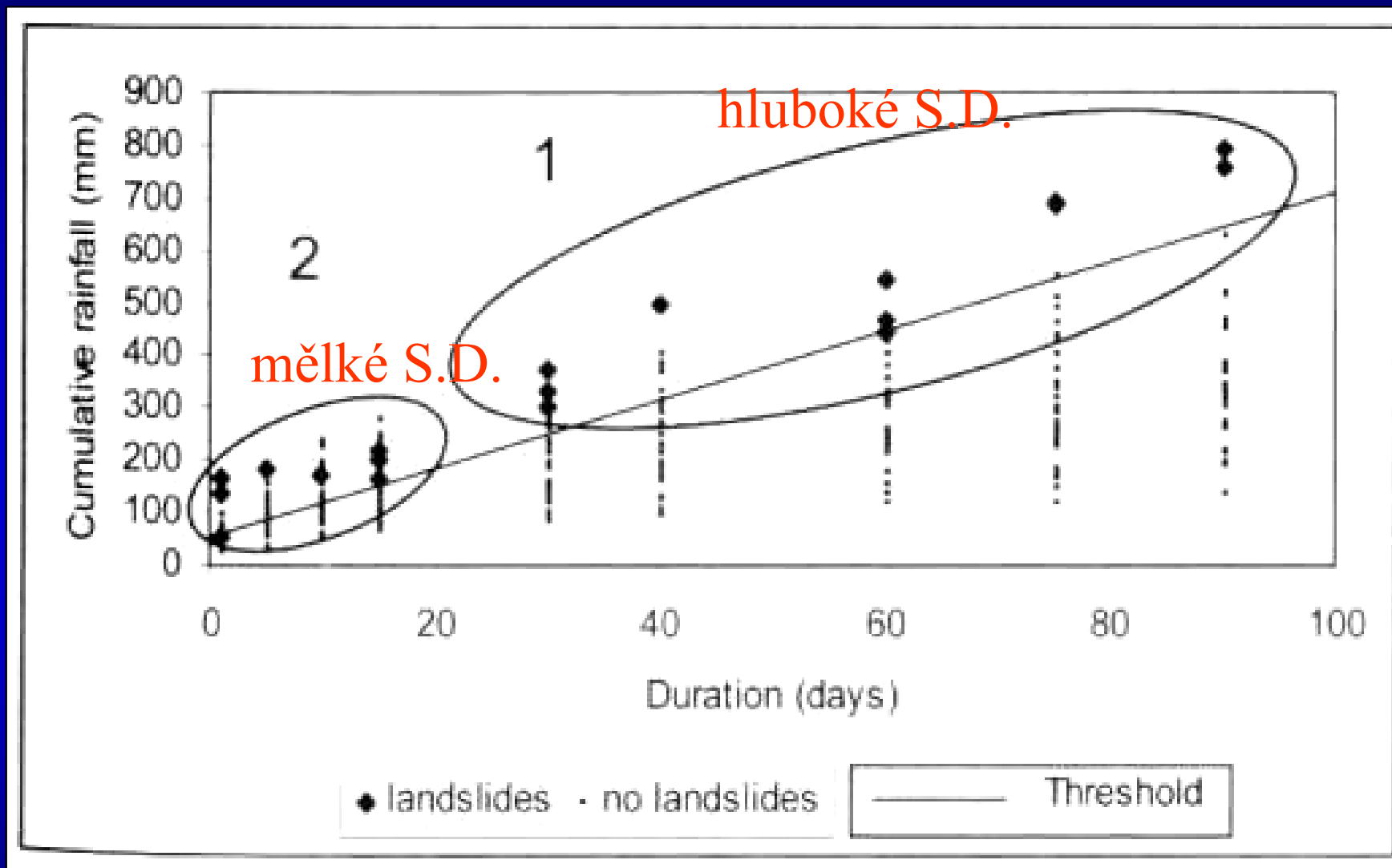
klimatické (srážky: distribuce, délka, intenzita, střídání teplot)

antropogenní

- změna sklonu svahu - porušena rovnováha sil, vzrůstá napětí ve smyku
- tíže hornin
- náhlé přetížení
- otřesy, vibrace
- změny obsahu vody (pórové tlaky)
- objemové změny jílovců bobtnáním
- objemově - teplotní změny
- rychlé změny vodní hladiny
- podzemní voda: proudící voda, chemická a mechanická sufoze, vztlaková síla
- činnost mrazu
- zvětrávání



Vztah kumulativních srážek a délky jejich trvání vzhledem k aktivaci sesuvů



cykličnost v průběhu porušení svahů

řada faktorů vzniku S.D. působí cyklicky

extraterestrické (dle Špürka):

- změna fázových úhlů planet sluneční soustavy a měsíce
- slapové jevy

klimatické:

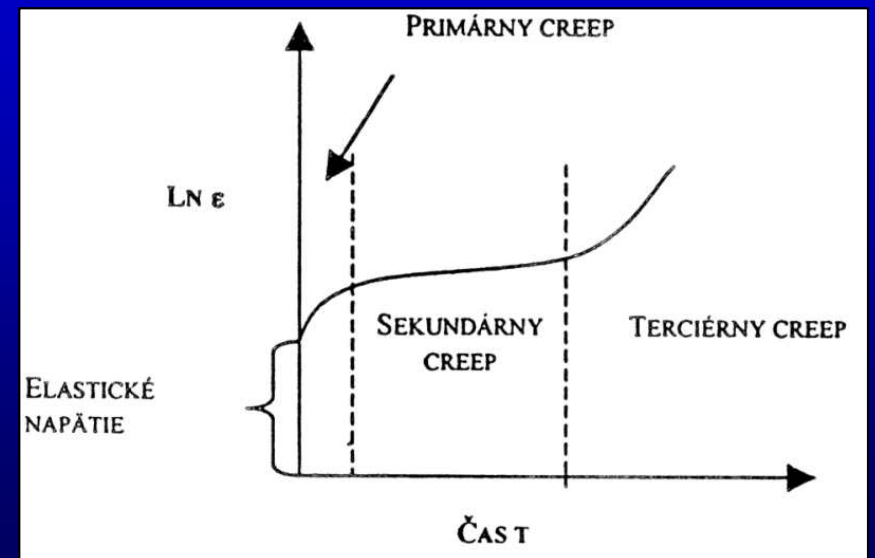
- roční chod teplot (způsobuje teplotně-objemové změny masívu)
- roční chod srážek (jarní tání, červencové deště, extrém: monzunové oblasti)
- dlouhodobější změny klimatu (glaciál / interglaciál, klimatické oscilace)

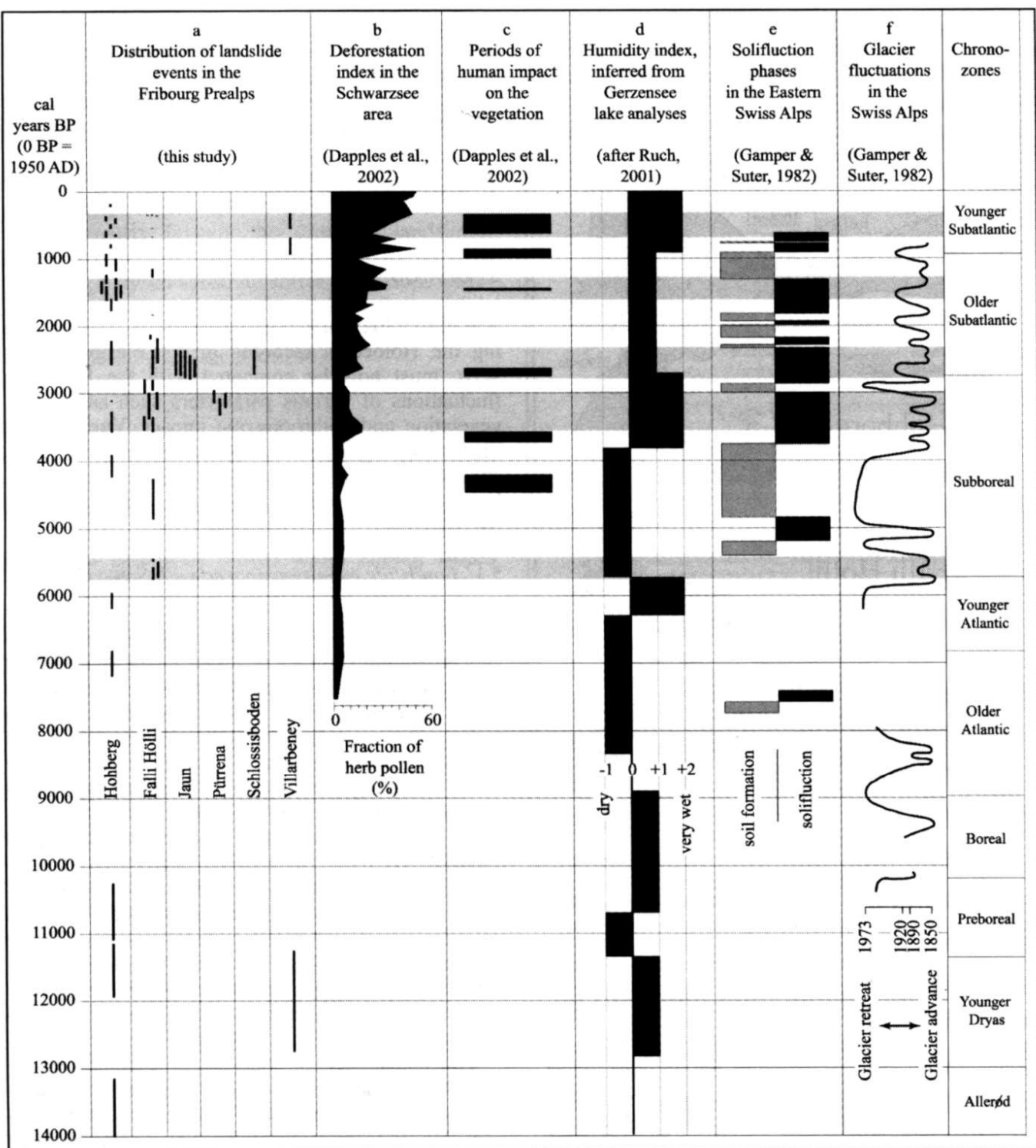
rheologické:

• **creep**: pomalé plastické deformování materiálu, bez sm. ploch
primární (tlumený)

sekundární (ustálený) rychlost přetváření konst.,
přetrhání a regenerace vazeb v rovnováze

terciérní (akcelerační) může přejít v sesouvání nebo se utlumí
a dochází k cykličnosti





Sesuvné fáze
pozdního glaciálu a
holocénu ve
Švýcarských Alpách
(Dapples et al. 2002)

Svahové deformace: základní geotechnické vlastnosti podloží

ρ objemová hmotnost zeminy / horniny

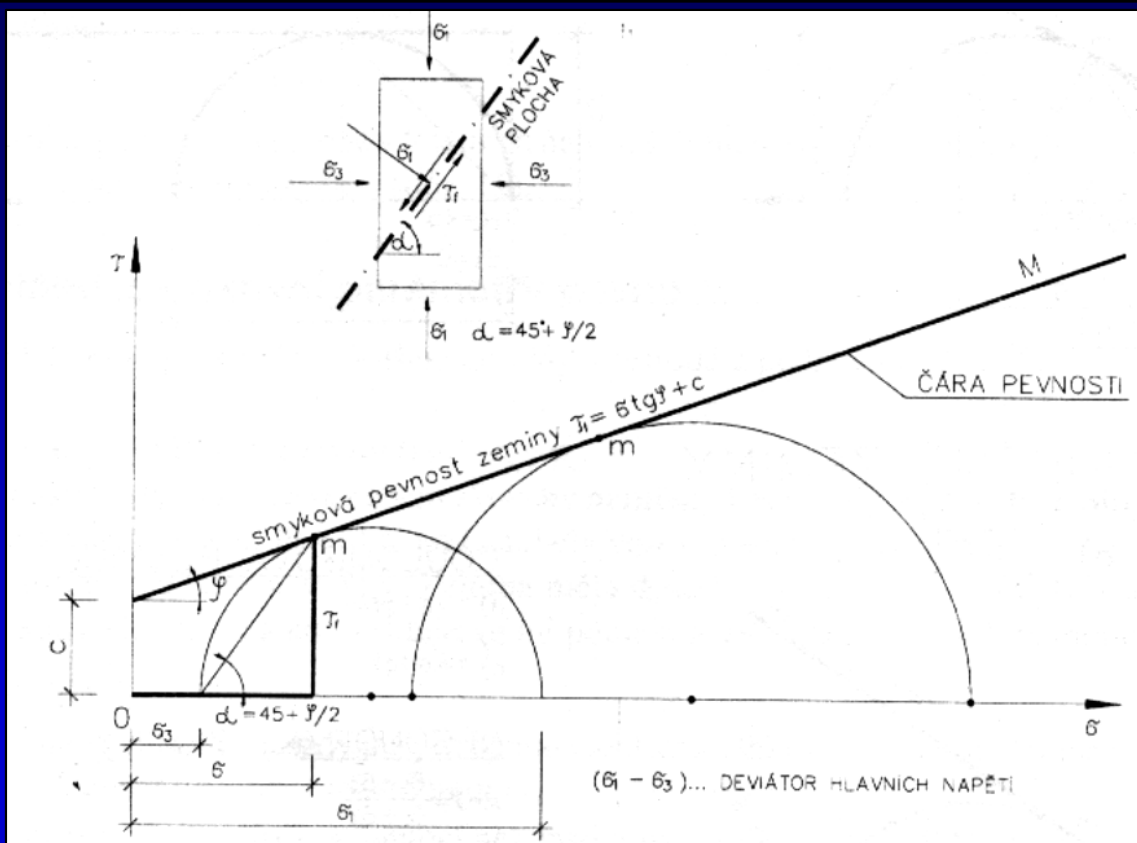
$$\rho = m / V \text{ nebo } \rho = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot S_r \cdot \rho_w \quad [\text{kg.m}^{-3}]$$

ρ_s ... hustota pevných částic, S_r ... stupeň nasycení, ρ_w ... hustota vody, n ... pórovitost

pro geotechnické výpočty často Objemová tíha $\gamma = g \cdot \rho$

Konzistence:

Konzistenční meze				
Mezi jednotlivými konzistenčními stavy jsou smluvní meze, tzv. konzistenční meze.				
stav tvrdý	stav pevný	stav plastický		stav tekutý (kašovitý)
		tuze	měkce	
	w_s	w_p		w_L
w_s	– mez smrštitelnosti,			
w_p	– mez plasticity,			
w_L	– mez tekutosti.			



Smyková pevnost τ_f (smykové napětí na mezi porušení):

COULUMBŮV VZTAH: $\tau_f = \sigma_f \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$

τ_f [MPa] Smyková pevnost τ_f , tangenciální napětí na smykové ploše (vnitřní odpor zeminy)

σ_f [MPa] normálové napětí působící kolmo na smykovou plochu

c [MPa] soudržnost (koheze) zeminy, dána vzáj. vazbami mezi částicemi a vodou

φ [°] úhel vnitřního tření, reprezentuje tření mezi zrny skeletu

Modelování svahových deformací

důležité pro pochopení a posouzení porušeného svahu, k možným předpovědím dalšího deformování a posouzení možného vlivu lid. zásahů

analytické X numerické modely

analytické: statické X dynamické modely

kinematické modely

aplikace GIS při predikci nestabilit svahů,

Analytické přístupy

- deterministické metody umožňující jednoduchou (velmi zjednodušenou) odpověď
- postaveny na hraniční / kritické rovnováze sil a jsou prováděny na bázi statiky
- nejběžnějším výstupem je stupeň stability F_s

Numerické metody

- jsou rovněž dynamické, materiál v dynamické rovnováze
- postaveny na metodách konečných rozdílů, konečných prvků a hraničních prvků
- složité počítačové modelování,
- software: Flac, Flac 3D, Udec, Slope, Plaxis

statické X dynamické modely

Statické („inženýrské“):

- posuzují sesuv v jeho uklidněném stavu a hledají impulzy, vedoucí k jeho destabilizaci
- založeny na rovnováze sil podél potenciální smykové plochy, síly stabilizující X destabilizující, faktor (stupeň) stability

$$F_s = \text{síly stabil.} / \text{destabil.}$$

další upřesnění: pórové tlaky, různé definování stříž. napětí, seizm. impulzů.....

$$F_s = 1 \quad \text{stav indiferentní}$$

$$F_s > 1 \quad \text{stav stabilní}$$

$$F_s < 1 \quad \text{stav nestabilní}$$

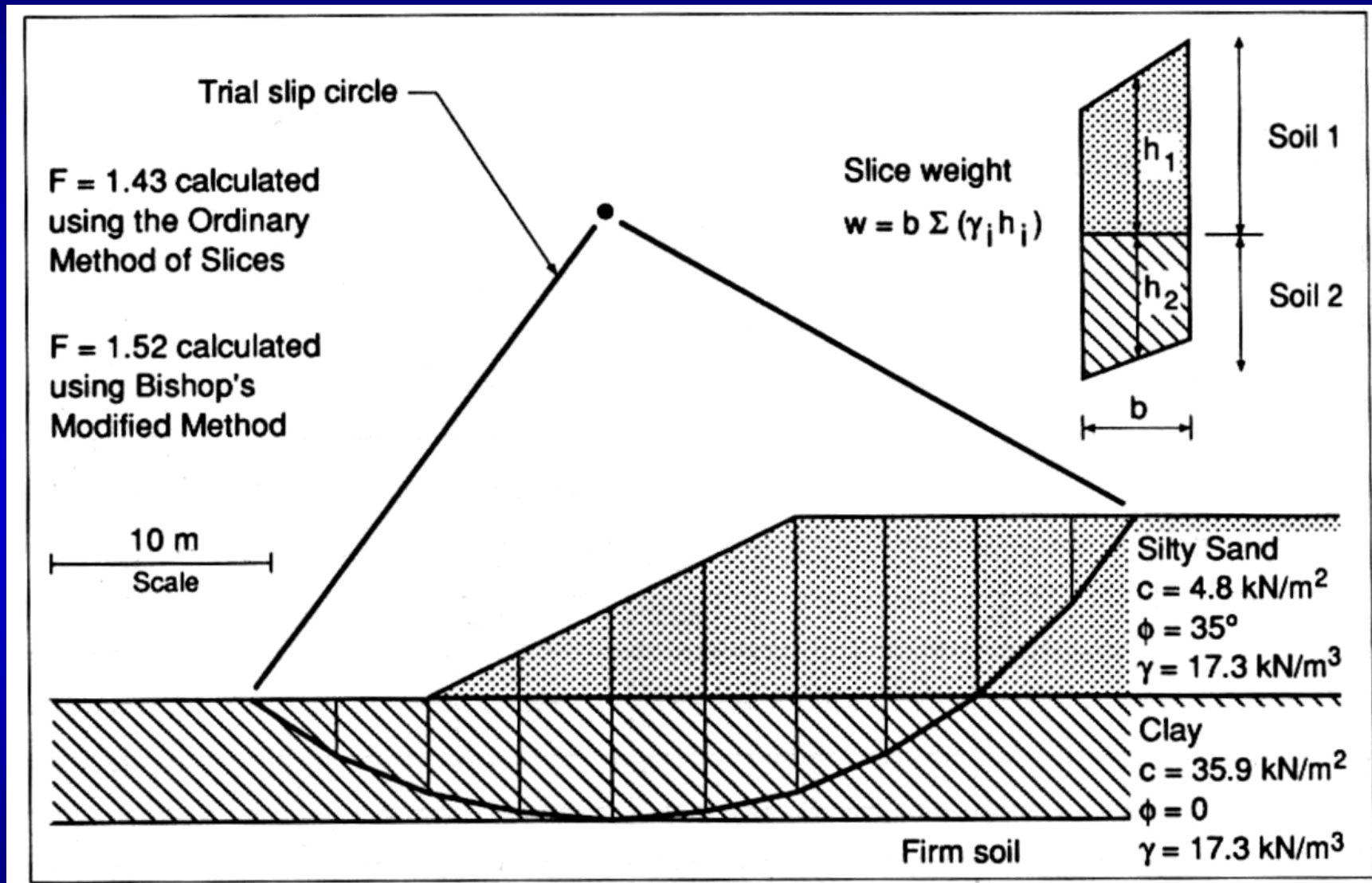
dynamické („geovědní“) modely

- započítávají pohyb sesuvu jakmile se stal aktivní;
- založena na počítání pohybu, odchylka faktorů způsobí pokles st. stability pod 1. Poměr pasivních a akt. sil je méně důležitý než rozdíl mezi nimi, který udává sesuvu zrychlení
- aplikace při seizmickém spouštění sesuvů pouze pro „non-brittle“ materiály

dílčí metody:

- **metoda pásků**: rotační plochy, okamžitá rovnováha momentu sil, opomíjí rovnováhu sil
- **Bishopova metoda**: rotační plochy, rovnováha vertikálních sil a momentů sil, opomíjí vodorovné síly
- **metoda rovnovážných sil**: jakýkoliv tvar sm. plochy, založena na rovnováze sil, opomíjí rovnováhu momentů sil
- **Jambuova a Morgenstein-Priceova**: jakýkoliv tvar sm. plochy, založena na rovnováze sil a momentů sil
- **Spencerova metoda**: jakýkoliv tvar sm. plochy, založena na rovnováze sil a momentů sil, boční síly uvažovány paralelně se sm. plochou

Statické stabilitní analýzy



$\theta =$

Slice	Weight	l	α	c	ϕ	u
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Trial #1 $F_a =$

Slice	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	ΔE
1						
2						
3						
4						
5						
6						

$\Sigma \Delta E =$

Trial #2 $F_a =$

Slice	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	ΔE
1						
2						
3						
4						
5						
6						

$\Sigma \Delta E =$

$$N_0 = \frac{\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi / F}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi / F}$$

$$N_1 = W N_0$$

$$N_2 = \frac{c l}{F} (\cos \alpha + N_0 \sin \alpha)$$

$$N_3 = u l (\sin \alpha - N_0 \cos \alpha)$$

$$N_4 = \cos \theta + N_0 \sin \theta$$

$$\Delta E = (N_1 - N_2 + N_3) / N_4$$

θ = side force angle - degrees

F_a = assumed F

W = weight of slice - kN/m

c = cohesion intercept - kN/m²

ϕ = friction angle - degrees

u = pore pressure - kN/m²

α = slice base angle - degrees

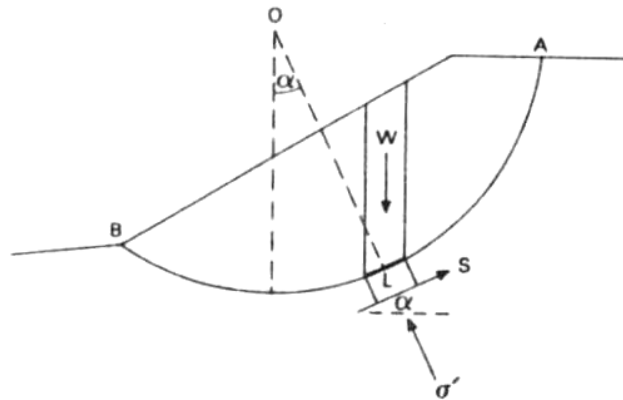
l = length of slice base - m

tabulka pro výpočet
rovnovážné metody s
konst. θ

The shear plane of a rotational slide is curved and therefore the stability analysis outlined in Box 7.2 must be modified. One way the stability of a rotational slide can be evaluated is to divide the slide into a number of 'slices' of length L and aggregate the forces acting on each of these slices (Fig. B7.3). The weight (W) is taken as operating through the centre of each slice. The angle of the shear plane (α) is calculated for each slice from the centre of rotation (O). The effective normal stress (σ') at the base of each slice is $W \cos \alpha$ and the shear strength (s) is $W \sin \alpha$. The safety factor (F) can then be defined as

$$F = \frac{\sum_B^A [cL + (W \cos \alpha - uL) \tan \phi]}{\sum_B^A W \sin \alpha}$$

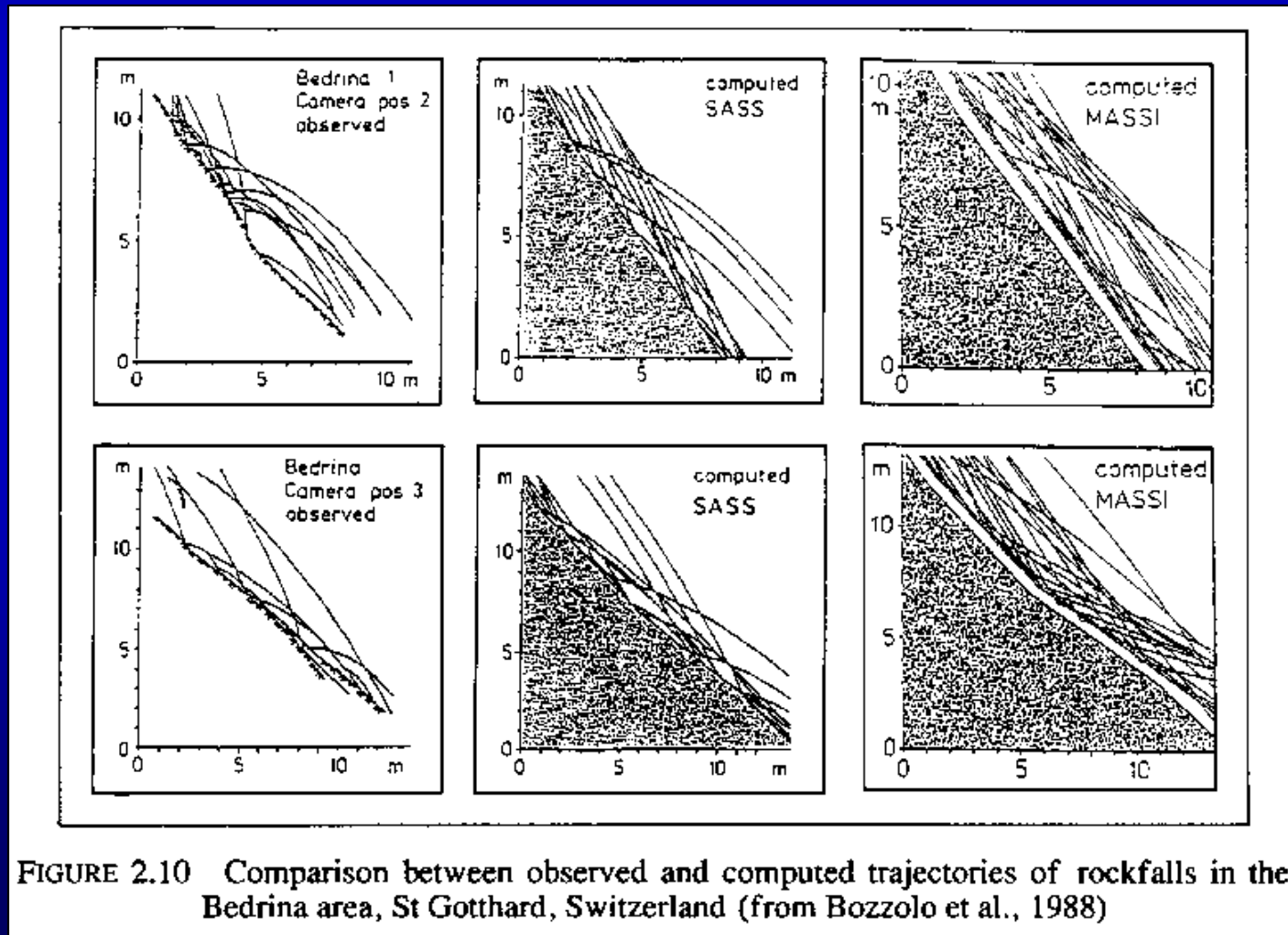
where c is cohesion, u the pore-water pressure at the base of the slice and $\tan \phi$ the angle of internal friction.



stabilitní analýzy:
metoda řezů /
pásků
 (method of slices)

kinematické modelování

- modelování parametrů dráhy bahenních proudů, sesuvů, sutí a říčených balvanů
- vstupní parametry: tvar, velikost a hmotnost pohybujícího se materiálu, sklon a tvar svahu
- např. program COLORADOFALL



Metoda konečných rozdílů (FDM),

*Kód numerického modelování pro geotechnické analýzy **FLAC 5.00**
(Fast Lagrangian Analysis of Continua)*

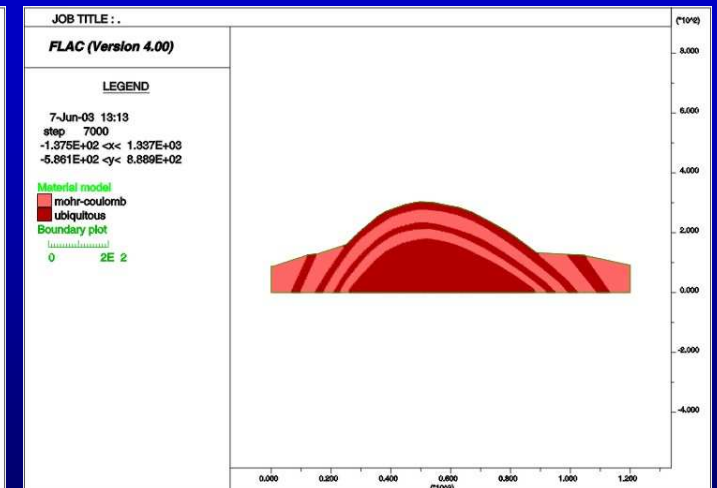
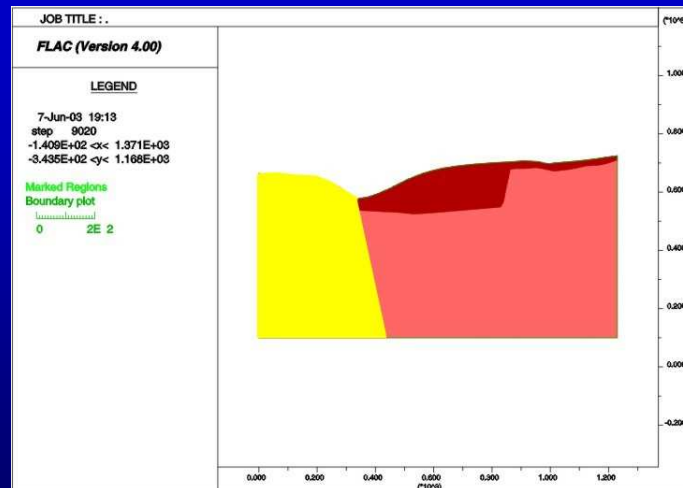
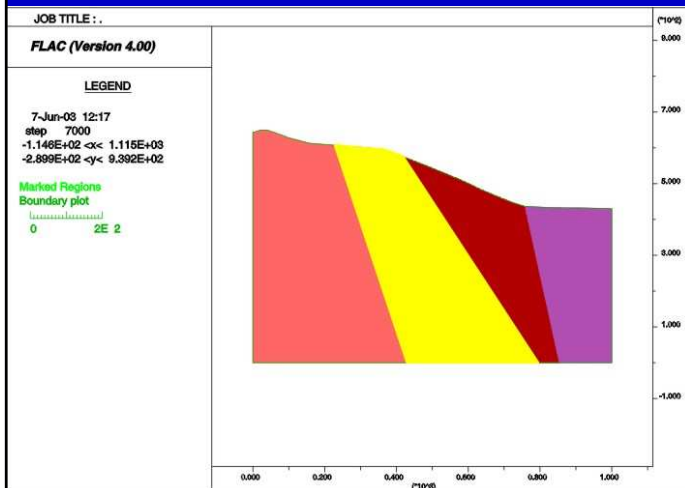
hornina považována za semi-homogenní

*Flac umožňuje sérií cyklických výpočtů diferenciálních rovnic
modelovat plnou nelineární reakci systému (zemina, skalní hornina,
roztok) na vnitřní a vnější vlivy*

Geotechnické parametry

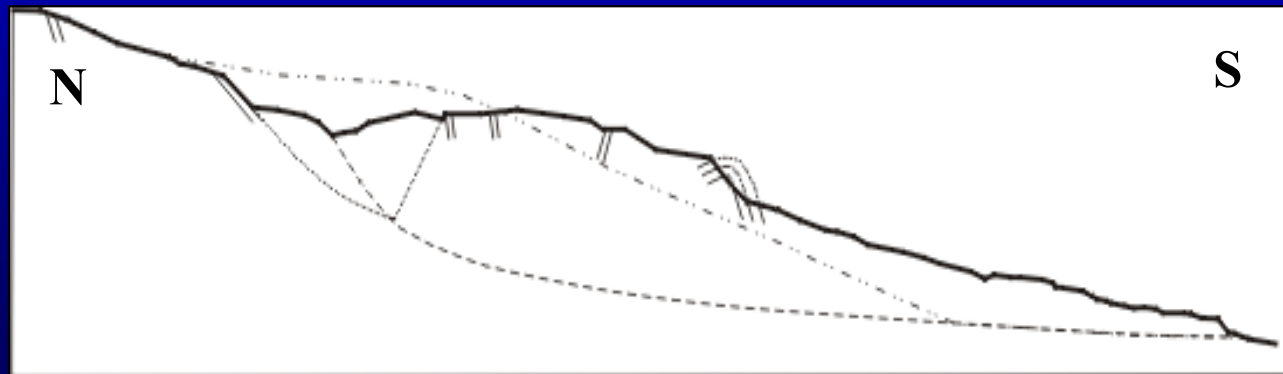
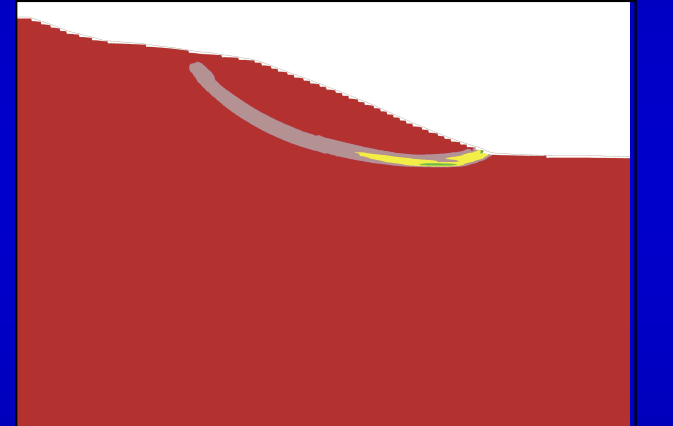
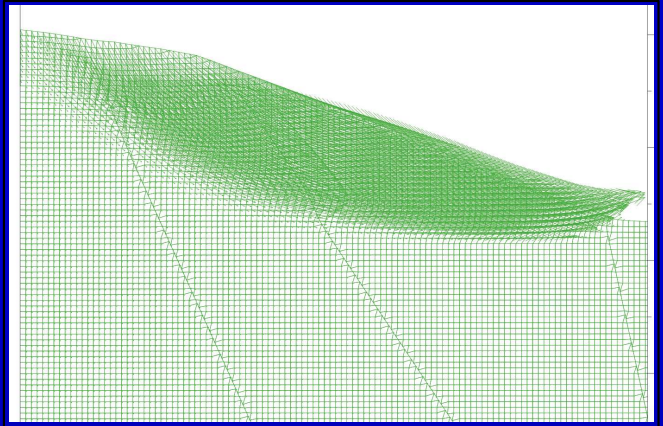
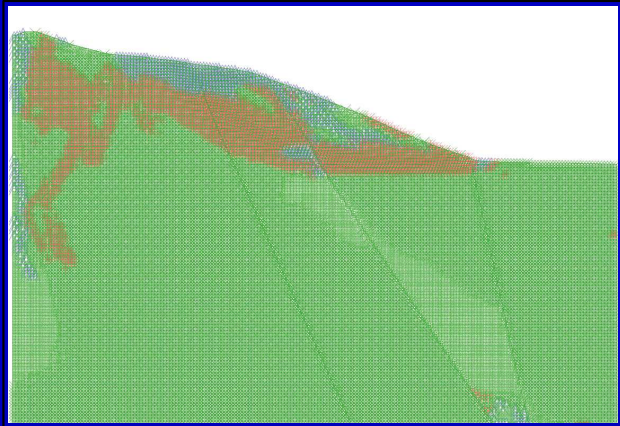
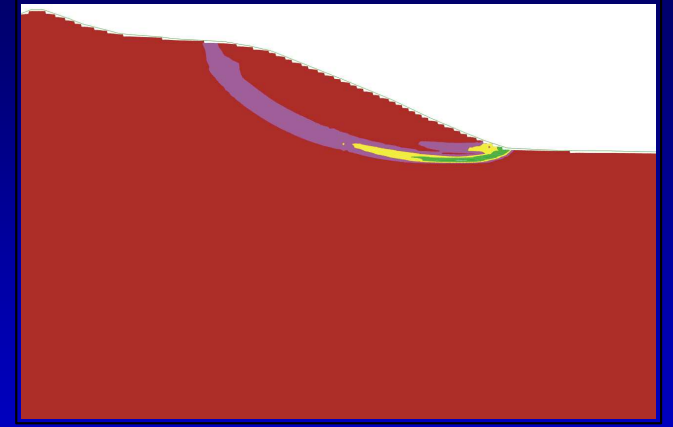
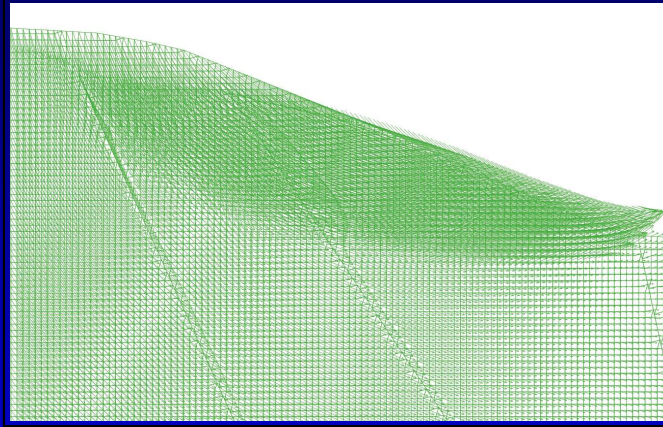
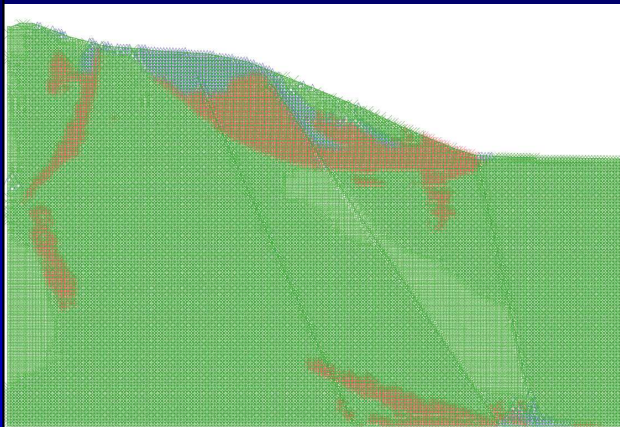
- zjištěny z výsledků laboratorních testů a tabelárních hodnot
- mírně upraveny
- hladina PV v blízkosti povrchu

sub-model	model type	material	density	bulk modulus	shear modulus	cohesion Cef	friction angle	tension	joint angle	joint cohesion	joint friction	joint tension
vac 9c	elastic	Solan Fm.	2700	2,70E+10	7,00E+09	1,04E+07	39					
	ubiq. joints	Beloveza Fm.	2600	1,00E+09	1,50E+09	2,00E+04	22	1,00E+04	170	8,00E+03	20	3,00E+03
	ubiq. joints	weathered B.F.	2300	5,00E+08	8,00E+08	5,00E+03	11	3,00E+03	170	6,00E+03	20	3,00E+03
kob 7	ubiq. joints	region 1	2500	2,00E+09	1,50E+09	2,00E+04	15	1,00E+04	45	0	15	0
	ubiq. joints	region 2	2500	3,00E+09	1,50E+09	2,00E+04	20	1,00E+04	110	0	15	0
	ubiq. joints	region 3	2500	3,00E+09	1,50E+09	2,00E+04	20	1,00E+04	60	0	15	0
	ubiq. joints	region 4	2500	3,00E+09	1,50E+09	4,00E+04	25	1,00E+04	90	0	15	0
kop 3	ubiq. joints	sandstones	2600	2,60E+10	7,00E+09	1,04E+07	39		90	1,00E+04	15	
	mohr-coulomb	upper shale	2100	5,00E+08	6,00E+08	1,00E+04	12					
	mohr-coulomb	inner shale	2200	1,50E+09	8,00E+08	1,00E+04	15					
	mohr-coulomb	side shale	2400	6,60E+09	2,20E+09	1,00E+04	15					

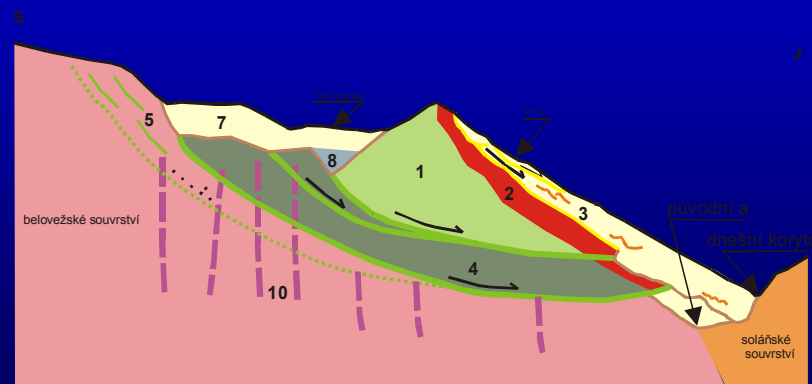
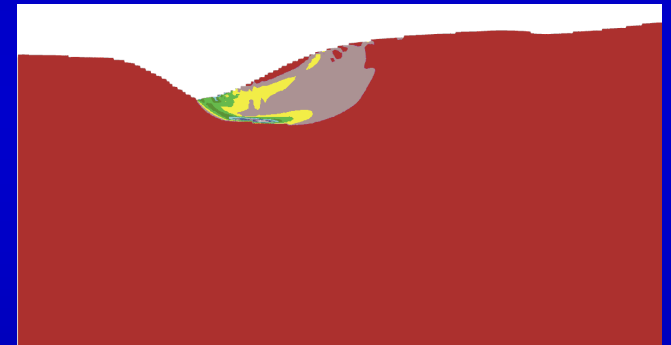
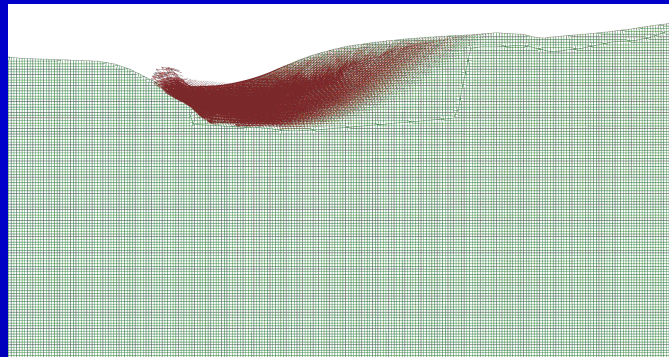
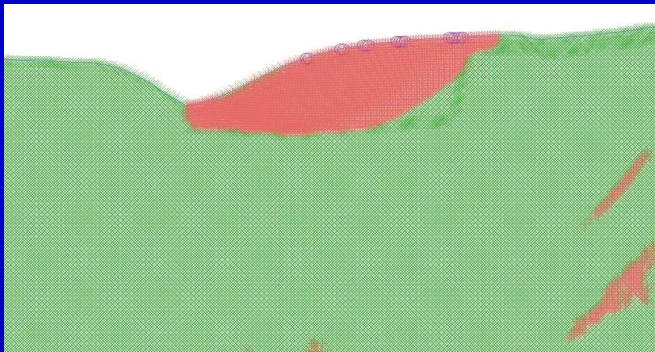
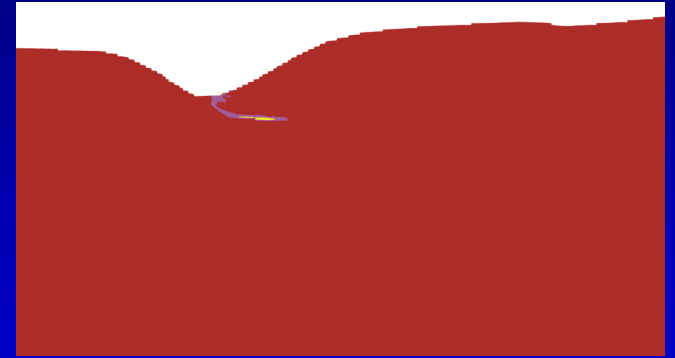
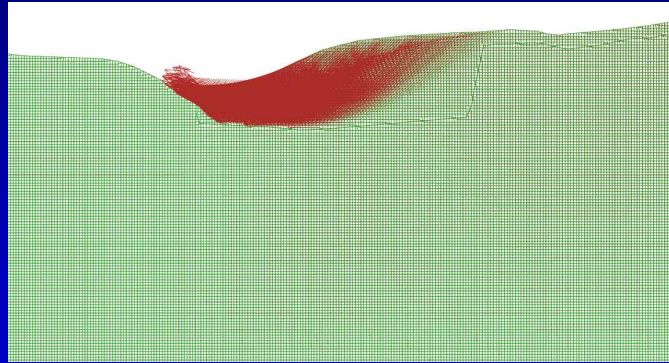
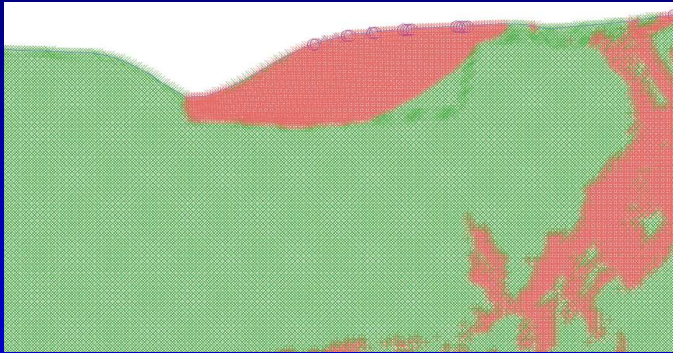


Flac 5.0

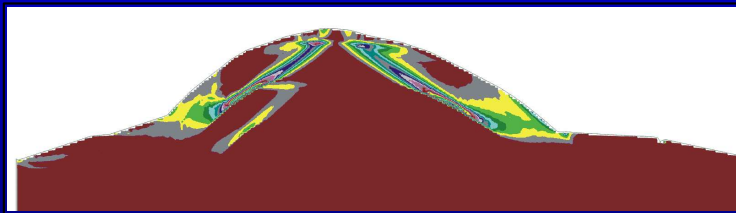
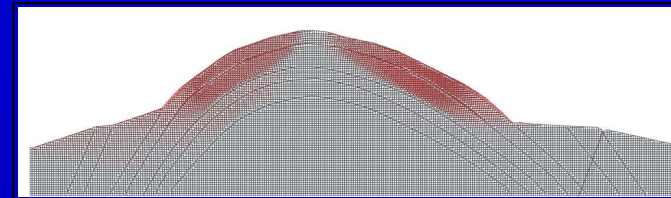
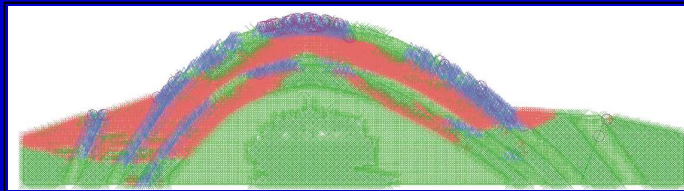
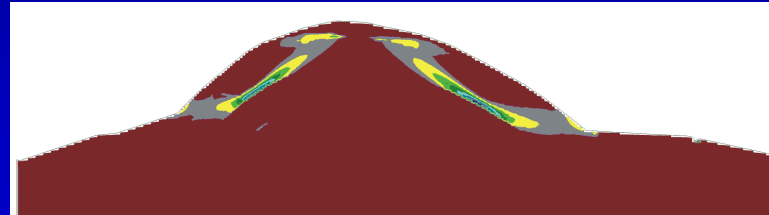
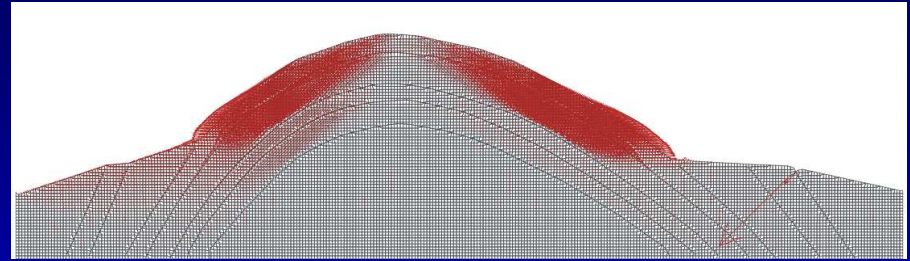
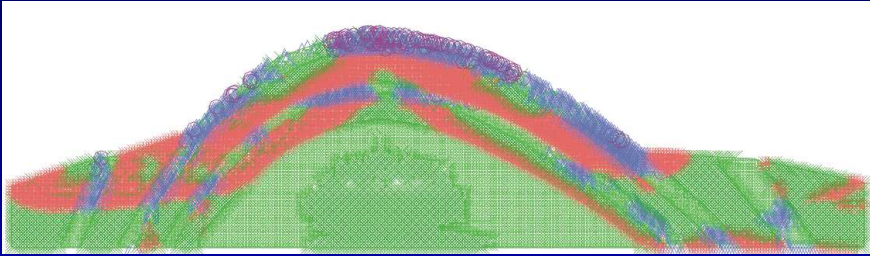
state



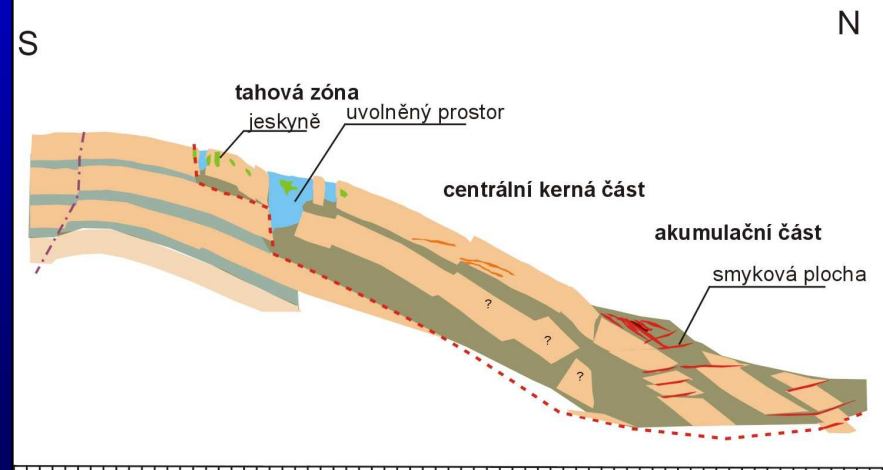
Flac 5.0



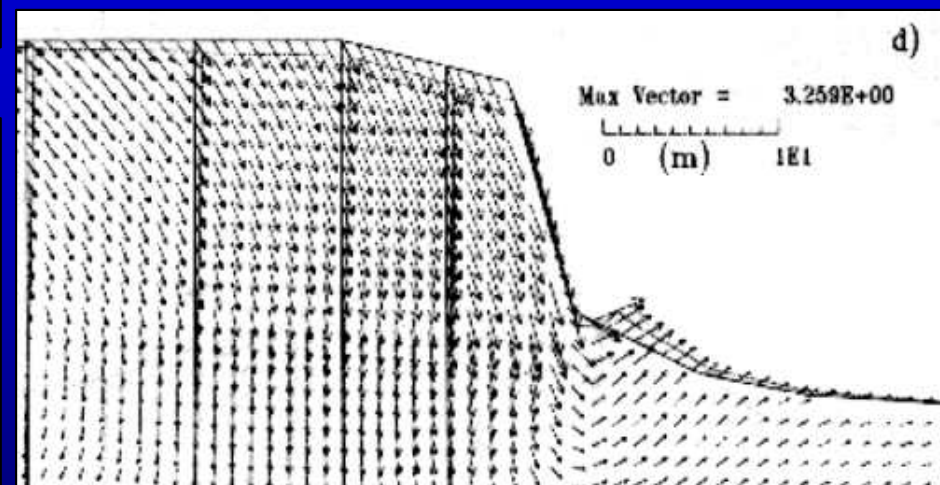
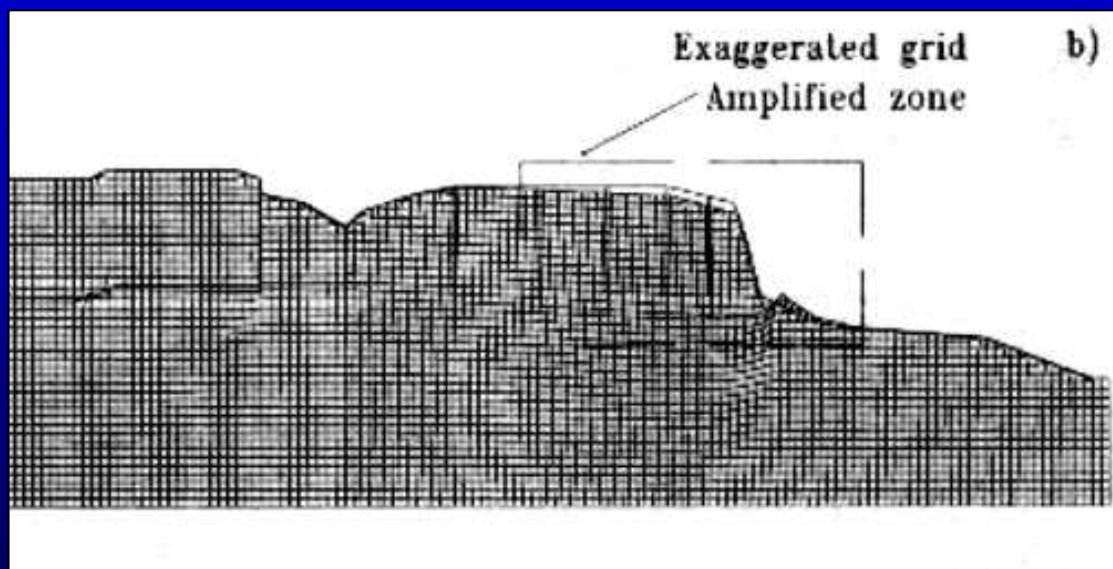
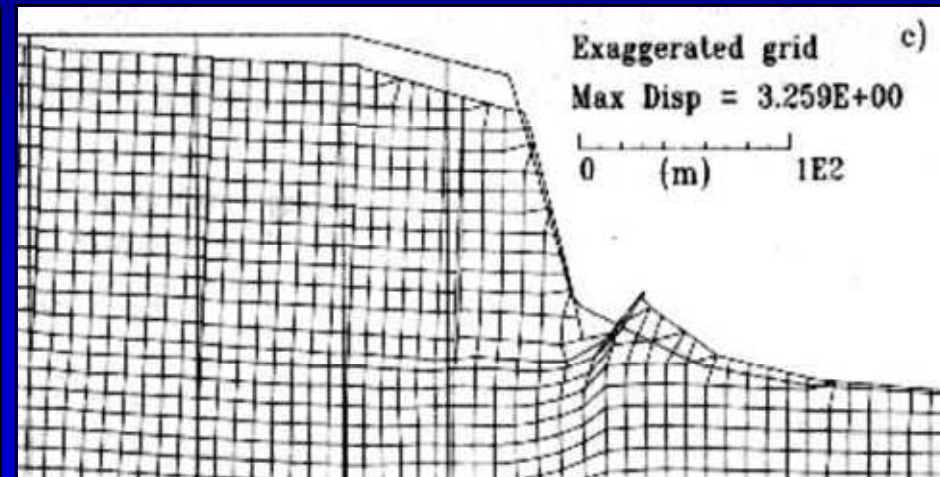
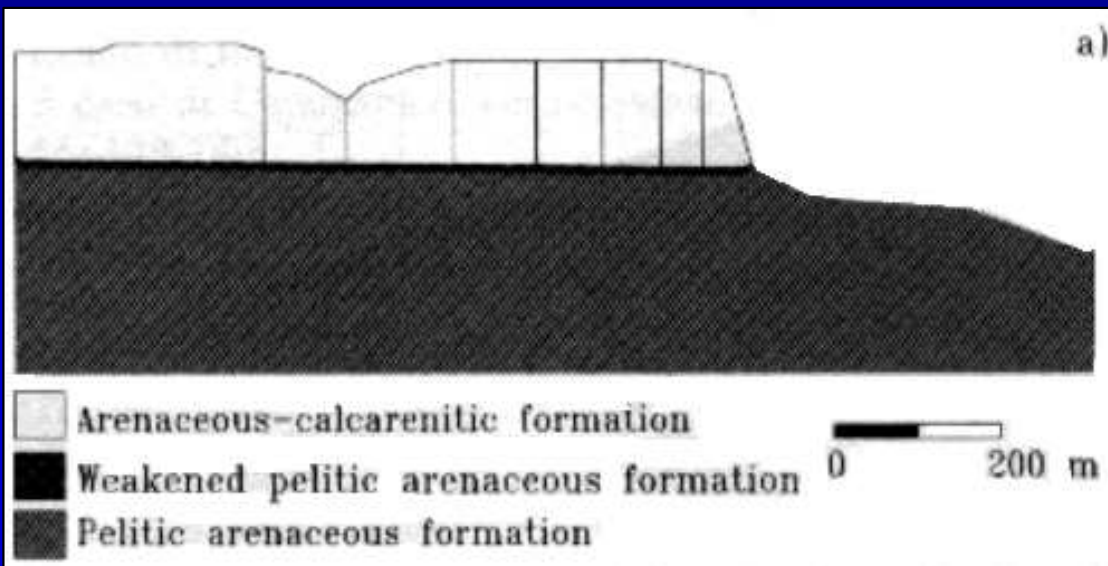
Flac 5.0



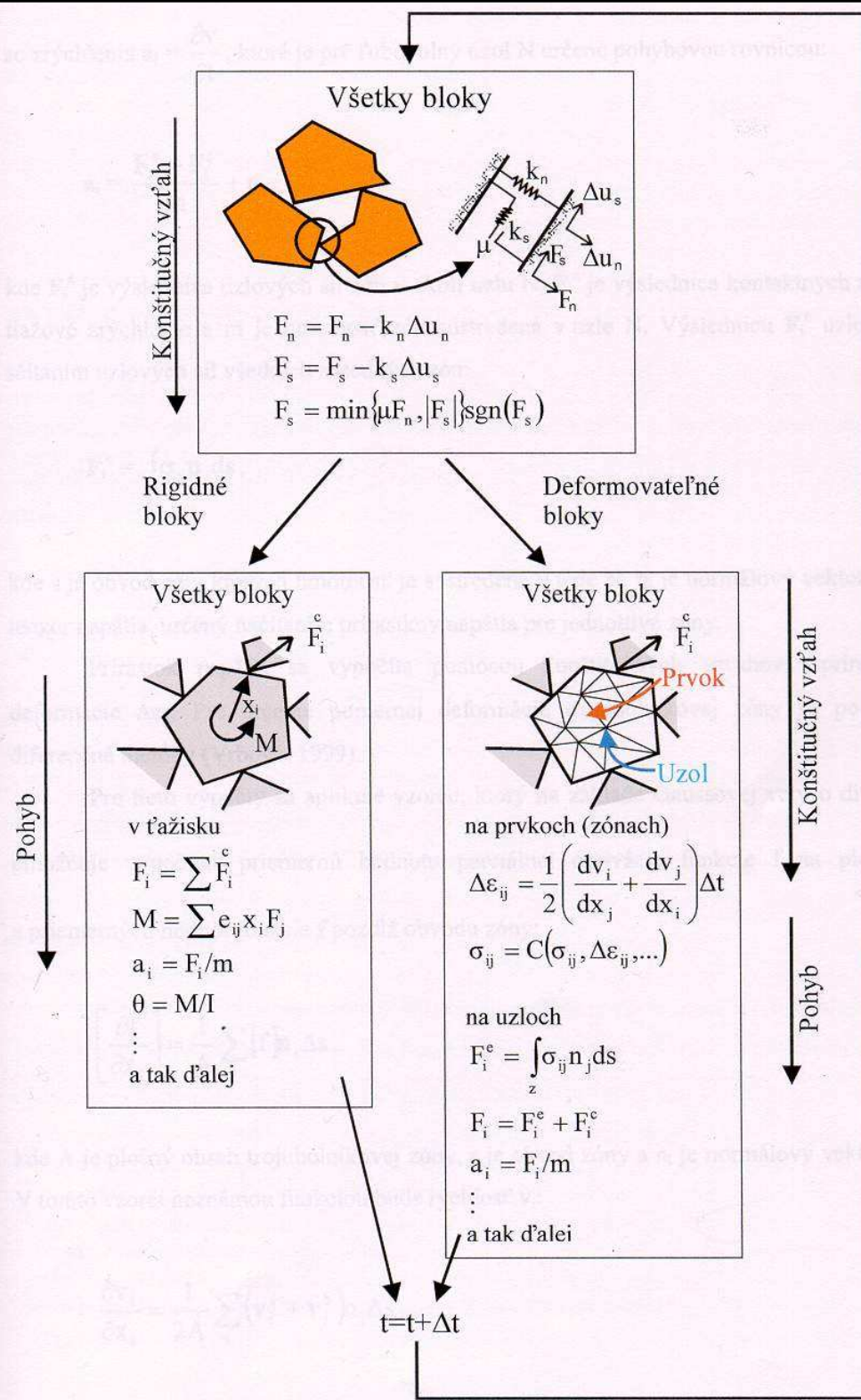
Svahová deformace Kopce



Flac 3.0

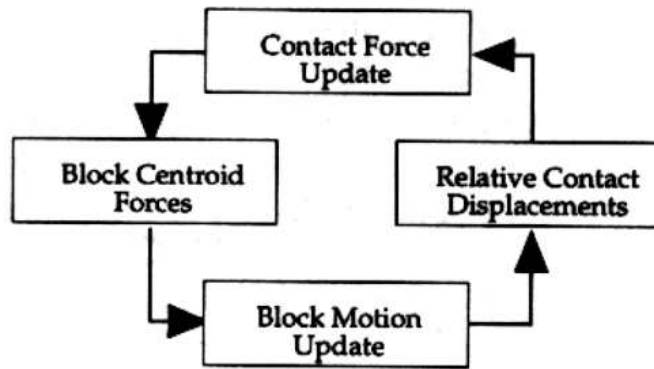


Metoda konečných prvků (FEM)

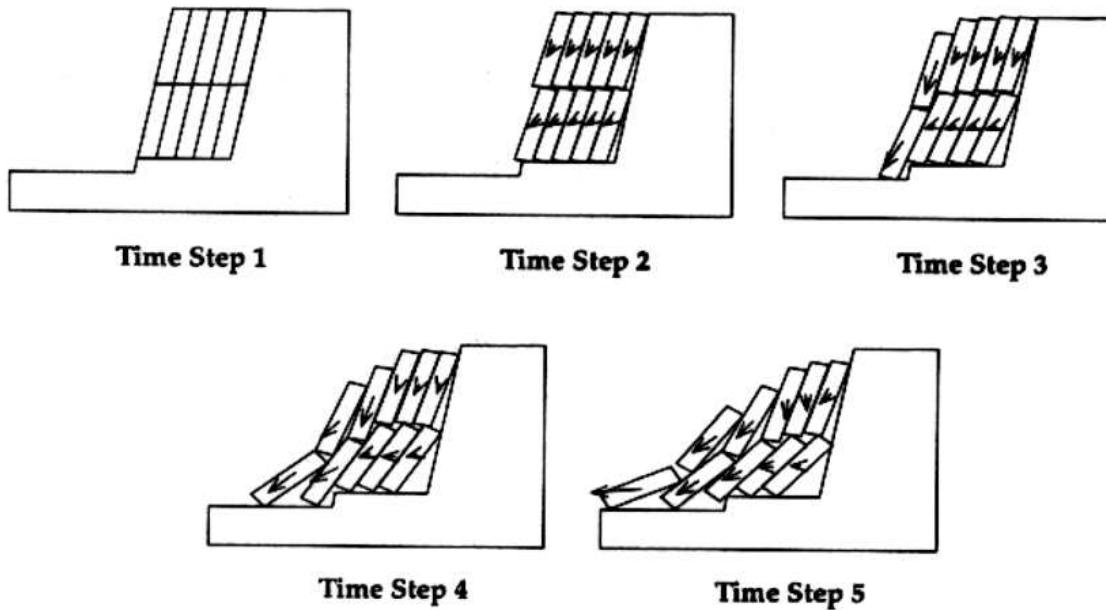


**Výpočtová schéma
pre jeden časový krok
(Itasca 1993)**

(a) Calculation Cycle



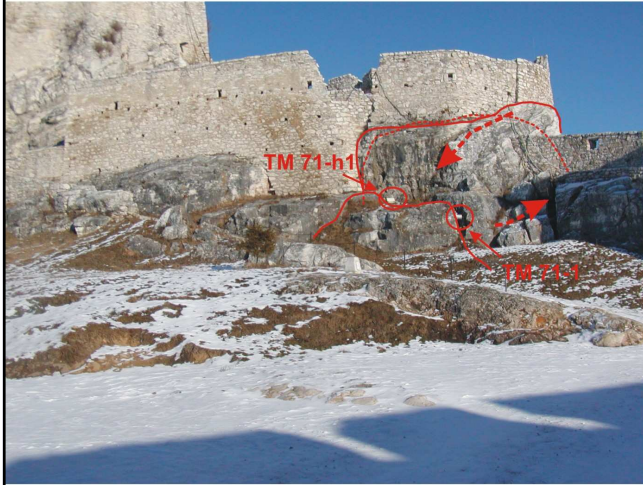
(b) Reverse Toppling Example



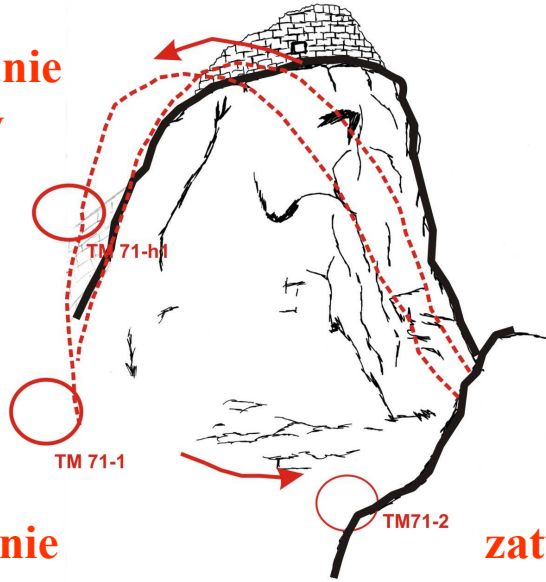
Numerické modelování:

metoda konečných prvků

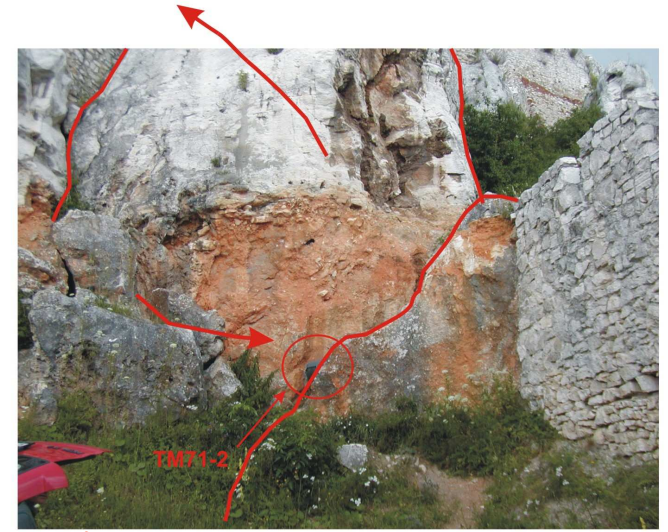
(Udec)



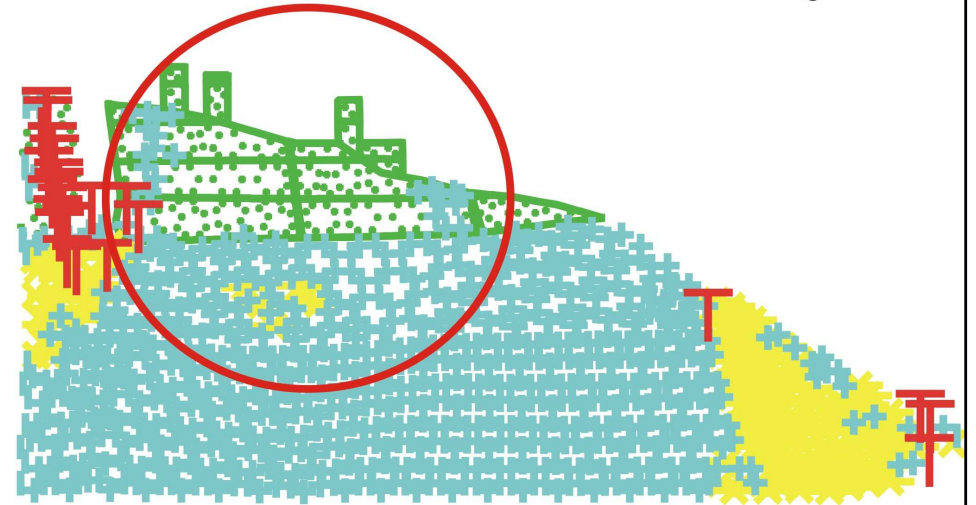
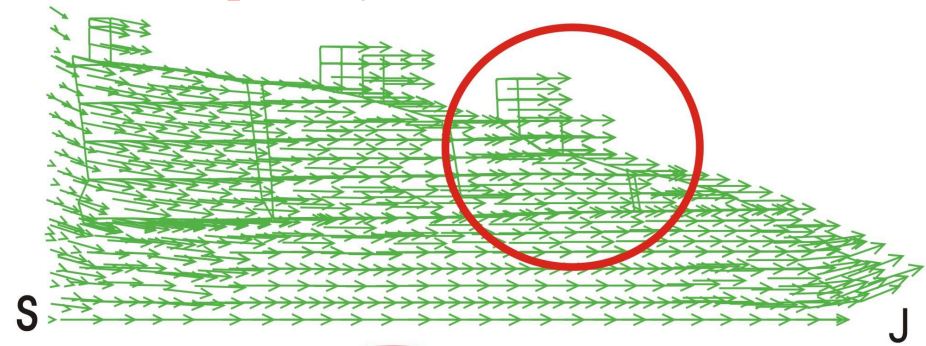
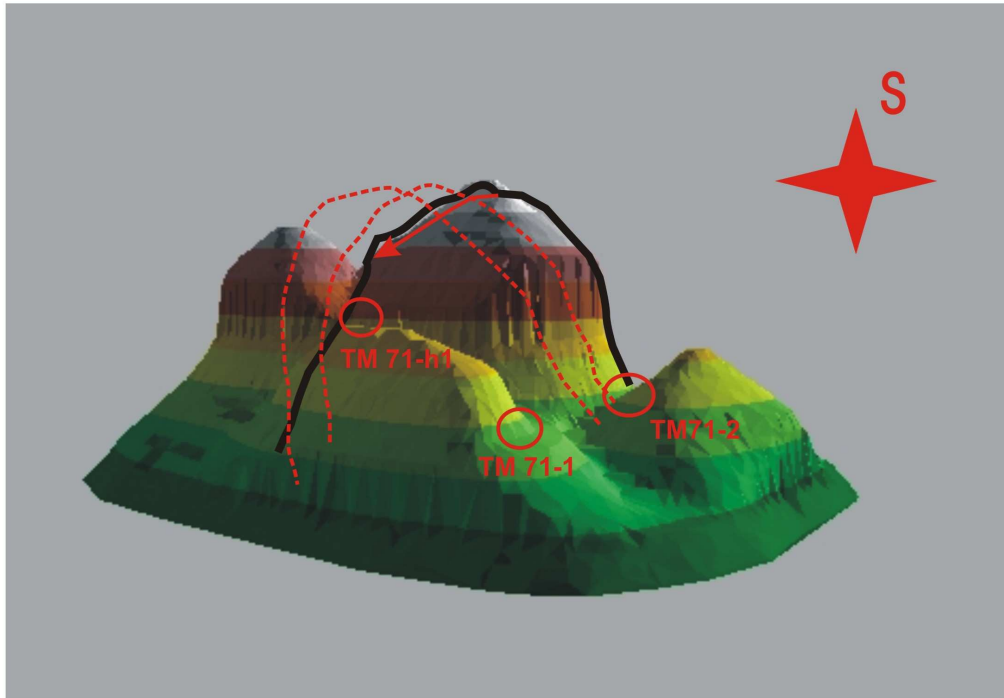
zatváranie pukliny



otváranie pukliny



zatváranie pukliny



JOB TITLE : V-Z cross section, Spis Castle

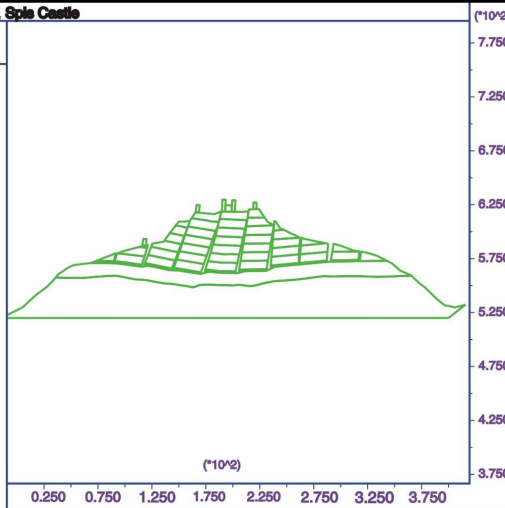
UDEC (Version 2.00)

LEGEND

2/24/2004 16:19
cycle 76000
time 4.136E+01 sec

block plot

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : V-Z cross section, Spis Castle

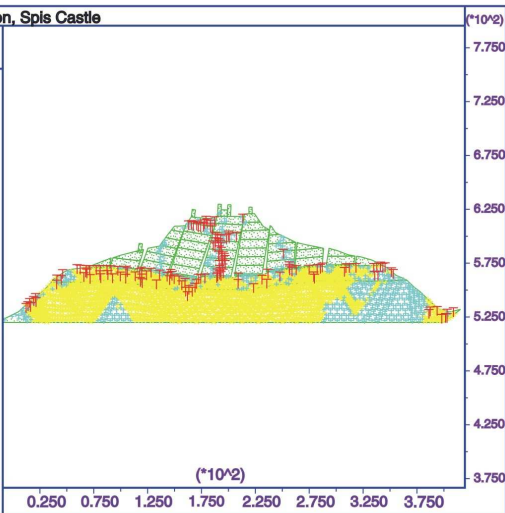
UDEC (Version 2.00)

LEGEND

2/24/2004 16:17
cycle 76000
time 4.136E+01 sec

block plot
 no. zones : total 3100
 elastic (.) 767
 at yield surface (*) 1512
 yielded in past (+) 675
 tensile failure (T) 146

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : V-Z cross section, Spis Castle

UDEC (Version 2.00)

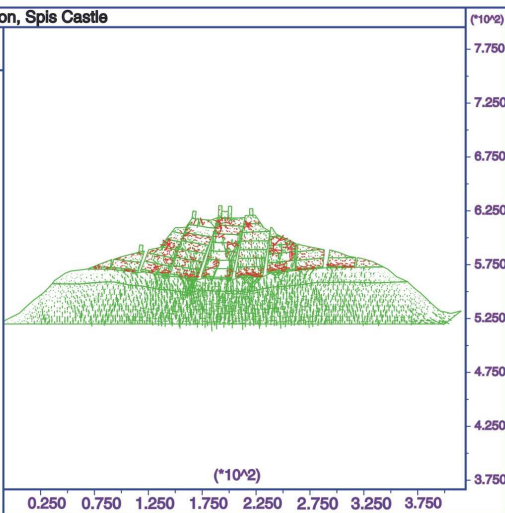
LEGEND

2/24/2004 16:41
cycle 76000
time 4.136E+01 sec

block plot
 principal stresses
 minimum = -5.789E+06
 maximum = 2.271E+06

0 2E 7

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : Cross section S-J, Spis castle

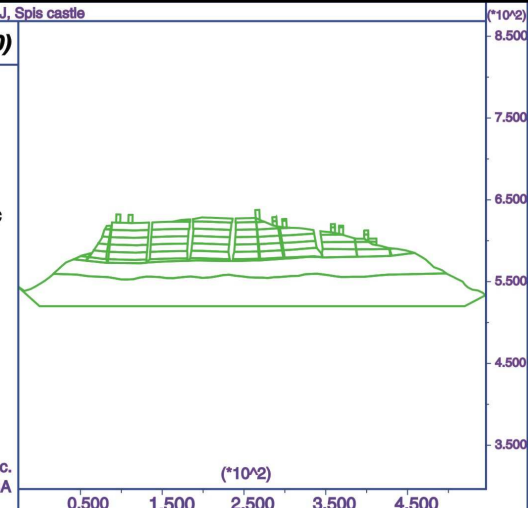
UDEC (Version 2.00)

LEGEND

2/26/2004 17:14
cycle 282000
time 1.855E+02 sec

block plot

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : Cross section S-J, Spis castle

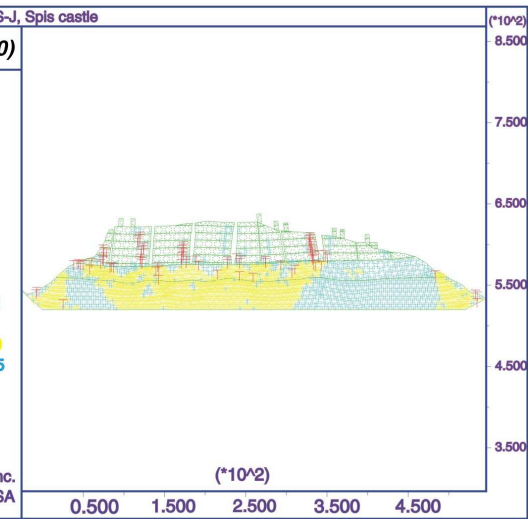
UDEC (Version 2.00)

LEGEND

2/26/2004 17:14
cycle 282000
time 1.855E+02 sec

block plot
 no. zones : total 3466
 elastic (.) 945
 at yield surface (*) 1160
 yielded in past (+) 1275
 tensile failure (T) 86

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : Cross section S-J, Spis castle

UDEC (Version 2.00)

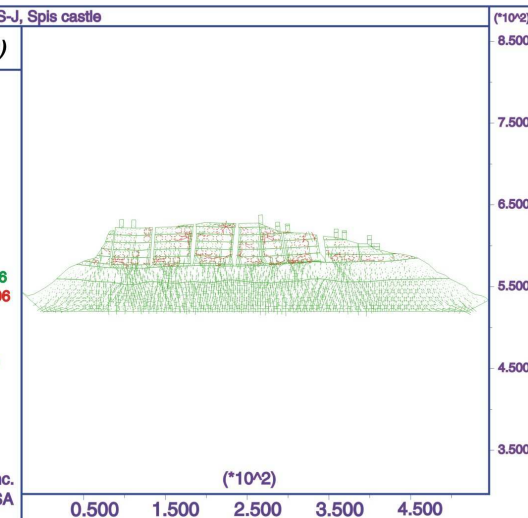
LEGEND

2/26/2004 17:14
cycle 282000
time 1.855E+02 sec

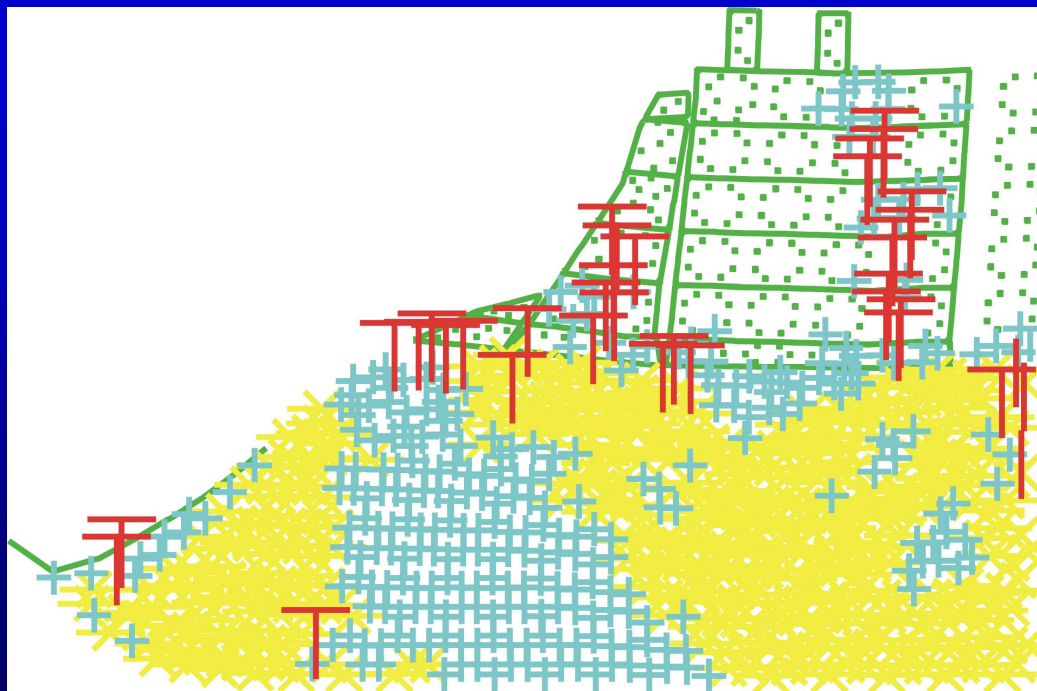
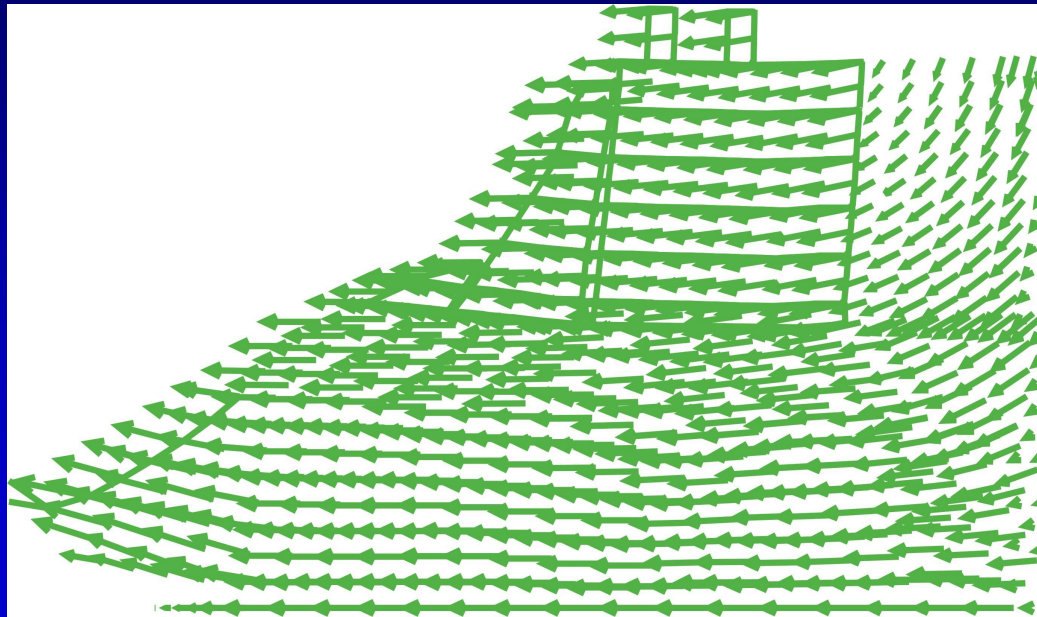
block plot
 principal stresses
 minimum = -8.584E+06
 maximum = 2.417E+06

0 5E 7

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



Skalná veža



(Bašková 2004)

aplikace GIS

(podle Klimeše 2003)

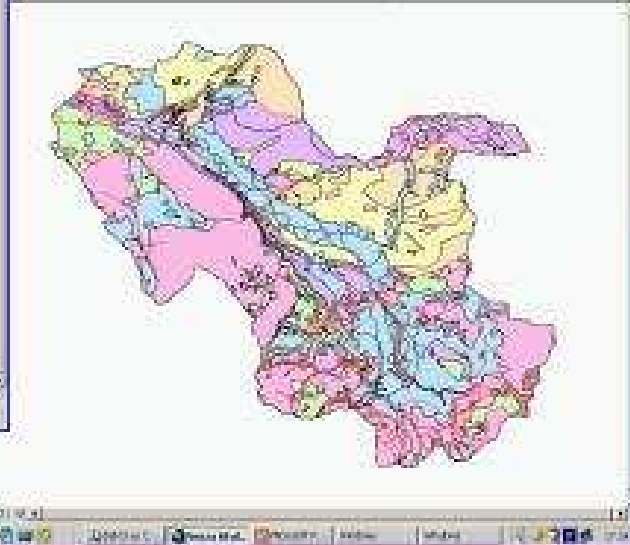
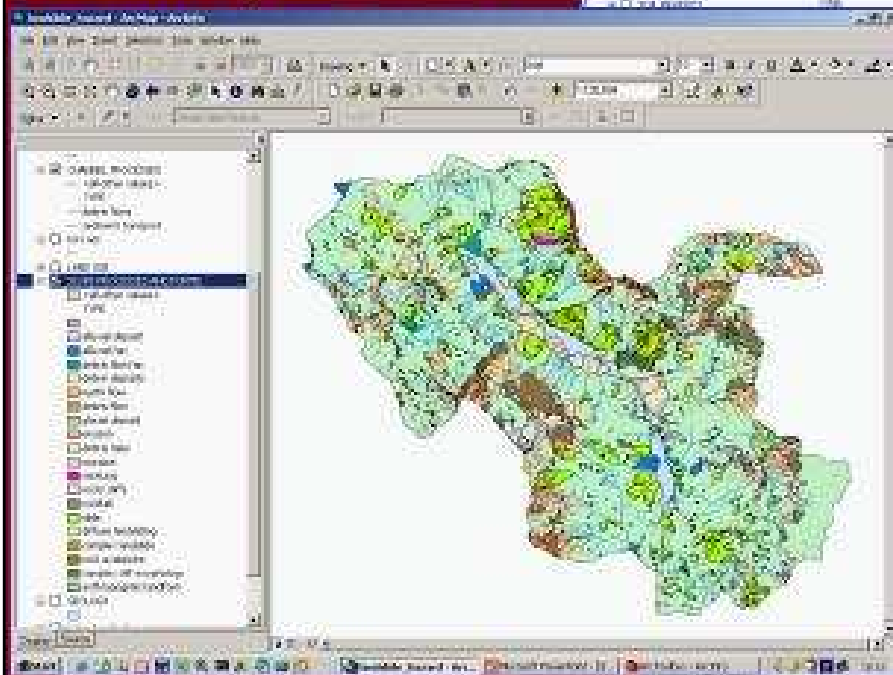
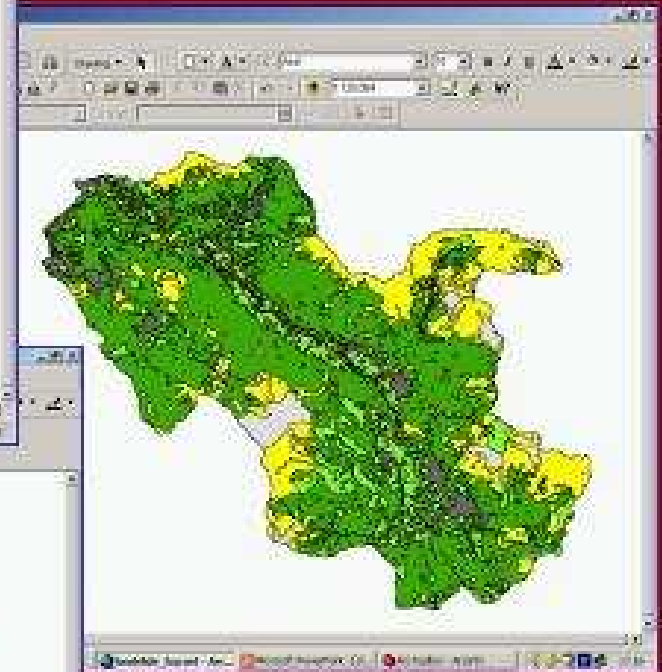
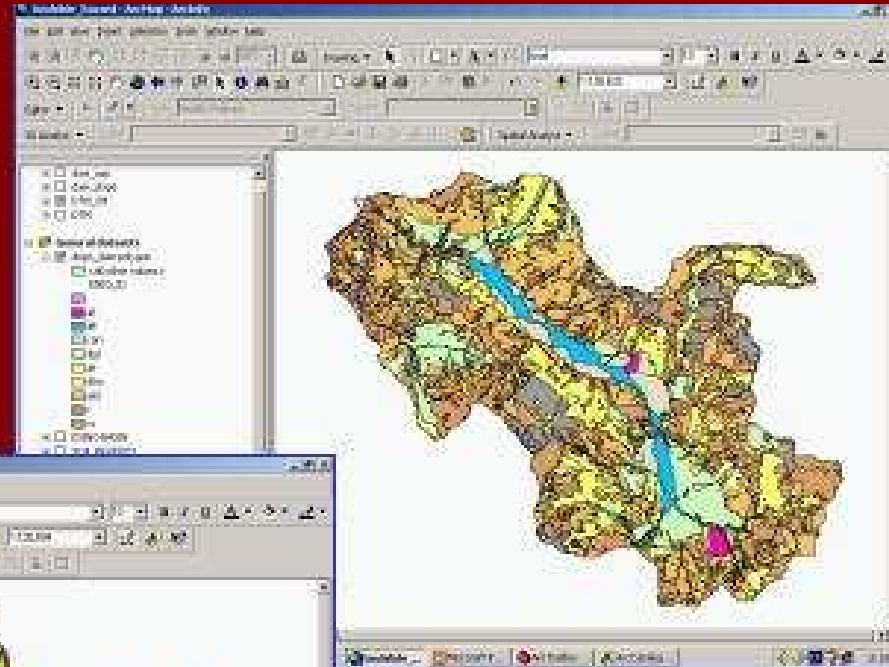
Teoretické metody	deterministické/ fyzikální metody		vychází ze znalosti fyzikálních a chemických pochodů vedoucích ke vzniku sesuvů - SINMAP, SHALSTAB, DELISA, SHETRAN
Empirické metody	"data-driven"/ statistické metody	dvourozměrné analýzy	hodnotí jednu závisle (výskyt sesuvů) a jednu nezávisle proměnnou (faktor prostředí – např. sklon svahu) na základě hustoty výskytu sesuvů v jednotlivých třídách faktorů prostředí
		vícerozměrné analýzy	hodnotí jednu závisle proměnnou (výskyt sesuvů) na základě souboru známých faktorů prostředí (nezávisle proměnné) - diskriminační analýza, logistická regrese
	"knowledge-driven"/ heuristické metody	přímé	mapa náchylnosti je odvozena přímo z geomorfologické m. a inventarizační mapy sesuvů na základě expertní znalosti pracovníka
		nepřímé	odvozena z kombinace několika typů map, které jsou seřazeny a klasifikovány na základě expertní znalosti pracovníka

Vstupní data

kvartérní geologická mapa

inventarizační
mapa
sesuvů

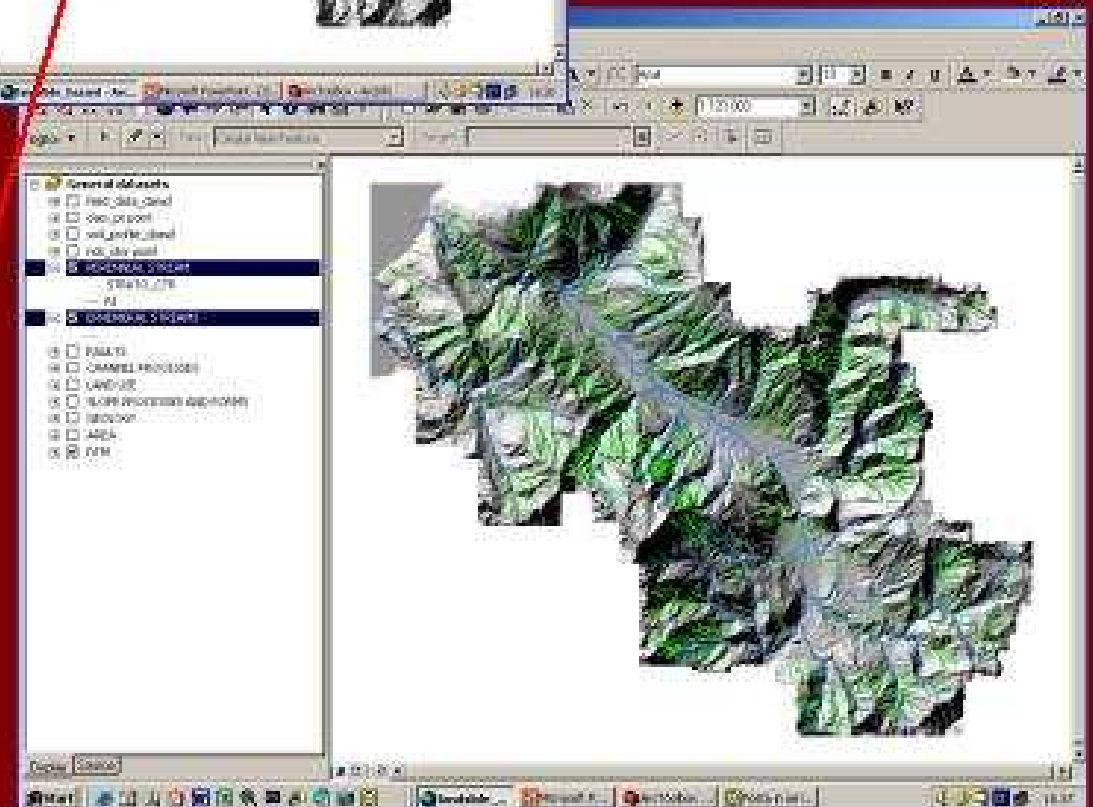
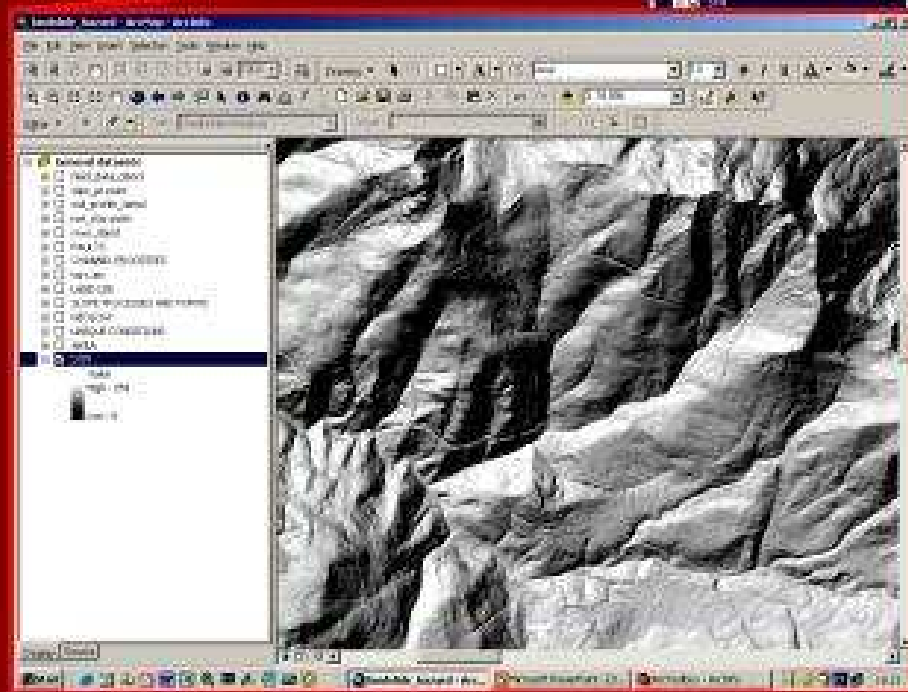
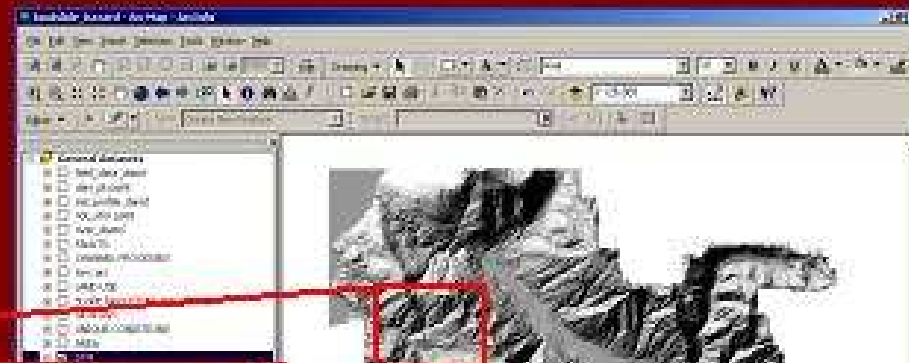
landuse



odrytá
geologická mapa

Vstupní data

digitální model
terénu



říční síť

Model náchylnosti území k sesouvání – „Informační metoda“ podle Yin a Yan, 1988

1. Podíl jednotlivých tříd faktorů na vzniku sesuvů ve studované oblasti – tzv. váhy faktorů, vypočítaný

$$W_i = \log \frac{dens_i}{dens_{tot}} = \log \frac{L_i / A_i}{L_{tot} / A_{tot}}$$

$$V = (100 * PS) / \max PS$$

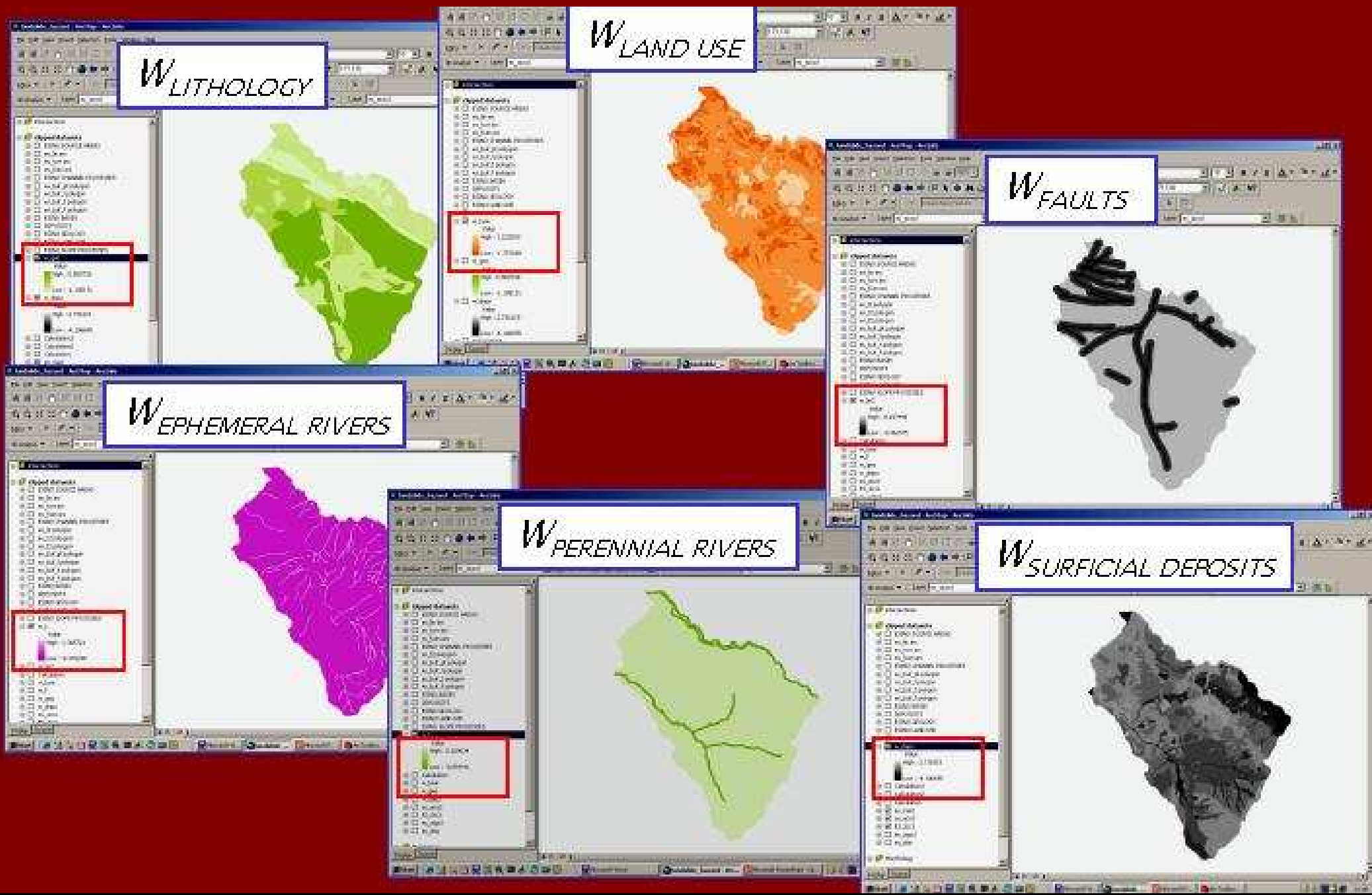
na základě hustoty výskytu sesuvů v jednotlivých třídách faktorů prostředí

2. Náchylnost území k sesouvání vypočítaná na základě N tříd různých faktorů

$$S_{uz} = \sum_{i=1}^N W_i$$

$$R = K_{geol} * W_1 + K_{sklonl} * W_1 + K_N * W_i$$

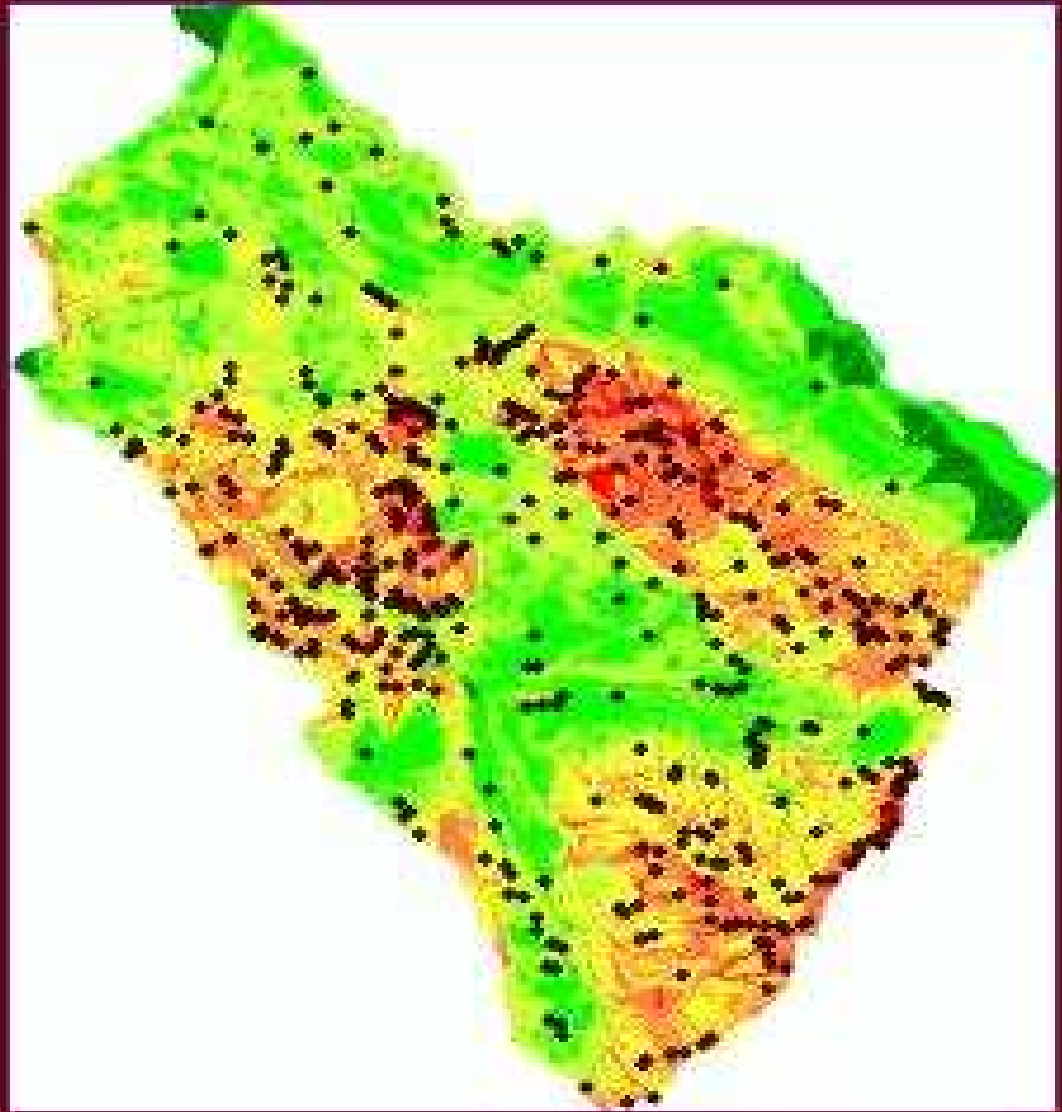
Váhy faktorů w – krok 1.



Náchylnost území k sesouvání – krok 2.

Úspěch modelu lze hodnotit na základě jednoduché úvahy:

Při **stejném podílu** správně klasifikovaných sesuvů je lepší model s **menším podílem nestabilních ploch** na celkové rozloze studovaného území



- GIS modely jsou **velmi vhodné** pro rajonizaci území podle náchylnosti ke vzniku sesuvů na úrovni katastrů větších obcí, bývalých okresů a krajů.
- Využití těchto modelů může vést k lepší a **efektivnější ochraně** majetku státu i soukromých osob před přírodními riziky.
- Výsledky GIS aplikací je **vždy nutné pečlivě hodnotit** z hlediska jejich přesnosti, vypovídací schopnosti a spolehlivosti ⇒ **nejistoty dat a modelu se nesmí zamlčovat, ale kvantifikovat!!!**