

## 9.2 Laboratorní zkoušky

Archivní laboratorní práce se v převážné míře soustředily na stanovení vrcholové pevnosti na neporušených vzorcích zeminy, která není relevantní pro posouzení stability studovaného sesuvu. Proto byly v rámci tohoto posudku provedeny další laboratorní zkoušky na materiálu smykové zóny odebraného z vrtů provedených v tělese sesuvu v rámci v současné době probíhajícího doplňujícího inženýrskogeologického průzkumu. Na odebraných vzorcích se provedly v laboratoři mechaniky zemin Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy zkoušky pevnosti v kritickém a reziduálním stavu. Celkové počty provedených zkoušek a shrnutí výsledků poskytuje tabulka 9.2. V následujícím textu jsou pak prezentovány detaily jednotlivých zkoušek.

Laboratorní zkoušky byly provedeny na zvětralém slínovci a tufu z třech vrtů HVP-P220 A, HV-P 212 a IG 208. Souřadnice vrtů jsou následující:

HV-P220 A: x=-9986728,2 y=-764055,2  
HV-P 212: x=-986563,3 y=-764141,9  
IG 208: x=-986482,2 y=-764233,0

Slínovec je klasifikován jako jíl s vysokou plasticitou (F8 CH) a tuf je klasifikován jako hlína s extrémně vysokou plasticitou (F7 ME). Jejich křivky zrnitosti jsou na obrázku 9.1 (Plšková, 2016).

Inženýrskogeologický popis zemin převzatý z dokumentace vrtného jádra je následující (Plšková, 2016):

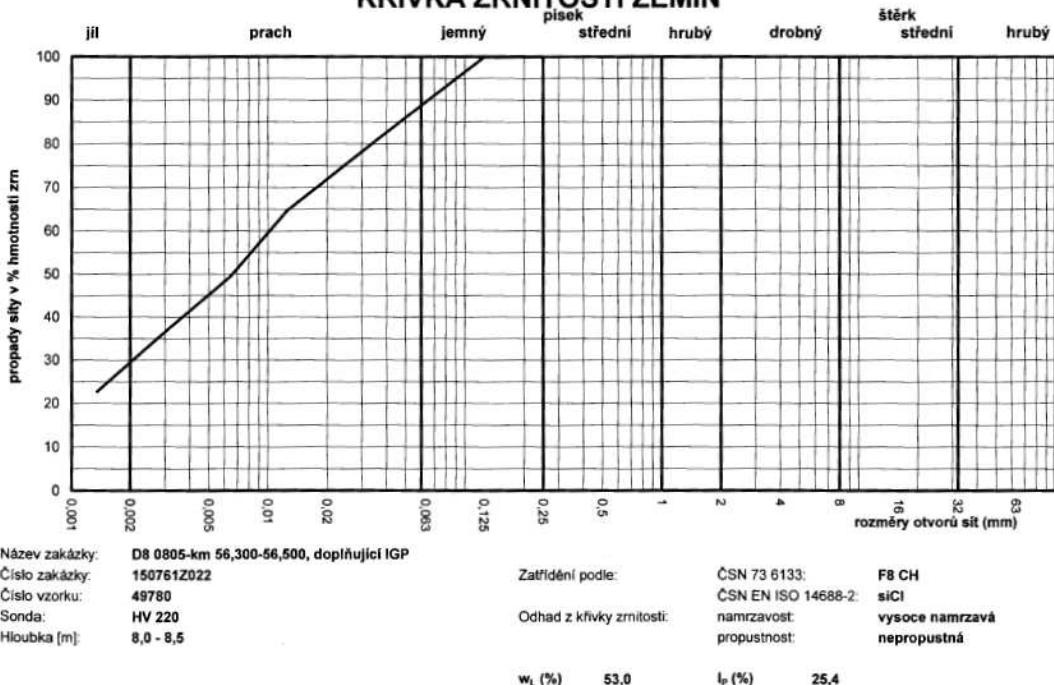
IG 208 6,5m - tuf okrový, šedě a rezavě skvrnitý, s drobnými zbytky bombiček a lapisů, jádro kompaktní, tvrdé, suché, smyková zóna v 6,3 m, vulkanogenní komplex, terciér

HV-P212 2,3 m - slínovec olivově šedý, zvětralý až rozložený R6, smyková zóna v 2 m, křída – březenské souvrství

HV-P220A 8,3 m - slínovec šedomodrý, rozvrtaný na vrtnou drť, úlomky do 5 – 10 cm, pevné R6,(R5). Smyková zóna v 7,8 m, křída – březenské souvrství

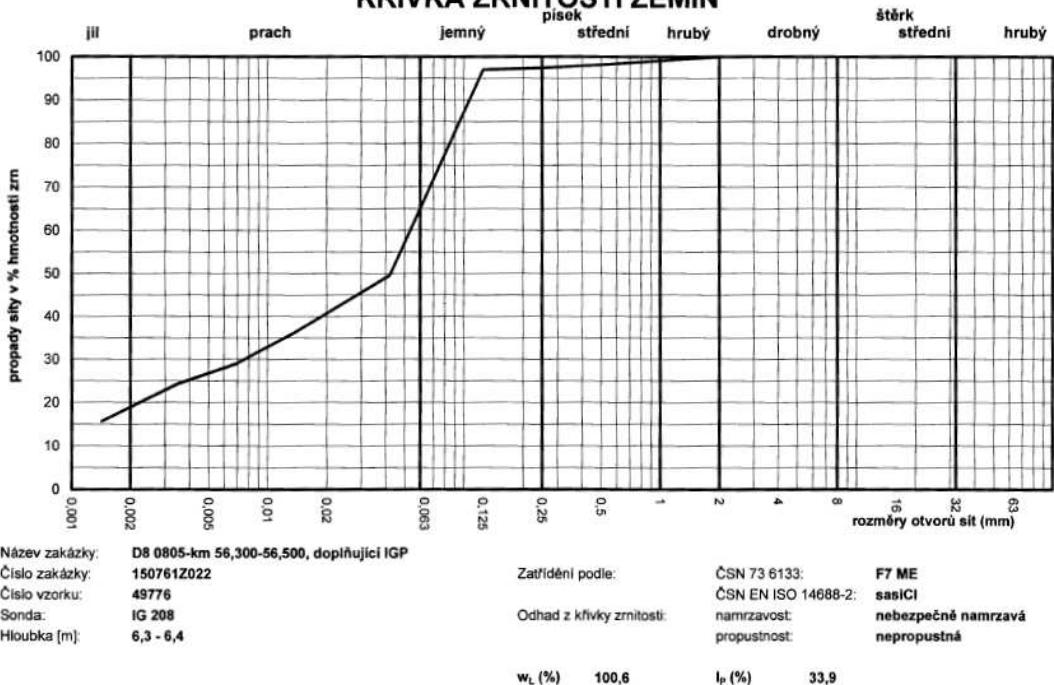
ARCADIS CZ a.s., Laboratoř geomechaniky a terénní měření

### KŘIVKA ZRΝITOSTI ZEMIN



ARCADIS CZ a.s., Laboratoř geomechaniky a terénní měření

### KŘIVKA ZRΝITOSTI ZEMIN



Obrázek 9.1: Křivky zrnitosti zemin smykové zóny, na nichž byly měřeny smykové pevnosti v kritickém a reziduálním stavu (převzato z Plškové, 2016).

*Tabulka 9.2: Souhrn provedených laboratorních zkoušek*

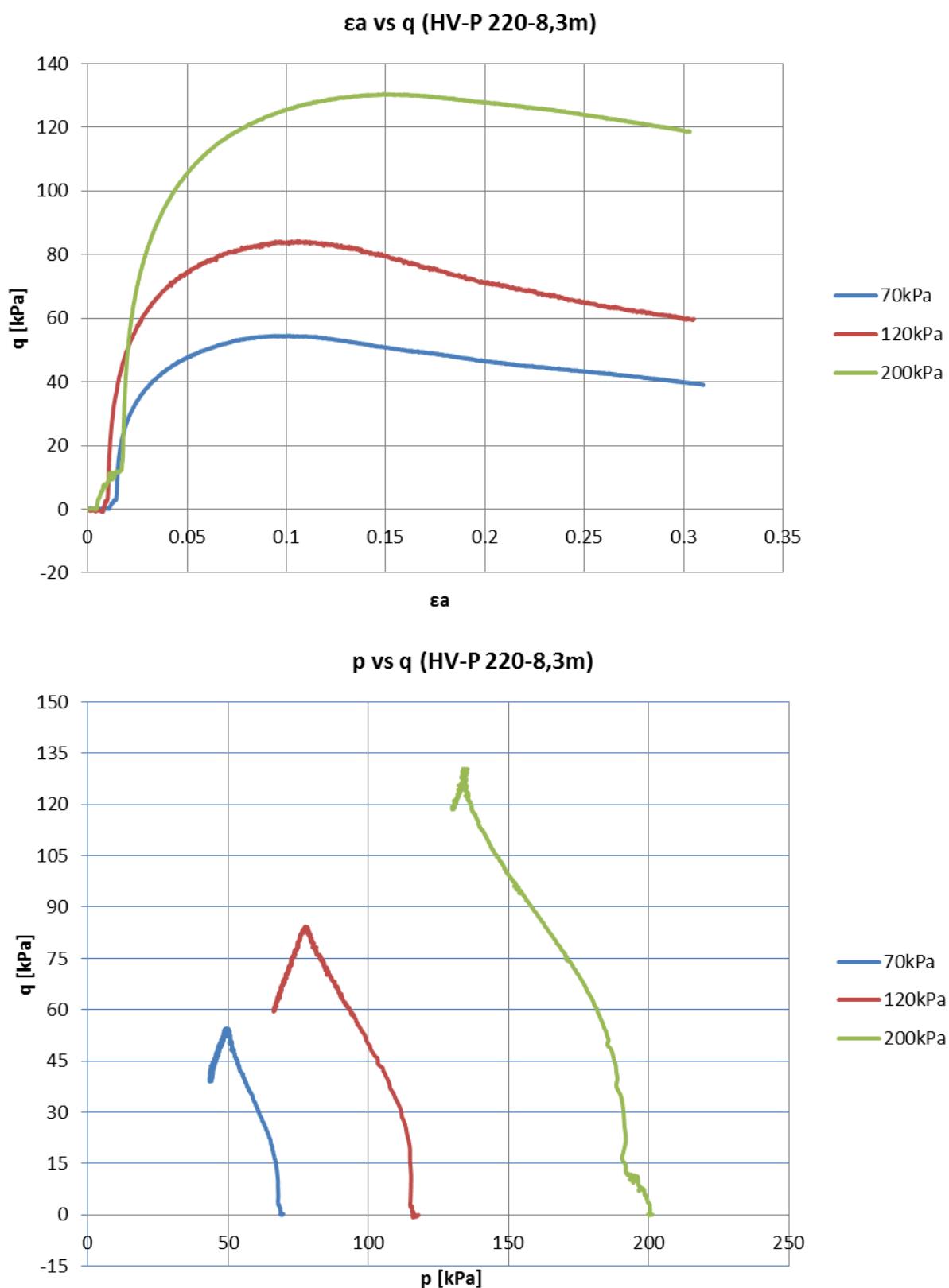
Sonda	Hloubka	Popis zeminy	Popis zkoušky	Smyková pevnost
HV-P 220A	8,3 m	F8 CH slínovec zvětralý	Nedrénovaná triaxiální zkouška CIUP na rekonstituovaném materiálu, komorová napětí 70 kPa, 120 kPa a 200 kPa	$\varphi_{cr}=25,7^\circ$
HV-P 212	2,3 m	F8 CH slínovec zvětralý	Nedrénovaná triaxiální zkouška CIUP na rekonstituovaném materiálu, komorová napětí 70 kPa, 120 kPa a 200 kPa	$\varphi_{cr}=25,1^\circ$
IG 208	6,5 m	F7 ME tuf zvětralý	Nedrénovaná triaxiální zkouška CIUP na rekonstituovaném materiálu, komorová napětí 60 kPa a 120 kPa	$\varphi_{cr}=28,1^\circ$
IG 208	6,5 m	F7 ME tuf zvětralý	Krabicová smyková zkouška, normálová napětí 60 kPa, 100 kPa a 150 kPa	$\varphi_{cr}=31,2^\circ$
HV-P 212	2,3 m	F8 CH slínovec zvětralý	Rotační smyková zkouška na rekonstituovaném vzorku, vertikální napětí 50 kPa	$\varphi_{res}=14,2^\circ$
IG 208	6,5 m	F7 ME tuf zvětralý	Rotační smyková zkouška na rekonstituovaném vzorku, vertikální napětí 50 kPa	$\varphi_{res}=16,4^\circ$

### 9.2.1 Triaxiální zkoušky na rekonstituovaných vzorcích

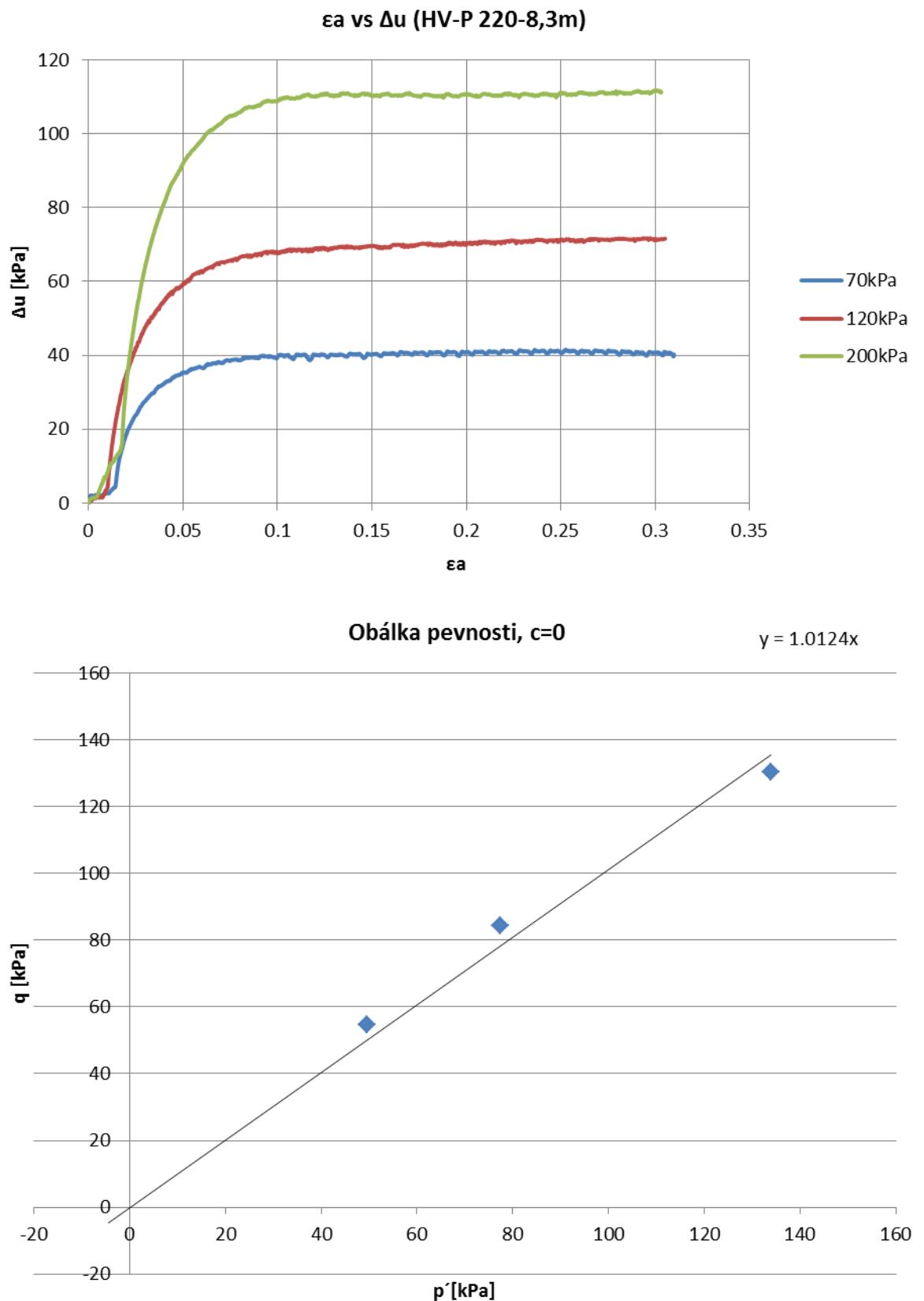
Triaxiální zkoušky byly prováděny specificky za účelem zjištění smykové pevnosti v kritickém stavu. Provedly se proto na rekonstituovaných vzorcích. Vzorky byly prohněteny za vlhkosti odpovídající přibližně 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti v hnětači a následně byly zbaveny zrn větších než 1 mm pomocí síta. Vzniklá homogenní pasta byla nalita do válců o průměru 38 mm opatřených písty a spodní a horní drenáží. Vzorky posléze konsolidovaly při vertikálním napětí 100 kPa. Vertikální deformace spojená s konsolidací byla zaznamenávána a vzorky byly považovány za zkonsolidované poté, co deformace pístu ustaly.

V následujícím kroku byly vzorky přeneseny do triaxiální komory, byly opatřeny membránou a radiální drenáží z filtračního papíru a zatěžovací destičkou. Vzorky byly odvodňovány dolní drenáží. Vzorky byly následně syceny syticím tlakem 300 kPa, a to postupným zvyšováním komorového a syticího tlaku rychlostí 1 kPa/min. Kontrola sycení byla provedena pomocí součinitele pórového tlaku  $B\text{-check} > 0,93$ . Vzorky byly následně izotropně konsolidovány na předem zvolené izotropní napětí a v normálně konsolidovaném stavu smykány v nedréovaných podmínkách za současného měření pórového tlaku (CIUP zkouška). Rychlosť smyku byla stanovena podle ČSN CEN ISO/TS 17892-9 od 0,00094 do 0,038 mm/hod.

Výsledky triaxiálních zkoušek a fotodokumentace vzorků (chybí fotodokumentace vzorku HV-P 220, hloubka 8,3 m, 120 kPa) na třech testovaných vzorcích zemin jsou shrnutý v obrázcích 9.2 až 9.11.



Obrázek 9.2: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 220, hloubka 8,3 m.

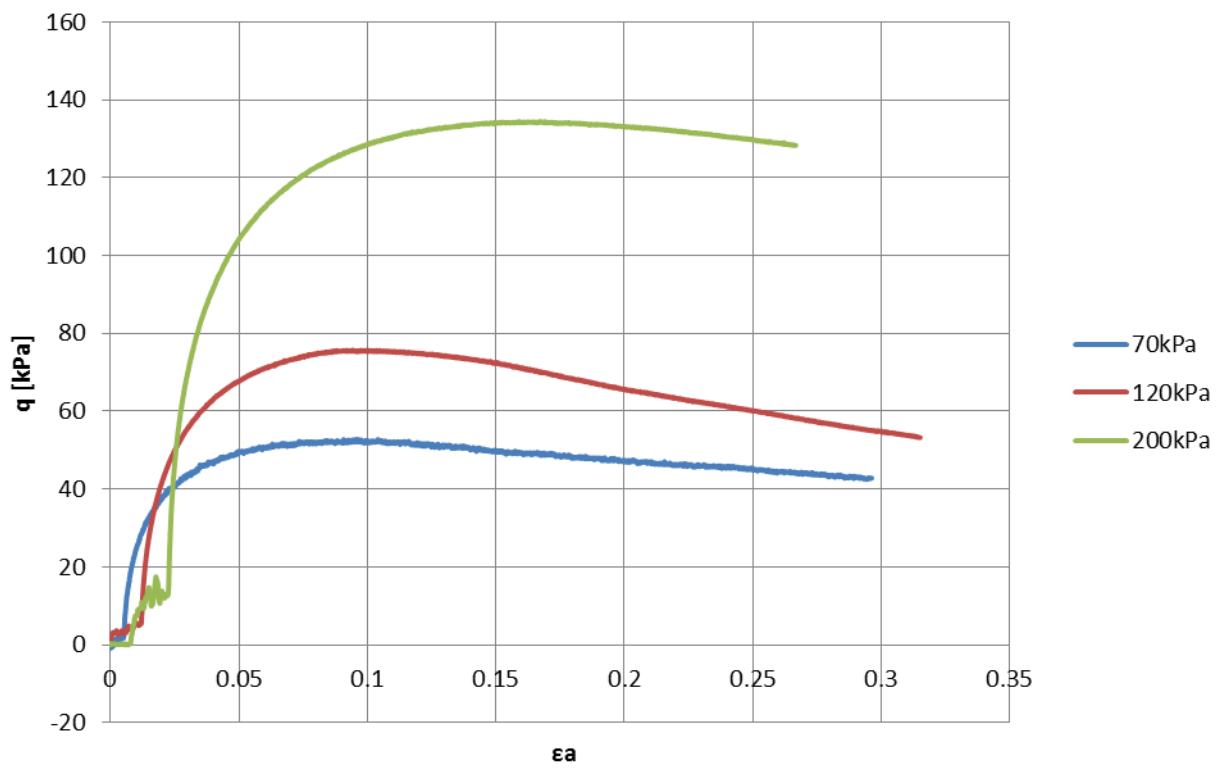


Obrázek 9.3: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 220, hloubka 8,3 m.

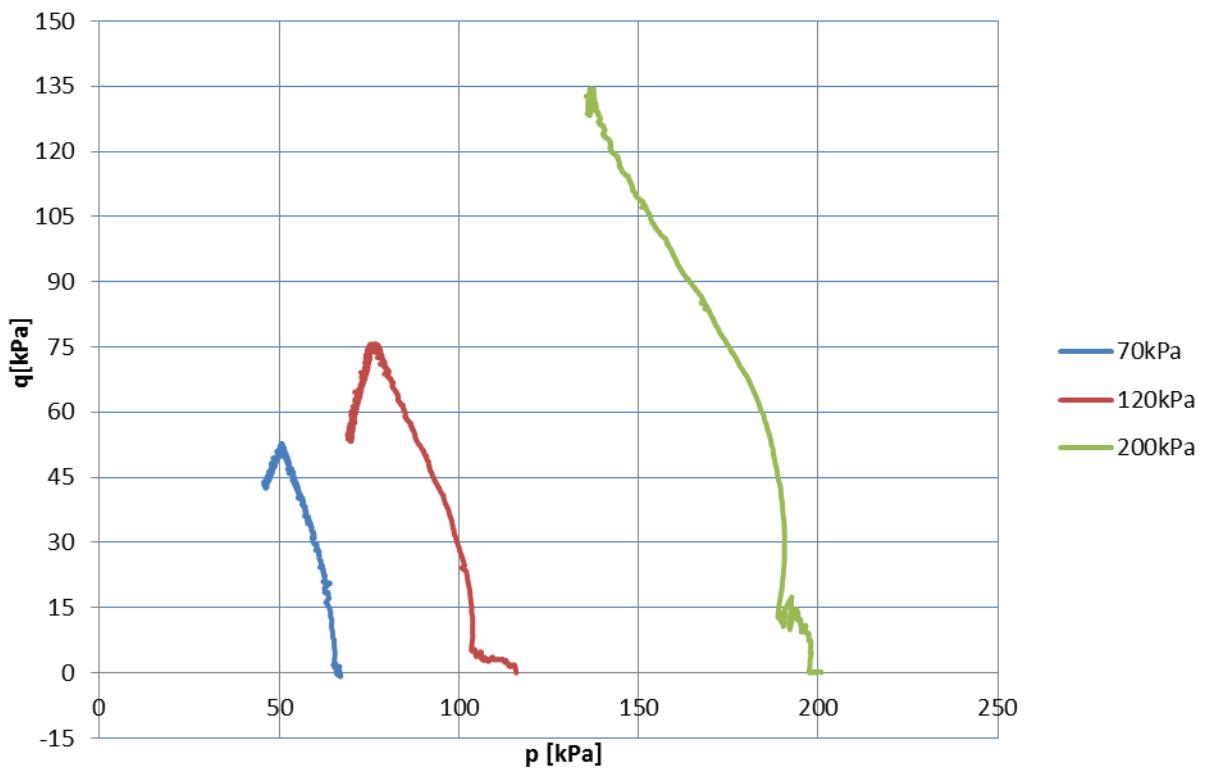


Obrázek 9.4: Fotodokumentace vzorků z triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 220, hloubka 8,3 m.

$\epsilon_a$  vs  $q$  (HV-P 212-2,3m)

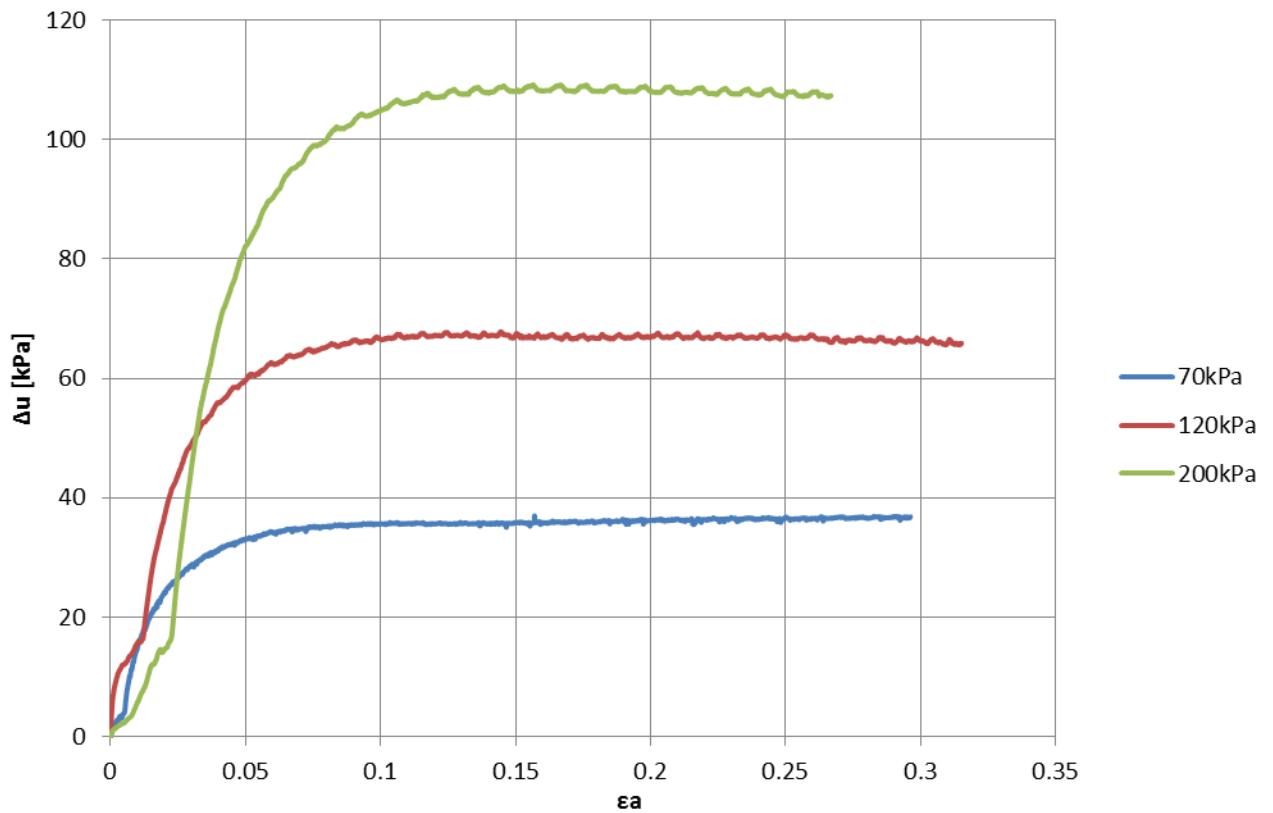


$p$  vs  $q$  (HV-P 212-2,3m)

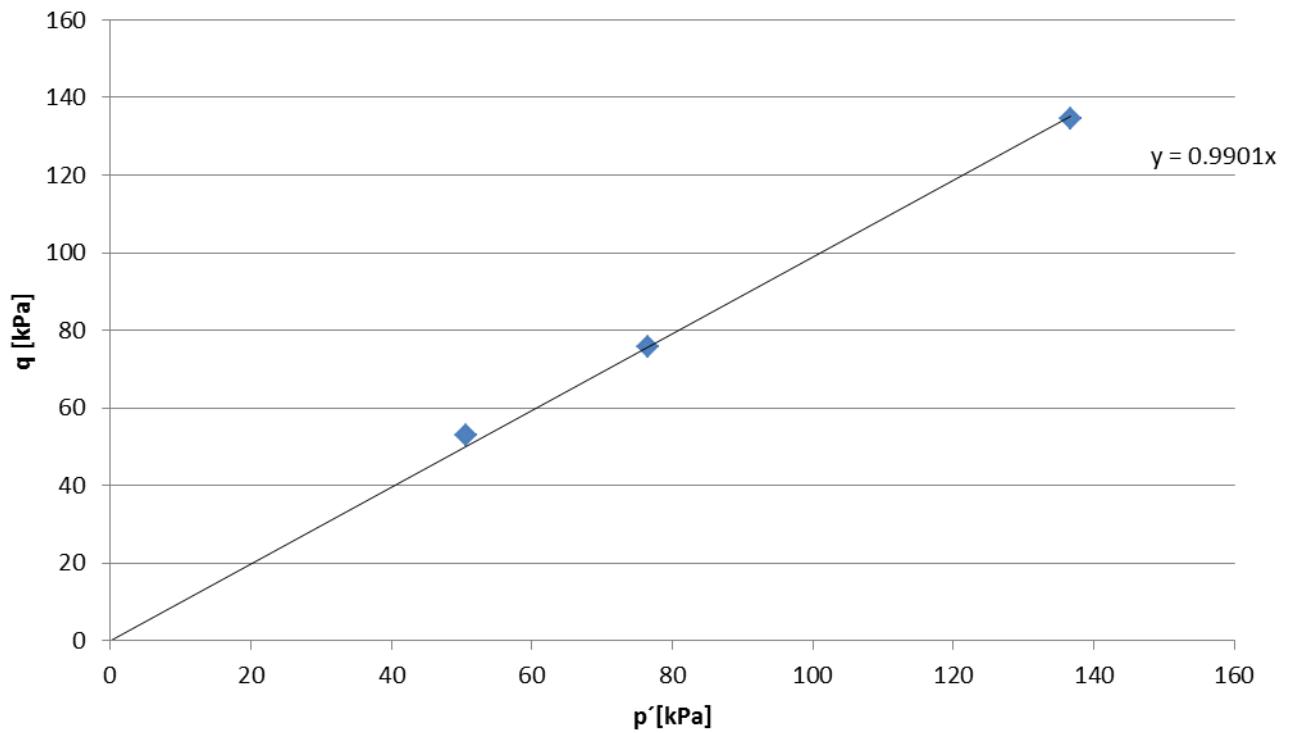


Obrázek 9.5: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 212, hloubka 2,3 m.

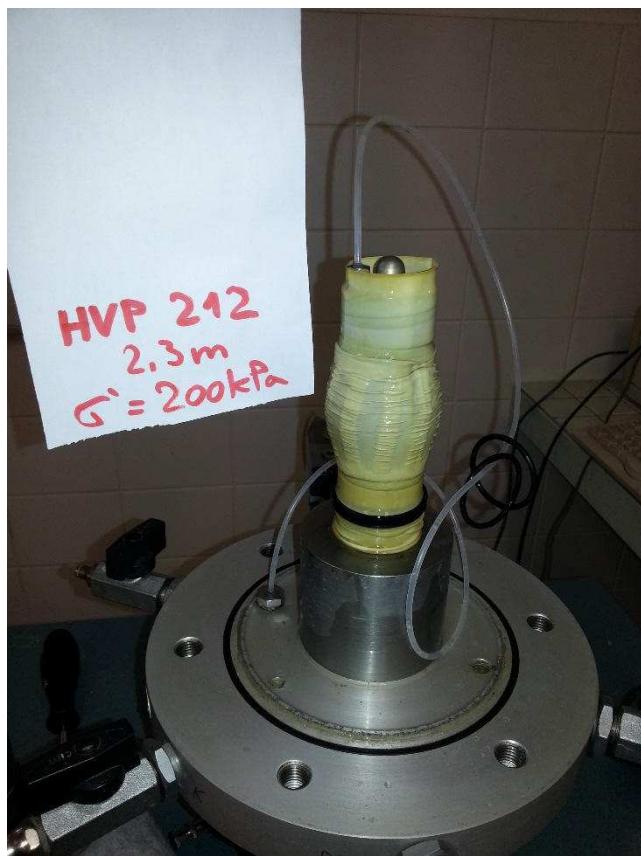
**$\epsilon_a$  vs  $\Delta u$  (HV-P 212-2,3m)**



**Obálka pevnosti  $c=0$  (HV-P 212-2,3m)**



Obrázek 9.6: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 212, hloubka 2,3 m.



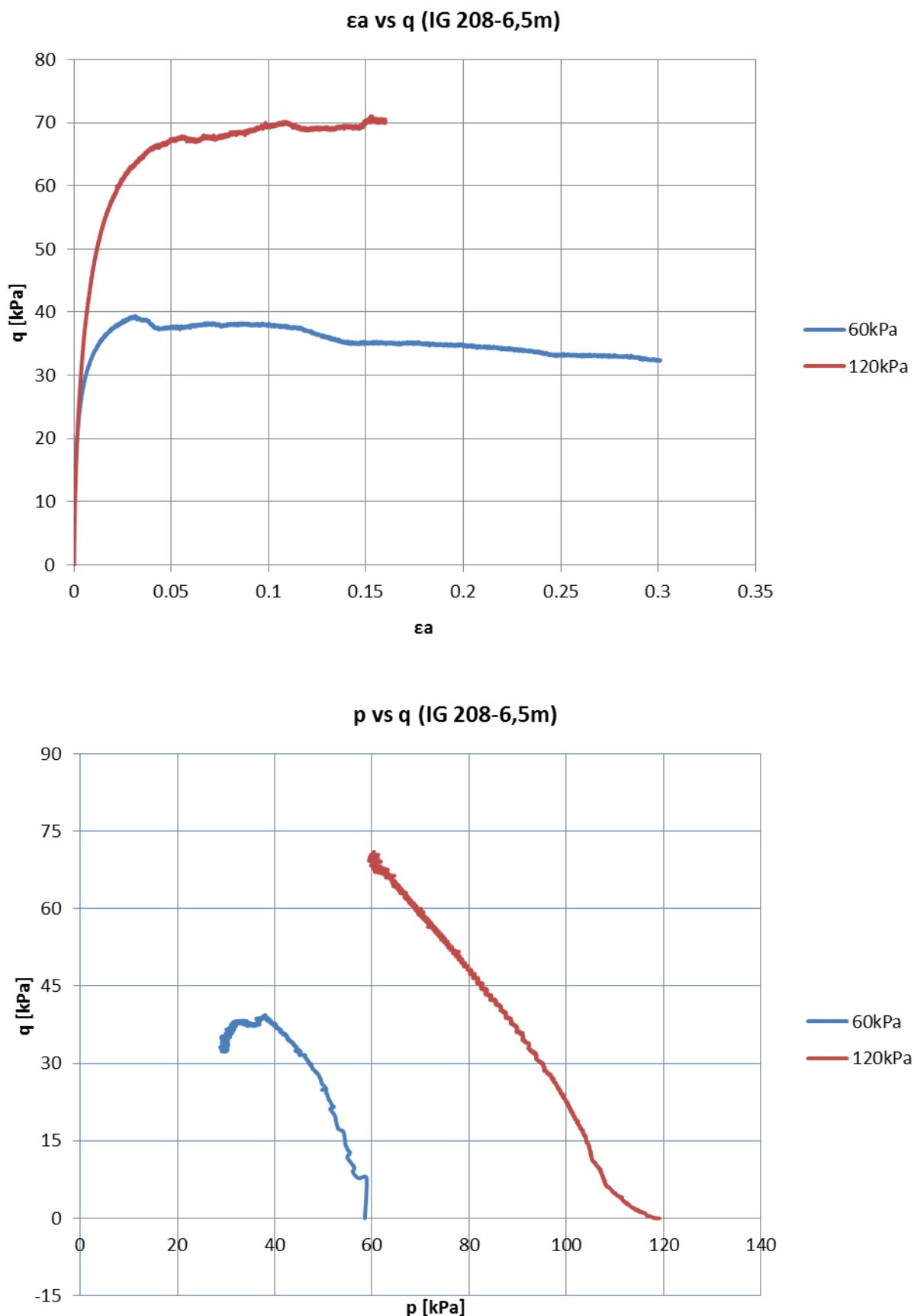
Obrázek 9.7: Fotodokumentace vzorků z triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 212, hloubka 2,3 m.



Obrázek 9.8: Fotodokumentace vzorků z triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 212, hloubka 2,3 m.

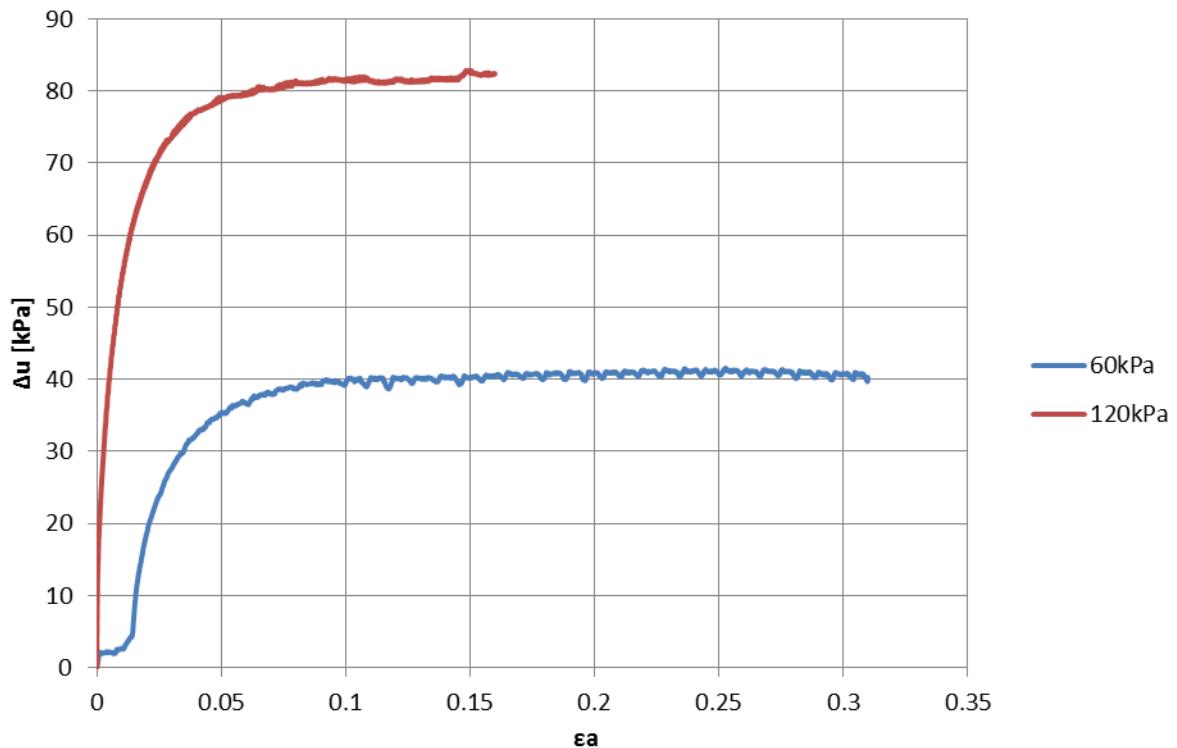


Obrázek 9.9: Fotodokumentace vzorků z triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek IG 208, hloubka 6,5 m.

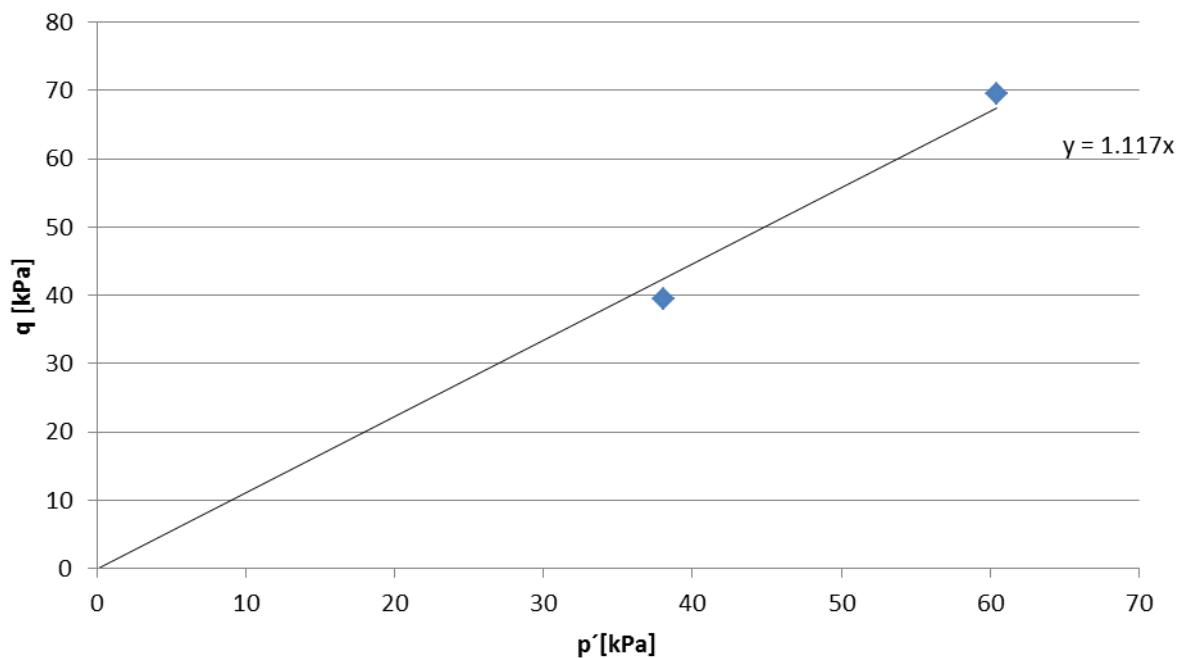


Obrázek 9.10: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek IG 208, hloubka 2,3 m.

$\varepsilon_a$  vs  $\Delta u$  (IG 208-6,5m)



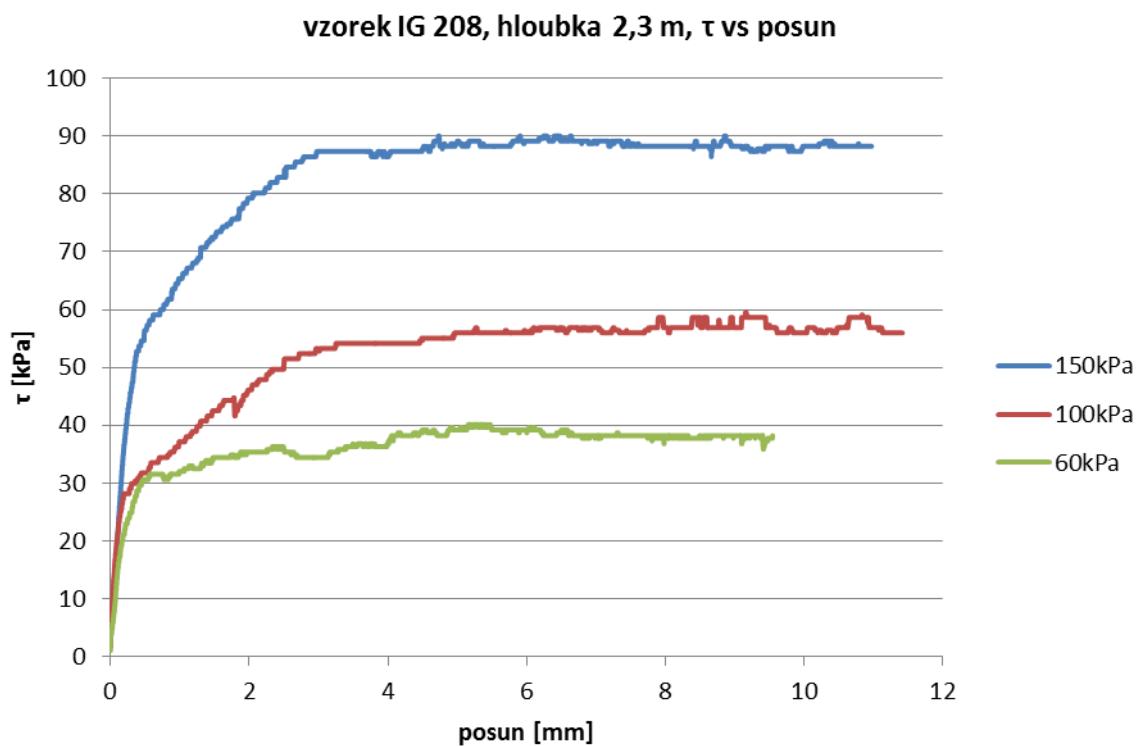
Obálka pevnosti  $c=0$  (IG 208-6,5m)



Obrázek 9.11: Výsledky triaxiálních zkoušek na slínovci ze smykové zóny, vzorek IG 208, hloubka 2,3 m.

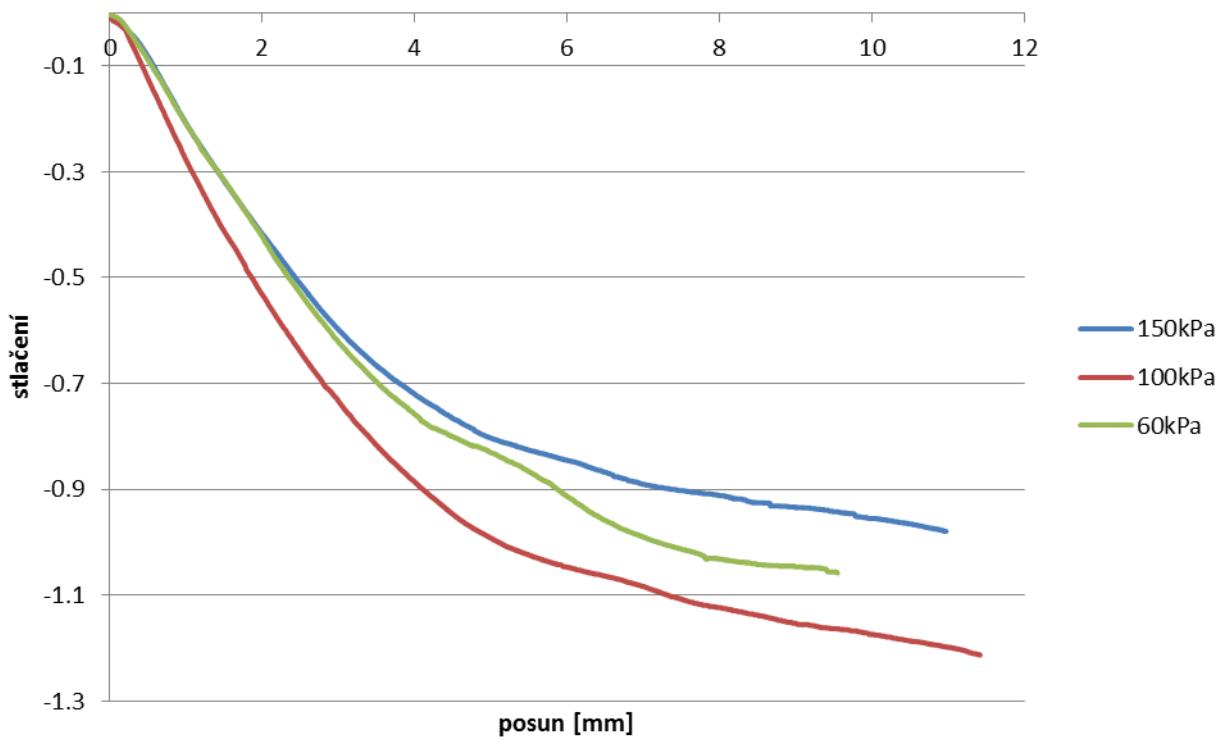
### 9.2.2 Krabicové smykové zkoušky na rekonstituovaných vzorcích

Krabicové smykové zkoušky byly provedeny podle ČSN CEN ISO/TS 17892-10 na vzorku zvětralého tufu ze sondy IG 208, hloubka 2,3 m. Zkoušky byly provedeny při normálových napětích 60, 100 a 150 kPa. Vzorky byly prohněteny za vlhkosti odpovídající přibližně 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti v hnětači a za pomoci síta zbaveny zrn větších než 1 mm. Vzorek testovaný při normálovém napětí 100 kPa byl konsolidován přímo v krabicovém přístroji pro zjištění rychlosti konsolidace nutné pro stanovení rychlosti smykové zkoušky. Ostatní vzorky byly konsolidovány ve válci vertikálními napětími 50 a 100 kPa (pro vzorky, které byly smykány při normálových napětích 60 kPa a 150 kPa). Vzorky byly poté vyříznuty, instalovány v krabicovém smykovém přístroji a konsolidovány na vertikální napětí 60 a 150 kPa. Poté byly provedeny krabicové smykové zkoušky rychlostí 0,001 mm/hod. Výsledky krabicových smykových zkoušek jsou shrnutý v obrázcích 9.12 a 9.13.

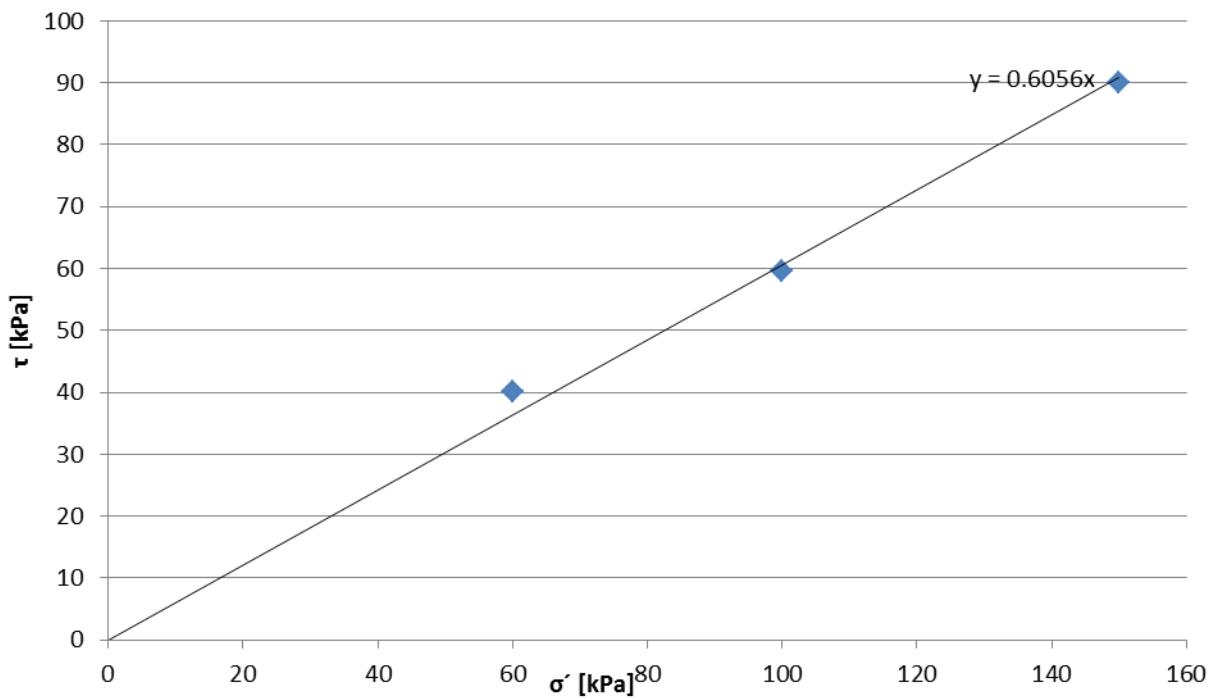


Obrázek 9.12: Výsledky krabicových zkoušek na zvětralém tufu ze smykové zóny, vzorek IG 208, hloubka 2,3 m.

vzorek IG 208, hloubka 2,3 m, stlačení vs. posun



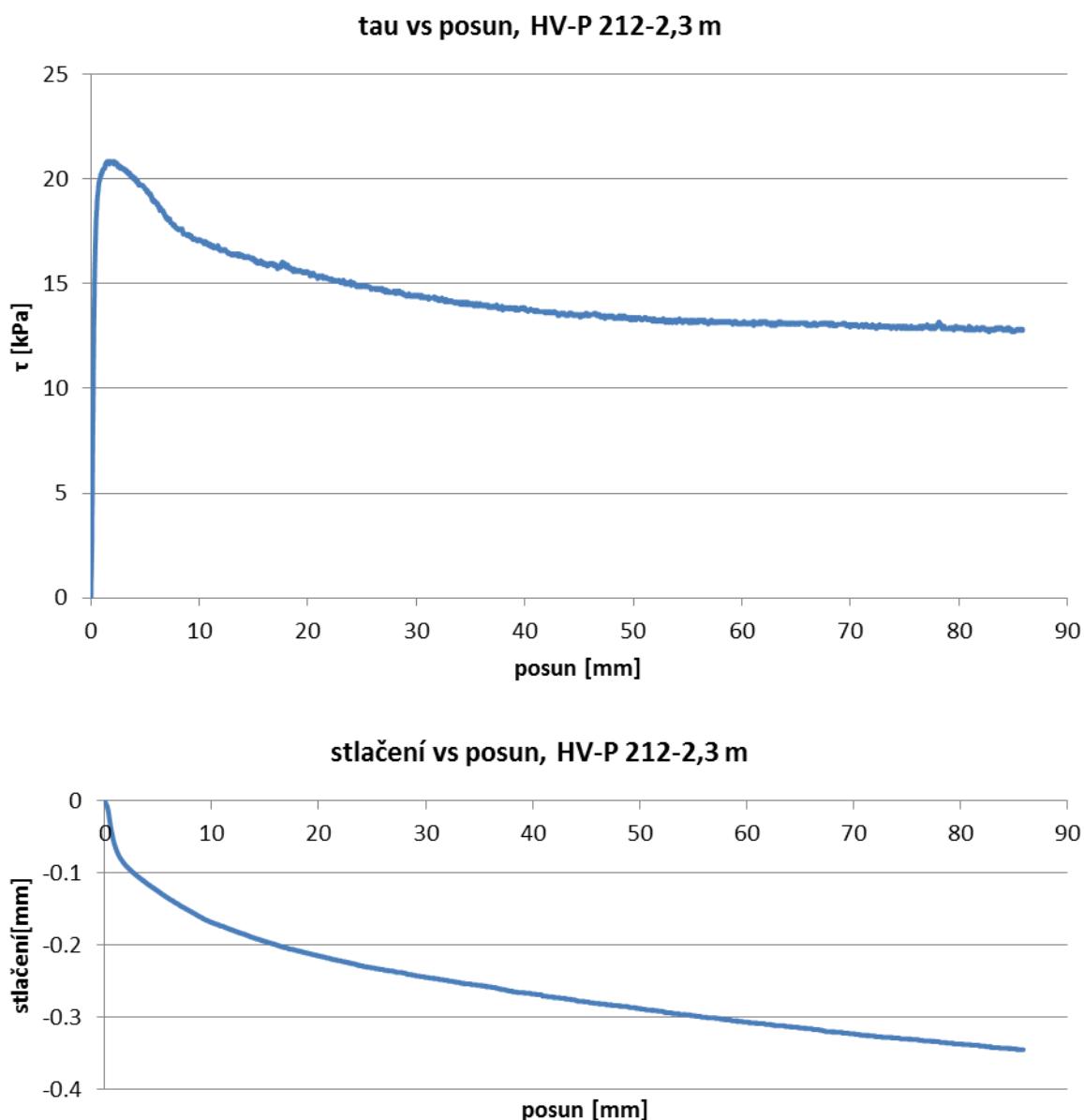
vzorek IG 208, hloubka 2,3 m, obálka pevnosti, c=0



Obrázek 9.13: Výsledky krabicových zkoušek na zvětralém tufu ze smykové zóny, vzorek IG 208, hloubka 2,3 m.

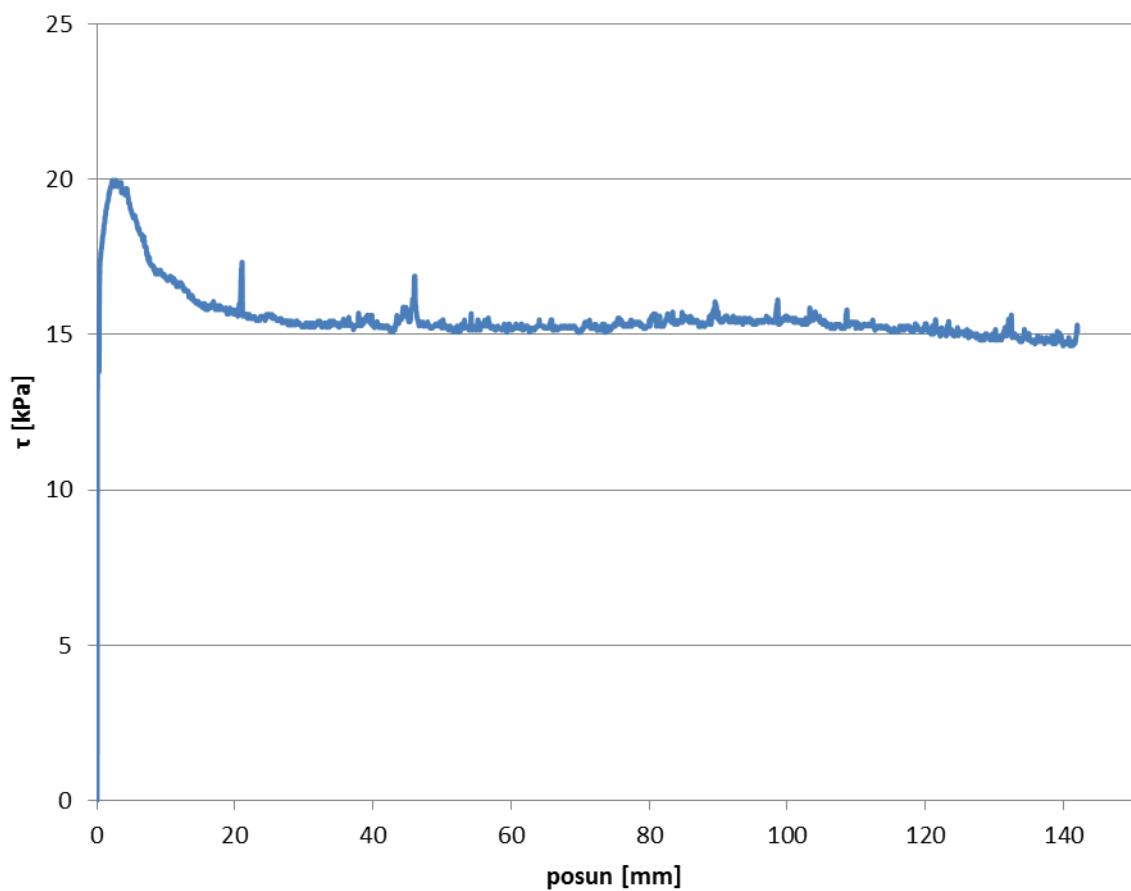
### 9.2.3 Rotační smykové zkoušky na rekonstituovaných vzorcích

Pro zjištění reziduální smykové pevnosti byly v laboratoři mechaniky zemin Přírodovědecké fakulty UK provedeny rotační smykové zkoušky v rotačním smykovém přístroji typu Bromhead. Rotační smykové zkoušky byly provedeny na vzorku zvětralého tufu ze sondy IG 208, hloubka 2,3 m a na vzorku slínovce smykové plochy ze sondy HV-P 212, hloubka 2,3 m. Vzorky byly rekonstituovány v hnětači při vlhkosti přibližně odpovídající 1,5 násobku vlhkosti na mezi tekutosti. Pasta byla poté přenesena do rotačního smykového přístroje, konsolidována při normálovém napětí 51,7 kPa a poté byla provedena rotační smyková zkouška rychlostí 0,018 mm/hodinu (slínovec) a 0,036 mm/hodinu (tuf). Zkouška byla ukončena po dosažení reziduální smykové pevnosti identifikované ustálením napěťo-deformačního diagramu. Výsledky zkoušek jsou na obrázcích 9.14 a 9.15, vypočtená hodnota úhlu vnitřního tření (uvažovala se obálka pevnosti procházející počátkem) je v tabulce 9.2.

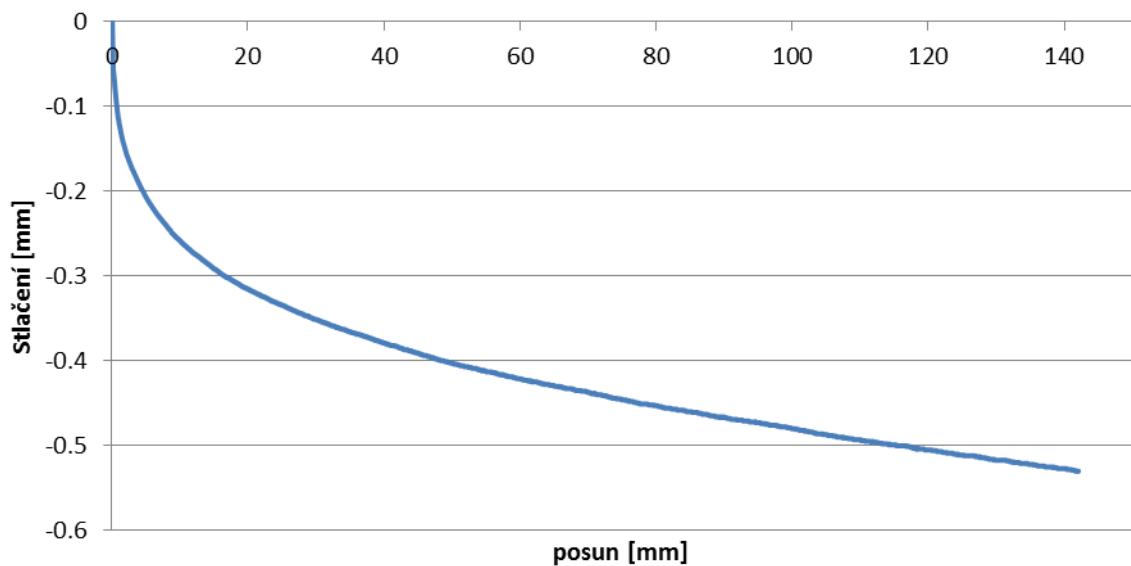


Obrázek 9.14: Výsledky rotační smykové zkoušky na slínovci ze smykové zóny, vzorek HV-P 212, hloubka 2,3 m.

**tau vs posun (IG 208-6,5m)**



**stlačení vs posun (IG 208-6,5m)**



Obrázek 9.15: Výsledky rotační smykové zkoušky na zvětralém tufu, vzorek IG 208, hloubka 2,3 m.

### **9.3 Výpočtové parametry pro kvazihomogenní celky**

Výpočtové parametry pro jednotlivé kvazihomogenní celky byly vybrány na základě archivních laboratorních experimentů, nově provedených laboratorních experimentů a empirických korelací (pouze pro celky které nemají významný vliv na stabilitu). Výpočtové parametry byly dále upřesňovány s použitím metod zpětné analýzy a jejich vliv byl studován na základě parametrických studií (viz kapitola 9.9)

I přes velký rozsah geotechnického průzkumu provedeného v minulosti v sesuvné oblasti není množství laboratorních dat vhodných pro provedení kalibraci modelů do numerických analýz vysoké. Je to proto, že se laboratorní výzkum většinou soustředil na provádění zkoušek za účelem zjištění vrcholové pevnosti u neporušených vzorků. Vzhledem k existenci předchozího sesuvu v zájmové oblasti je ovšem chování na hlavní smykové ploše kontrolováno pevností reziduální, materiál sesuvu vzhledem k stupni prohnětení a existenci sekundárních smykových ploch by pak měl být modelován s využitím pevnosti v kritickém stavu.

Souhrn parametrů využitých v numerickém modelu včetně poznámek je v tabulkách 9.3 až 9.5, v následujícím textu je pak výběr parametrů zdůvodněn podrobněji.

Tabulka 9.3: Shrnutí parametrů kvazihomogenních celků, část 1

Kv. celek		použité ve výpočtech pozn.		Herle (2014), laboratoř Arcadis pozn.		PřFUK laboratoř pozn.		AZ Consult (2014), Podrobný GTP-IGP pozn.	
I deluviaální hlíny slínovec zvětralý mimo smyk. Plochu	$\phi$ [°]	25,4				25,4	Kritické hodnoty, průměr z 25,1° a 25,7°		
	c	0				0			
	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21						21	
	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21,5					21,5		
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,36	Z Jákyho rovnice						
II deluviaální sutě přirozené a těleso náspu tratě	$\phi$ [°]	28					28	Udávaný rozsah 24°-32°	
	c	0					0		
	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19					19		
	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20					20		
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,35	Z Jákyho rovnice						
III sutě lomové - kamenivo	$\phi$ [°]	34	Měřeno jako úhel přirozené sklonitosti pozemní fotogrammetrií						
	c	0							
	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19					19		
	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20					20		
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,31	Z Jákyho rovnice						

Tabulka 9.4: Shrnutí parametrů kvazihomogenních celků, část 2

Kv. celek		použité ve výpočtech pozn.		Herle (2014), laboratoř Arcadis pozn.		PřFUK laboratoř pozn.		AZ Consult (2014), Podrobný GTP-IGP pozn.	
IV, slínovec, rezid. param, smyková plocha	$\phi$ [°]	15	Výsledky z rotačního smykového přístroje, průměrné hodnoty s celkem V	12,1	Tři různé vzorky, $\varphi=8.5^\circ$ , $15^\circ$ , $12.8^\circ$	14,2	Reziduální pevnost měřená v rotačním přístroji		
	c	0		0					
	$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21						21	
	$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21,5						21,5	
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,36	Z Jákyho rovnice						
V, tuf, tufitický jílovec, jílovec, rezid param.,	$\phi$ [°]	15	Výsledky z rotačního smykového přístroje, průměrné hodnoty s celkem IV	8,7	2zkoušky $\varphi=7.5^\circ$ (tuf), jedna zkouška uhelný jíl $\varphi=11^\circ$	16,4	Reziduální pevnost měřená v rotačním přístroji		
	c	0		0					
	$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18,5						18,5	
	$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19,5						19,5	
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,34	Z Jákyho rovnice						
VI čedič	$\phi$ [°]	-							
	c	-							
	$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	23						23	
	$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	23,5						23,5	
	E [MPa]	200	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						
	v	0,10	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek						

Tabulka 9.5: Shrnutí parametrů kvazihomogenních celků, část 3

Kv. celek		použité ve výpočtech	pozn.	Herle (2014), laboratoř Arcadis		pozn.	PřFUK laboratoř		pozn.	AZ Consult (2014), Podrobný GTP-IGP	pozn.
VII slínovec podloží	$\varphi [^{\circ}]$	-									
	c	-									
	$\gamma_{\text{unsat}} [\text{kN/m}^3]$	19,5								19,5	
	$\gamma_{\text{sat}} [\text{kN/m}^3]$	20,5								20,5	
	E [MPa]	200	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek								
	v	0,1	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek								
VIII kontakt sut' vs. basalt	$\varphi [^{\circ}]$	24	Param. studie								
	c	0									
	$\gamma_{\text{unsat}} [\text{kN/m}^3]$	19									
	$\gamma_{\text{sat}} [\text{kN/m}^3]$	20									
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek								
	v	0,35	Z Jákyho rovnice								
Vb tuf, krit. param., smyková plocha	$\varphi [^{\circ}]$	29				29					
	c	0									
	$\gamma_{\text{unsat}} [\text{kN/m}^3]$	18,5								18,5	
	$\gamma_{\text{sat}} [\text{kN/m}^3]$	19,5								19,5	
	E [MPa]	20	Defaultní hodnota, nemá vliv na výsledek								
	v	0,34	Z Jákyho rovnice								

### *Kvazihomogenní celek I: slínovec zvětralý mimo smykovou plochu, deluviální hlíny.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován kritickými pevnostními parametry. Pevnost v kritickém stavu byla testována v laboratoři Přírodovědecké fakulty UK v triaxiálním přístroji na rekonstituovaných vzorcích (kapitola 9.2) s výsledky  $\varphi_{cr}=25,1^\circ$  a  $\varphi_{cr}=25,7^\circ$  pro vzorky z dvou různých vrtů. V simulacích se využila průměrná hodnota  $\varphi_{cr}=25,4^\circ$ . Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktom, že se jedná o kritickou smykovou pevnost (resp. byla uvažována zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=21 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{sat}=21,5 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídál hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\varphi_{cr})$ . Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20 \text{ MPa}$  zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

### *Kvazihomogenní celek II: deluviální sutě přirozené a těleso náspu tratě.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován kritickými pevnostními parametry. Laboratorní zkoušky na tomto materiálu jsou problematické z důvodu velikosti kamenů hrubozrnné frakce. Podrobný geotechnický průzkum (AZ Consult, 2014) udává hodnoty úhlu vnitřního tření v kritickém stavu v rozmezí  $24^\circ$  a  $32^\circ$ , v analýzách se použila průměrná hodnota  $28^\circ$ . Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktom, že se jedná o kritickou smykovou pevnost (resp. byla uvažována zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=19 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{sat}=20 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídál hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\varphi_{cr})$ . Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20 \text{ MPa}$  zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

### *Kvazihomogenní celek III: sutě výsypek kamenolomu.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován kritickými pevnostními parametry. Úhel vnitřního tření v kritickém stavu byl stanoven měřením úhlu přirozené sklonitosti výsypek kamenolomu pomocí pozemní fotogrammetrie jako  $34^\circ$ . Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktom, že se jedná o kritickou smykovou pevnost (resp. byla uvažována zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=19 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{sat}=20 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídál hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\varphi_{cr})$ . Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20 \text{ MPa}$  zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek IV: slínovec zvětralý v reziduálních parametrech, smyková plocha.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován reziduálními pevnostními parametry. Pevnost v reziduálním stavu byla testována v laboratoři Přírodovědecké fakulty UK v rotačním smykovém přístroji typu Bromhead (kapitola 9.2) a v laboratoři mechaniky zemin Arcadis CZ a.s. v krabиковém smykové přístroji (AZ Consult, 2014) s využitím metody několikanásobného smyku. Zkoušky v rotačním přístroji ukázaly  $\varphi_{res}=14,2^\circ$ , zkoušky ve smykové krabici pro tři různé vzorky ukázaly vcelku variabilní výsledky o hodnotách reziduálního úhlu vnitřního tření  $8,5^\circ$ ,  $15^\circ$  a  $12,5^\circ$ . Hodnota úhlu vnitřního tření na smykové ploše závisí na velikosti posunu, který nelze metodami geologického mapování ani dalšími metodami s přesností specifikovat. Lze pouze konstatovat, že pevnost bude mít hodnotu v rozmezí kritického a reziduálního úhlu vnitřního tření. Pro základní analýzy se z toho důvodu využila přibližná horní mez úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu  $\varphi_{res}=15^\circ$ , její vliv byl dále studován v rámci parametrické studie. Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktem, že se jedná o reziduální smykovou pevnost (resp. byla uvažována zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (odpovídá kvazihomogennímu celku I) (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=21 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{sat}=21,5 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídal hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\varphi_{cr})$  (v tomto případě je třeba využít kritický úhel vnitřního tření pro stanovení  $K_0$ , a to i přes to, že smyková pevnost odpovídá úhlu reziduálnímu). Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20 \text{ MPa}$  zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek V: tuf, tufitický jilovec a jilovec v reziduálních parametrech, smyková plocha.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován reziduálními pevnostními parametry, vzhledem k nízké mocnosti celku se v modelu uvažuje, že je celý tvořen materiélem smykové plochy (viz kapitola 9.2). Pevnost v reziduálním stavu byla testována v laboratoři Přírodovědecké fakulty UK v rotačním smykovém přístroji typu Bromhead (kapitola 9.2) a v laboratoři mechaniky zemin Arcadis CZ a.s. v krabиковém smykové přístroji (AZ Consult, 2014) s využitím metody několikanásobného smyku. Zkoušky v rotačním přístroji ukázaly  $\varphi_{res}=16,4^\circ$ , zkoušky ve smykové krabici ukázaly hodnoty reziduálního úhlu vnitřního tření  $7,5^\circ$  (dva vzorky, tuf) a  $11^\circ$  (jeden vzorek, uhelný jíl). Hodnota úhlu vnitřního tření na smykové ploše závisí na velikosti posunu, který nelze metodami geologického mapování ani dalšími metodami s přesností specifikovat. Lze pouze konstatovat, že pevnost bude mít hodnotu v rozmezí kritického a reziduálního úhlu vnitřního tření. Pro základní analýzy se z toho důvodu využila přibližná horní mez úhlu vnitřního tření v reziduálním stavu  $\varphi_{res}=15^\circ$ , její vliv byl dále studován v rámci parametrické studie. Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktem, že se jedná o reziduální smykovou pevnost (resp. byla uvažována zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=18,5 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{sat}=19,5 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídal hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající

Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\phi_{cr})$ . V tomto případě je třeba využít kritický úhel vnitřního tření pro stanovení  $K_0$ , a to i přes to, že smyková pevnost odpovídá úhlu reziduálnímu. Kritický úhel vnitřního tření celku V je specifikován v odstavci týkajícím se celku Vb. Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20$  MPa zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek VI: čedič.*

Tento kvazihomogenní celek v modelu představuje skalní podloží. Je charakterizován elastickým konstitučním vztahem. Totální tíha horniny nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=23$  kN/m<sup>3</sup> a  $\gamma_{sat}=23,5$  kN/m<sup>3</sup>. Defaultní hodnota Poissonova číslo byla nastavena jako 0,1 (nemá vliv na výsledky výpočtu). Youngův modul také nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=200$  MPa zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek VII: slínovec.*

Tento kvazihomogenní celek v modelu představuje skalní podloží. Je charakterizován elastickým konstitučním vztahem. Totální tíha horniny nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{unsat}=19,5$  kN/m<sup>3</sup> a  $\gamma_{sat}=20,5$  kN/m<sup>3</sup>. Defaultní hodnota Poissonova číslo byla nastavena jako 0,1 (nemá vliv na výsledky výpočtu). Youngův modul také nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=200$  MPa zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek VIII: kontakt sutí s tělesem bazaltu.*

Smykové parametry pro tento celek není možné odhadnout na základě laboratorních zkoušek. Vzhledem k tomu, že se očekává, že je povrch bazaltu pokryt produkty erozních pochodů, které mají charakter zemin, využila se v modelu odhadnutá hodnota úhlu vnitřního tření tohoto celku 24°, která byla dále podrobena parametrické studii. Hodnoty totální tíhy zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byly převzaty z celků II a III, tedy  $\gamma_{unsat}=19$  kN/m<sup>3</sup> a  $\gamma_{sat}=20$  kN/m<sup>3</sup>. Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídal hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\phi_{cr})$ . Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20$  MPa zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

#### *Kvazihomogenní celek Vb: tuf, tufitický jílovec a jílovec v kritických parametrech.*

Tento kvazihomogenní celek je charakterizován kritickými pevnostními parametry. Jedná se o alternativu celku V použitou v analýze F (viz kapitola 9.7). Pevnost v kritickém stavu byla testována v laboratoři Přírodovědecké fakulty UK v triaxiálním přístroji a krabicovém smykovém přístroji na rekonstituovaných vzorcích (kapitola 9.2) s výsledky  $\phi_{cr}=28,1^\circ$  (triaxialní zkouška) a  $\phi_{cr}=31,2^\circ$  (krabicová smyková zkouška) pro jeden vzorek zeminy. V simulacích se využila průměrná hodnota  $\phi_{cr}=29^\circ$  (volila se hodnota blíže výsledkům triaxiální zkoušky, která je považována za věrohodnější). Soudržnost byla uvažována nulová konzistentně s faktem, že se jedná o kritickou smykovou pevnost (resp. byla uvažována

zanedbatelná hodnota 1 kPa, neboť software zadání nulové soudržnosti neumožňuje). Totální tíha zeminy nad a pod hladinou podzemní vody byla převzata z podrobného geotechnického průzkumu (AZ Consult, 2014) jako  $\gamma_{\text{unsat}}=18,5 \text{ kN/m}^3$  a  $\gamma_{\text{sat}}=19,5 \text{ kN/m}^3$ . Poissonovo číslo bylo odhadnuto takovým způsobem, aby model předpovídal hodnotu součinitele bočního tlaku v klidu při vertikálním stlačení v průběhu fáze gravitačního zatěžování odpovídající Jákyho rovnici  $K_0=1-\sin(\phi_{\text{cr}})$ . Youngův modul nemá vliv na výsledky stabilitních výpočtů (viz kapitola 9.6.2), využila se standardní hodnota  $E=20 \text{ MPa}$  zajišťující optimální konvergenci výpočtu.

## 9.4 3D modely – Úvod a popis použitých metod analýzy

### 9.4.1 Použitý software

3D modely byly sestaveny v programovém systému Plaxis 3D, verze AE.02 (jedná se o nejnovější verzi tohoto software). Softwarový balík Plaxis je vyvíjen firmou Plaxis bv (Delft, Nizozemsko) od devadesátých let dvacátého století a v současné době představuje jeden z hlavních softwarových balíků používaných celosvětově k řešení geotechnických aplikací.

Program je založen na metodě konečných prvků (zkratka MKP). To znamená, že umožňuje realisticky zohlednit napěťo-deformační stav v podloží. Software umožňuje zohlednit prakticky libovolnou geometrii řešeného problému a umožňuje simulovat komplexní chování geomateriálů s využitím celé řady konstitučních modelů. Na rozdíl od metod mezní rovnováhy (ve většině dostupného software) lze řešit i 3D úlohy.

### 9.4.2 Zvolený typ analýzy

Pro analýzu byl využit Mohr-Coulombův materiálový model s využitím metody redukce smykové pevnosti (kapitola 9.4.3), metody povrchové vrstvy (kapitola 9.4.4) a normalizovaného stupně stability (kapitola 9.4.5). Tento způsob řešení byl zvolen po zvážení výhod a nevýhod dalších metod analýzy, mezi něž patří i napěťo-deformační analýza s využitím hypoplastického konstitučního modelu zohledňujícího nelineární chování zemin a částečné nasycení vodou. Po prostudování problému a provedení zkušebních výpočtů se konstatovaly následující výhody a nevýhody jednotlivých typů analýz, které vedly k finální volbě způsobu řešení:

- Ukázalo se, že stabilita sesuvu je kontrolována reziduální smykovou pevností. Hypoplastický model aktivaci reziduální pevnosti neumožňuje, Mohr-Coulombův model může být na reziduální pevnost kalibrován.
- Cílem posudku je porovnat stupně stability pro jednotlivé varianty (například přítomnost či nepřítomnost zářezu dálnice, výsypky kamenolomu apod.). Hypoplastický model přímý výpočet stupně stability a aplikaci metody redukce smykové pevnosti neumožňuje, kdežto Mohr-Coulombův model ano.
- Zohlednění částečného nasycení zemin vede ke komplexnosti kalibrační procedury hypoplastického modelu. K tomu jsou třeba speciální laboratorní experimenty, které nejsou na zeminách sesuvu Dobkovičky k disposici.
- Nehledě na předchozí bod je stabilita svahu kontrolována napěťo-deformačním chováním smykové zóny, která se celá nachází pod hladinou podzemní vody a tedy ve stavu nasyceném.
- Hypoplastický model v sobě zahrnuje podmínu pořušení Matsuoka-Nakai, která je blízká podmínce Mohr-Coulombově. Z pohledu stabilitního řešení tedy hypoplastický model nepřináší výhody oproti modelu Mohr-Coulombově.
- Hlavní výhoda hypoplastických modelů je při simulaci deformací zeminy v oboru malých a velmi malých přetvoření. V případě sesuvu ovšem tyto předpovědi nejsou relevantní, důležitá je předpověď stability svahu.

#### 9.4.3 Metoda redukce smykové pevnosti (metoda $\varphi$ -c redukce)

Stabilitní úlohy jsou v metodě konečných prvků řešeny tzv. metodou redukce smykové pevnosti. Její formulace je přisuzována Duncanovi (1996) a princip je následující. V stabilitní analýze je nejprve vygenerována geostatická napjatost postupným zvyšováním tříhového zrychlení z  $0 \text{ m/s}^2$  na skutečnou hodnotu. Tento výpočtový krok lze dokončit pouze v případě, že je ve své iniciální konfiguraci svah stabilní. V následujícím výpočtovém kroku jsou snižovány smykové parametry postupným zvyšováním koeficientu MSF tak, že

$$\tan \varphi_{red} = \frac{\tan \varphi}{MSF}$$

$$c_{red} = \frac{c}{MSF}$$

kde  $\varphi$  značí skutečný úhel vnitřního tření zeminy a  $c$  značí její skutečnou soudržnost.  $\varphi_{red}$  a  $c_{red}$  reprezentují redukované hodnoty těchto parametrů použité v analýze v daném výpočtovém kroku. Redukce smykové pevnosti v daném výpočtovém kroku může vést k dosažení obálky pevnosti v některých integračních bodech řešené úlohy, což vede k nárůstu deformací. Postupné zvyšování MSF vede k postupnému zplastizování materiálu podél nově formované smykové plochy a při určité limitní hodnotě MSF již není možno jeho hodnotu dále zvyšovat za současné splnění podmínky statické rovnováhy vnitřních a vnějších sil v řešené oblasti. Tato maximální hodnota MSF pak reprezentuje stupeň stability FS (tedy  $FS=MSF_{max}$ ). Lze ukázat, že takto získaný stupeň stability teoreticky odpovídá stupni stability získanému pomocí metod mezní rovnováhy v případě, že jsou splněny obecné podmínky nutné pro přesnost výpočtu pomocí metody konečných prvků (jako je dostatečně nízká chybová tolerance nerovnováhy vnitřních a vnějších sil a dostatečně jemné diskretizace výpočtové sítě).

Základní charakteristikou metody redukce smykové pevnosti je fakt, že vždy najde nejkritičtější smykovou plochu (tedy smykovou plochu o nejnižším stupni stability). Tato vlastnost je výhodnou a zároveň i nevhodnou metody redukce smykové pevnosti a výpočtu stupně stability pomocí metody konečných prvků obecně v porovnání s jednoduššími metodami mezní rovnováhy.

O výhodu MKP se jedná z toho důvodu, že v metodách mezní rovnováhy musí být kritická smyková plocha uživatelem předdefinována (anebo jsou softwarem automaticky testovány různé smykové plochy o daném funkčním vyjádření). Vzhledem k tomu, že vstupem pro metodu mezní rovnováhy je funkční předpis formulace smykové plochy, není možno zaručit, že byla skutečně nalezena smyková plocha o minimálním stupni stability. Při dostatečně obsáhlém testovaném souboru smykových ploch lze samozřejmě tuto nevýhodu metody mezní rovnováhy efektivně eliminovat.

Tato výhoda metody konečných prvků pro řešení stabilitních problémů je ovšem i významnou nevhodou v případě studia stability v úlohách o komplikované geometrii povrchu terénu a geologického podloží, což je i případ analyzovaného sesuvu na dálnici D8 u obce Dobkovičky. Metoda konečných prvků totiž vždy najde smykovou plochu o nejnižším stupni stability, která znemožní dosažení rovnováhu vnitřních a vnějších sil a vede k ukončení analýzy. V případě komplikovaného povrchu, který je vzhledem k možnostem výpočetní techniky diskretizován v určitém konečném počtu elementů se může stát (a nevyhnutelně

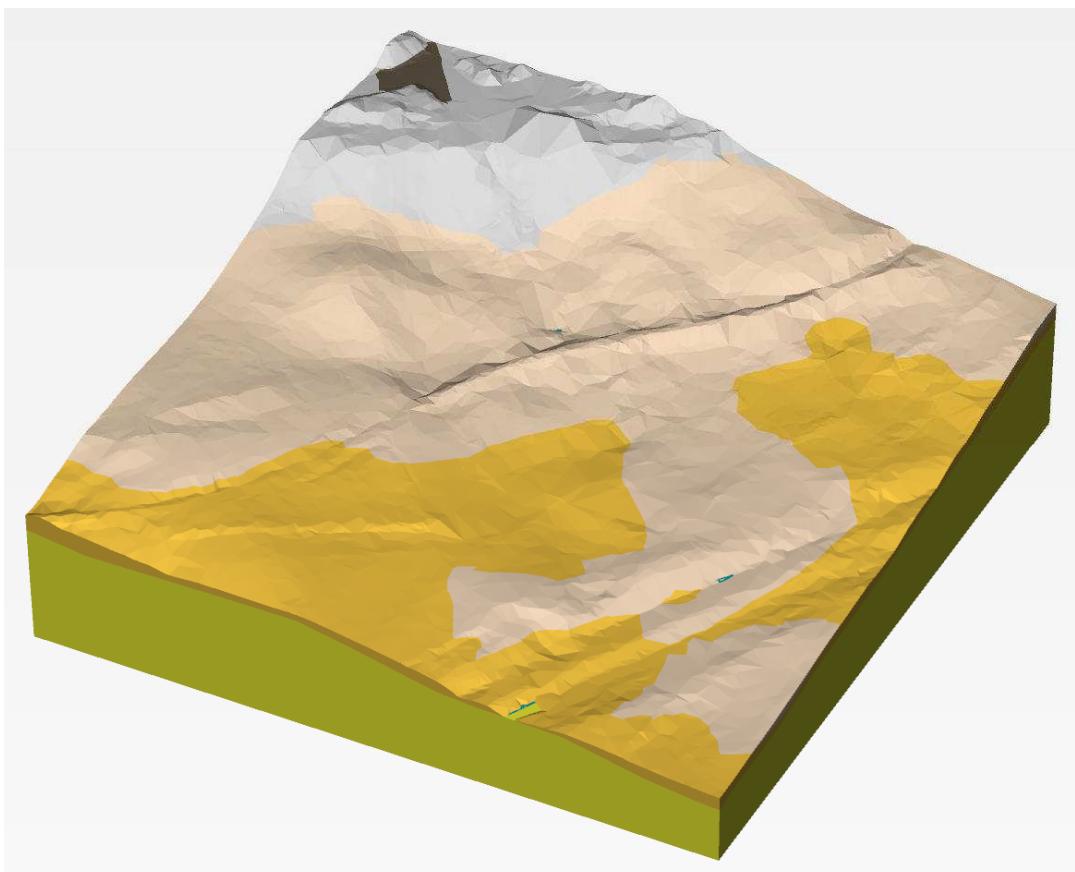
stane), že některé části povrchu (byť i o zanedbatelné velikosti odpovídající rozměru zvolené diskretizace) mají stupeň stability blízký hodnotě 1. Při výpočtu pak dochází k reprodukci drobných povrchových nestabilit a metoda nemůže nalézt hlavní sesuvnou deformaci, která je předmětem řešeného problému. V případě řešené úlohy se jedná zejména o lokální prudké svahy terénu na výsypkách lomového kameniva, při náspu železniční trati a při zárezu dálničního tělesa.

#### 9.4.4 Metoda povrchové vrstvy

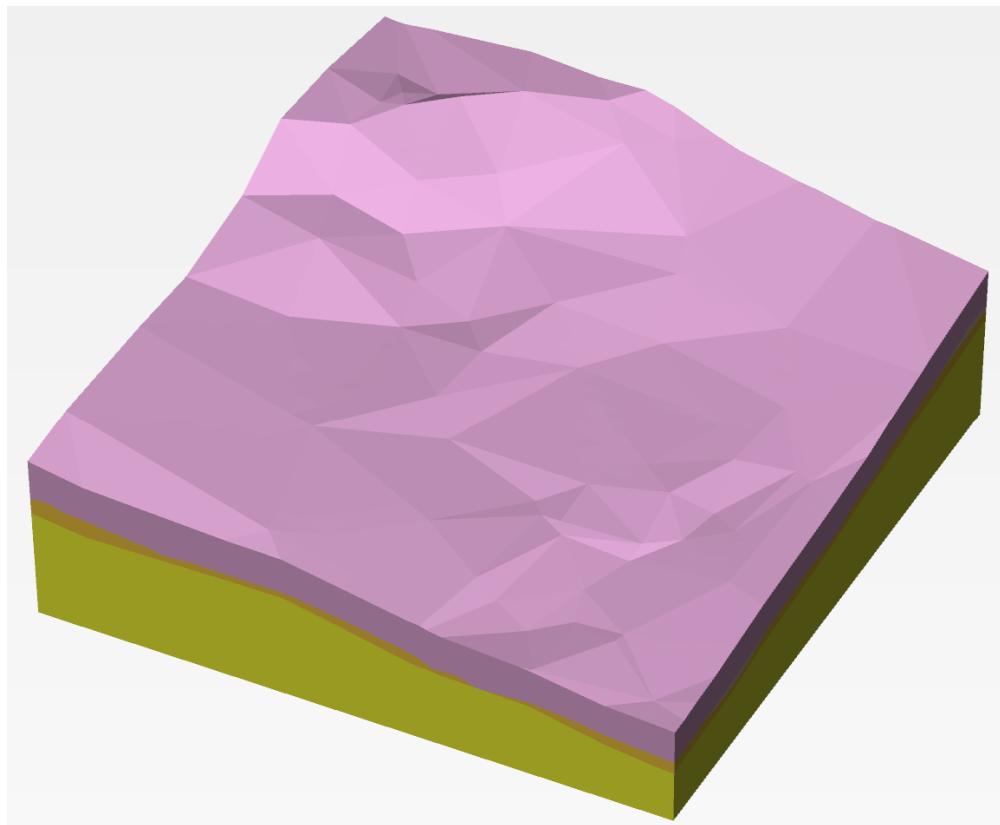
Svah o komplikované geometrii povrchu a podloží je velmi složitý systém, v němž se ve stavu porušení nachází všechny body na smykové ploše na obálce pevnosti materiálu. Geometrii takto složitého systému nelze vystihnout pomocí numerického modelu do posledního detailu a zároveň vždy panuje nejistota ohledně parametrů zemin z důvodu jejich skutečné prostorové variability a nevyhnutelné experimentální chyby (viz Suchomel a Mašín, 2010, Mašín, 2015). Důsledkem této skutečnosti je fakt, že při přímé aplikaci metody redukce smykové pevnosti bude docházet k vývoji sesuvu v oblastech, které přesně odpovídají minimu stupně stability v *daném numerickém modelu*. Ten se bude nevyhnutelně v detailech lišit od minima stupně stability skutečného svahu, což ovšem povede k významnému rozdílu ve vypočteném rozsahu sesuvu.

Pro eliminaci tohoto problému byla vyvinuta nová metoda analýzy stability svahu nazývaná „metoda povrchové vrstvy“. Její princip je následující. Před samotným spuštěním výpočtu metodou redukce smykových parametrů jsou do modelu včleněny dvě výpočtové fáze. V první fázi je povrch řešené oblasti pokryt vrstvou elastického materiálu (nazývanou „povrchová vrstva“) o dostatečně vysoké tuhosti. Materiál povrchové vrstvy má nulovou tíhu, nezpůsobuje tedy změnu napjatosti v geologickém podloží ani další deformace. V následující fázi je povrchová vrstva porušena zárezem sledujícím konturu studované svahové deformace. Při spuštění výpočtu metodou redukce smykové pevnosti jsou díky tuhosti povrchové vrstvy eliminovány všechny potenciální nestability kromě deformace odpovídající studovanému sesuvu. Výsledek je pak ekvivalentní předpovědím metodou mezní rovnováhy s předdefinovaným průsečíkem smykové plochy s povrchem terénu a s volným (tedy softwarem optimalizovaným) průběhem smykové plochy podložím. Metoda povrchové vrstvy tedy eliminuje nevyhnutelné nepřesnosti v numerickém modelu a umožní studovat průměrný stupeň stability odpovídající sesuvu, který vznikl ve skutečnosti.

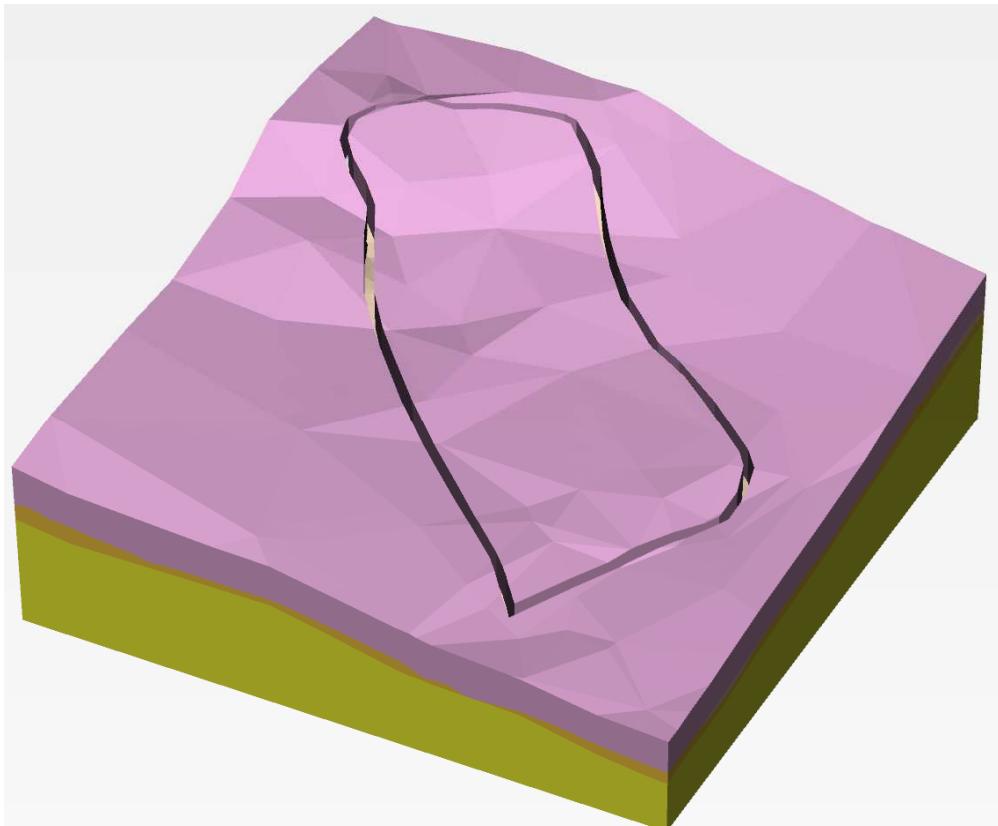
Příklad aplikace metody povrchové vrstvy v řešení studovaného sesuvu Dobkovičky je na obrázcích 9.15 až 9.17. Obrázek 9.15 představuje skutečný povrch terénu, obrázek 9.16 povrch terénu pokrytý povrchovou vrstvou a obrázek 9.17 porušení povrchové vrstvy zárezem sledujícím známý obrys sesuvu. Vyhodnocení předpovědí metody povrchové krusty v relaci k jejím mechanickým vlastnostem je v kapitole 9.6.2, kde je ukázáno, že vypočtený stupeň stability je na mechanických vlastnostech povrchové vrstvy nezávislý.



Obrázek 9.15: Skutečný povrch terénu použitý v základním modelu sesuvu Dobkovičky využívající metodu povrchové vrstvy.



Obrázek 9.16: Povrchová vrstva využitá v modelu sesuvu Dobkovičky.



Obrázek 9.17: Povrchová vrstva opatřená zárezem sledujícím konturu sesuvu Dobkovičky.

#### 9.4.5 Výpočet normalizovaného stupně stability

Jak bylo diskutováno v odstavci 9.4.4, výpočet stupně stability je zatížen mnoha neznámými od nepřesné znalosti geometrie geologického podloží, nejistotě v parametrech zemin, diskretizace MKP sítě a podobně. V případě posouzení nového návrhu jsou tyto neznámé v modelu zohledňovány vyžadováním vypočteného stupně stability ( $FSc$ ) vyššího než 1. Obvyklé hodnoty závisí na využité normě a typu smykové pevnosti (vrcholová, kritická, reziduální) a většinou se pohybují v rozmezí 1.1-1.3.

V případě variantního řešení skutečného svahu, kde je známá skutečnost, že v určité konfiguraci došlo k porušení, lze řadu neznámých eliminovat následujícím způsobem. Označme vypočtený stupeň stability svahu, u kterého došlo k porušení, jako  $FScr$ . Pro identifikaci skutečné stability jednotlivých variant pak můžeme s výhodou využít normalizovaný stupeň stability počítaný jako

$$FSn = \frac{FSc}{FScr}$$

Velké množství potenciálních chyb numerického výpočtu je u normalizovaného stupně stability  $FSn$  eliminováno, proto jeho hodnota byť jen mírně překračující hodnotu 1 indikuje porušení svahu.

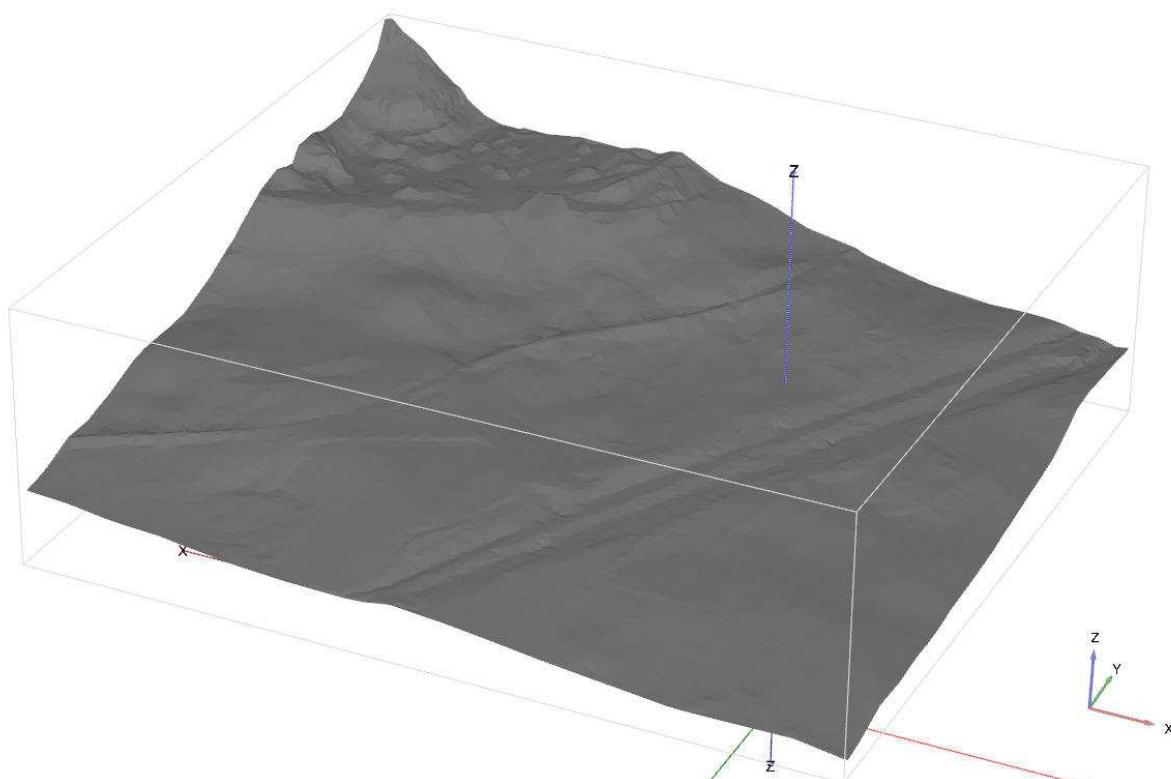
## 9.5 3D modely – Popis a výstavba modelů

### 9.5.1 3D modely terénu

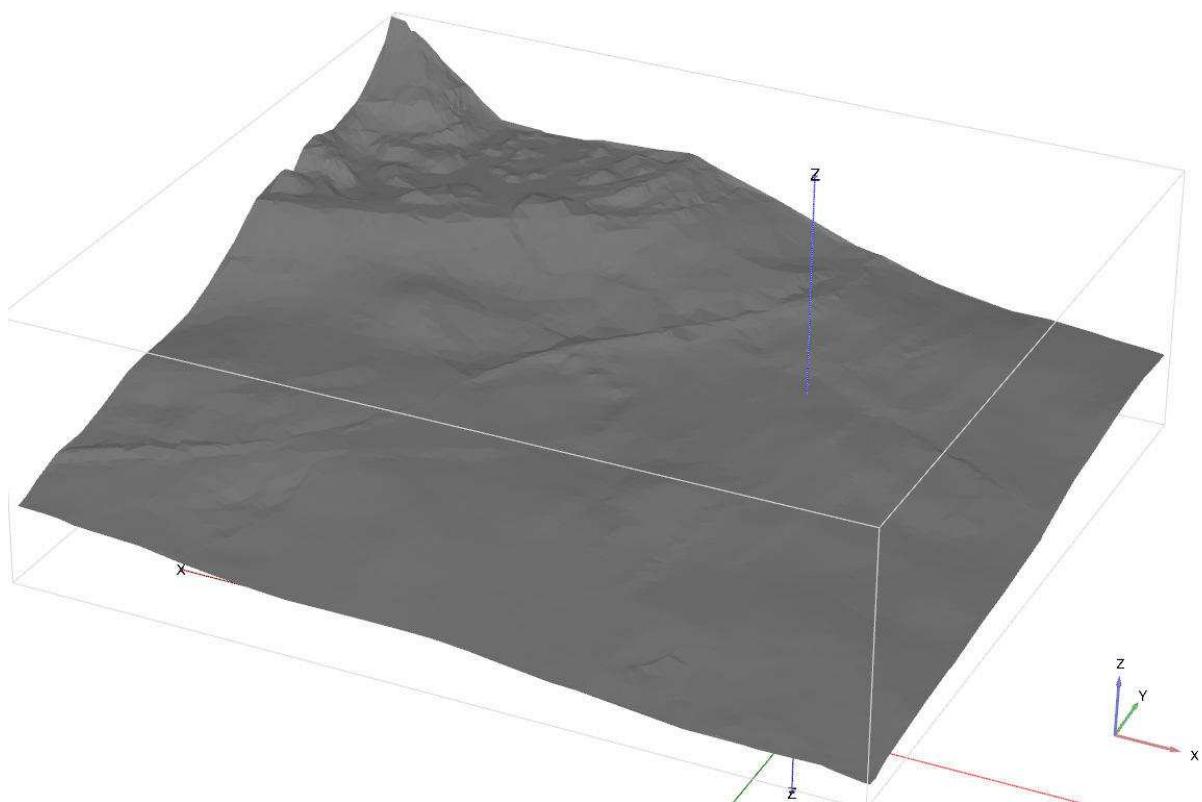
Povrch terénu byl v modelech reprezentován následujícími daty z 3D skenování povrchu pomocí systému LIDAR (více viz kapitola 7)

1. 3D model terénu z roku 2010. Dálniční zářez je zde stejný jako v roce 2013, velikost a tvar výsypek lomu byl v modelu upraven s využitím pozemní fotogrammetrie tak, aby velikosti a objemy výsypky odpovídaly stavu těsně před sesuvem v roce 2013. Povrch je znázorněn na obrázku 9.18.
2. 3D model terénu z roku 2006, který znázorňuje situaci před vybudováním zářezu dálnice. Do tohoto modelu je zakomponována výsypka kamenolomu z roku 2013 tak, jak je modelována v povrchu č. 1. Povrch je znázorněn na obrázku 9.19.
3. Model terénu z bodu 1, z kterého byl odstraněn násep železniční tratě. Povrch je znázorněn na obrázku 9.20.
4. Model terénu po první fázi sanace sesuvu (pouze odlučná hrana sesuvu). Povrch je znázorněn na obrázku 9.21, v pozadí je též zobrazen povrch č. 1.

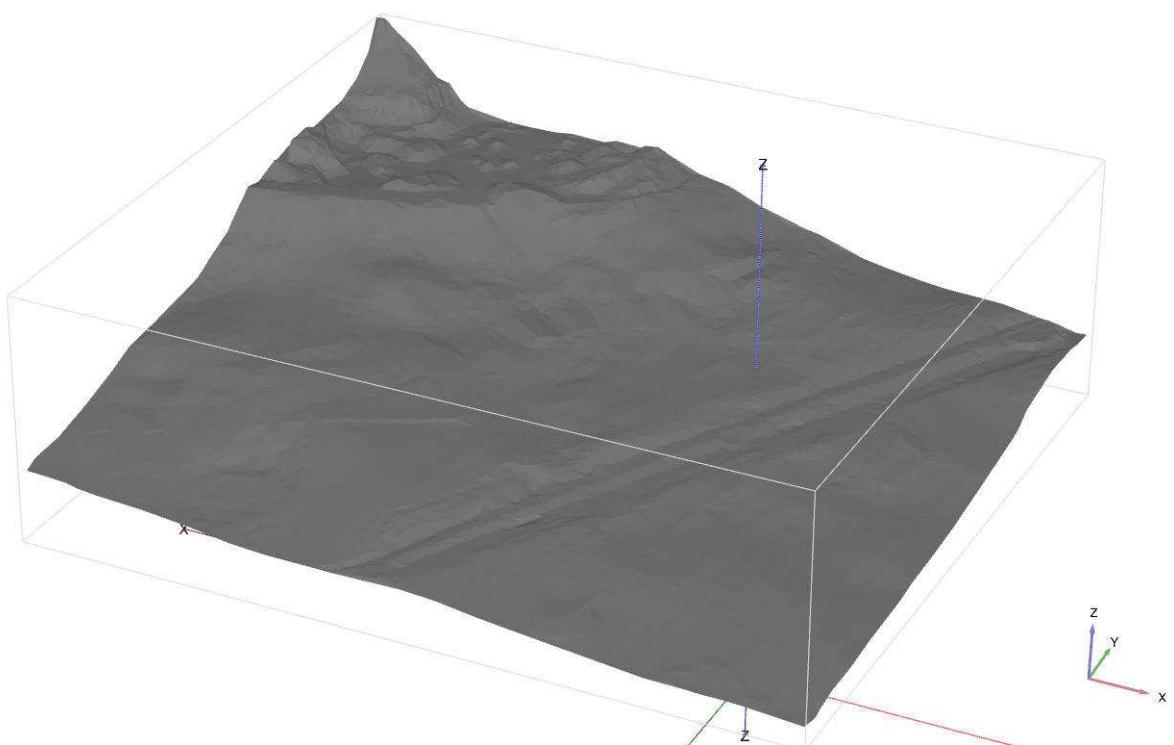
Výše zmíněná data byla interpolována trojúhelníkovým povrchem s krokem 6 m (tzv. TIN - triangulated irregular network - surface), čímž byly získány povrchy terénu vstupující do matematických modelů.



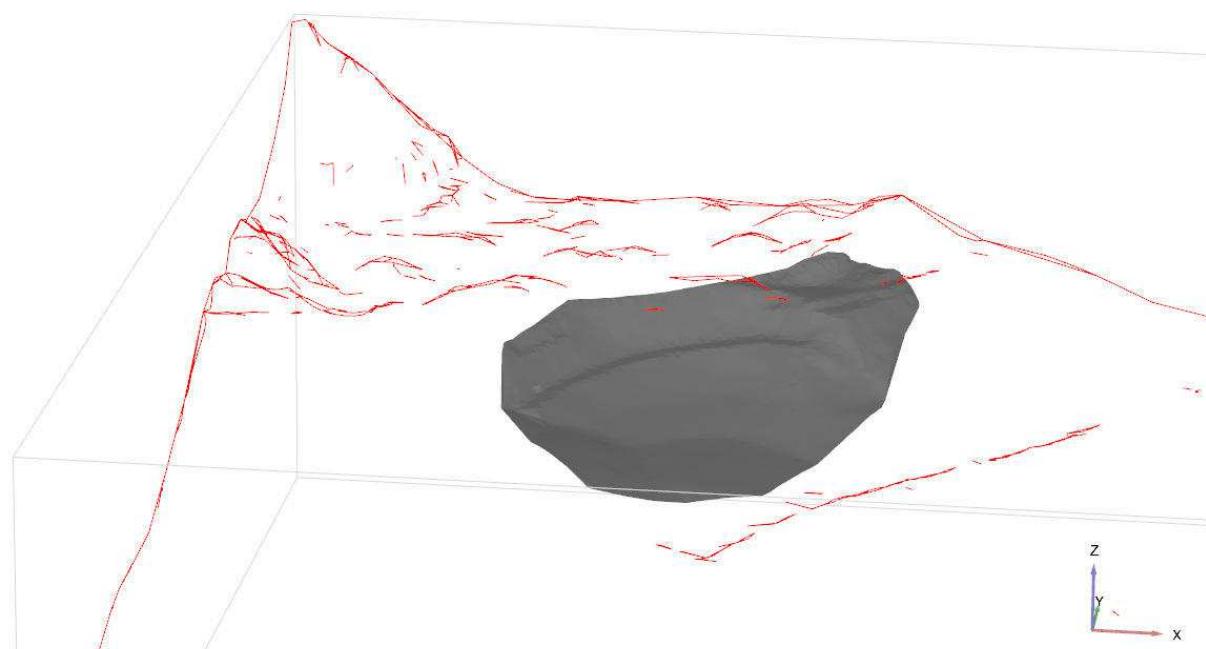
Obrázek 9.18: Model terénu č. 1 znázorňující stav oblasti v okamžiku sesuvu v červnu 2013.



Obrázek 9.19: Model terénu č. 2: odpovídá modelu č. 1, ovšem neobsahuje zářez dálnice.



Obrázek 9.20: Model terénu č. 3: odpovídá modelu č. 1 ovšem neobsahuje násep železnice.



Obrázek 9.21: Model terénu č. 4: stav odlučné hrany sesuvu po první etapě sanace.

### 9.5.2 3D model geologického podloží

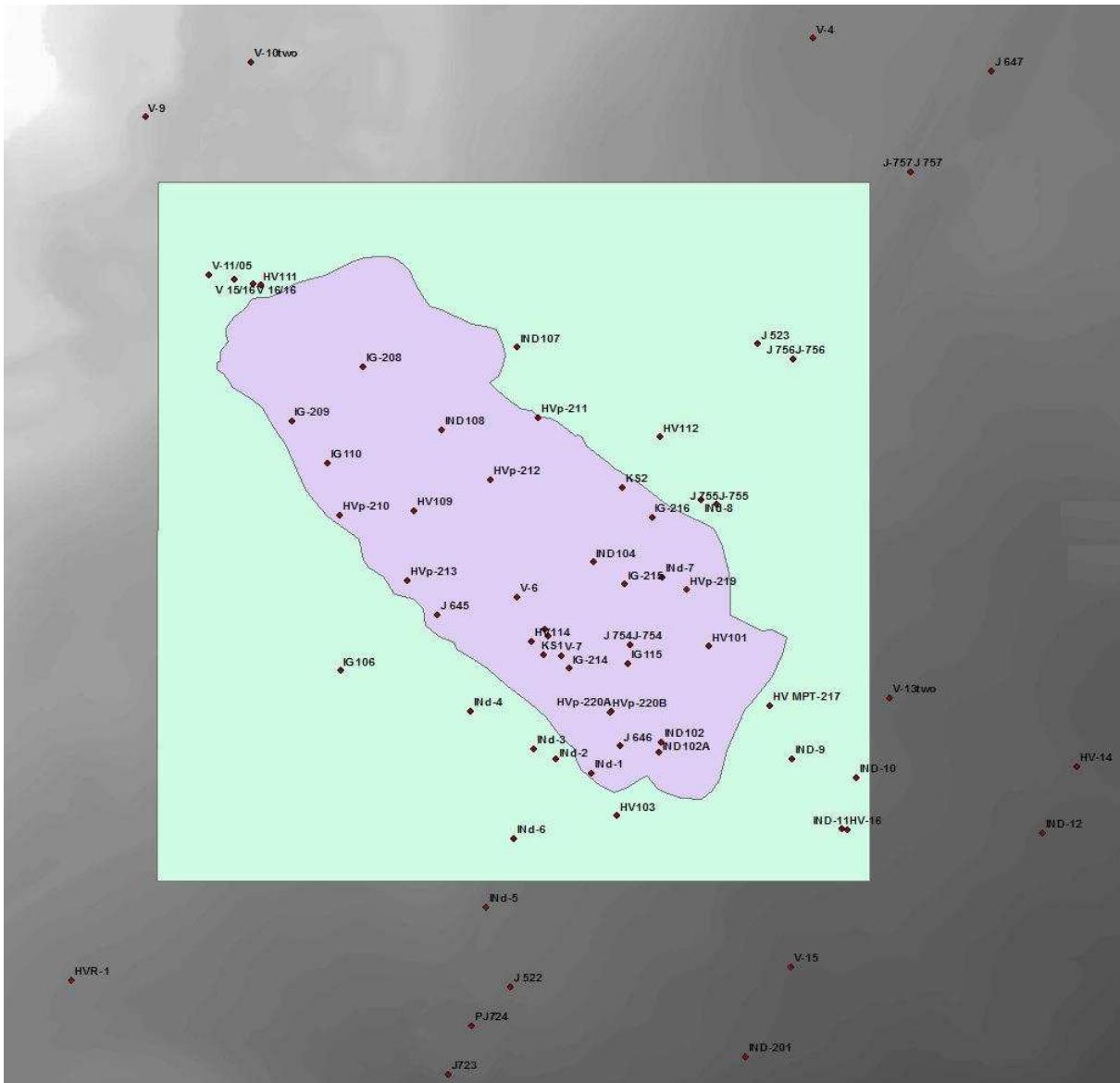
3D model geologického podloží byl sestaven na základě bohaté vrtné dokumentace, která je v rámci zájmové oblasti k disposici. Vrty využité k sestavení modelu jsou shrnuty v tabulkách 9.6a a 9.6b. Zeleně označené vrty byly přímo zaneseny do modelu, červeně označené vrty byly při sestavování modelu uvažovány ale nejsou v něm z různých důvodů přímo zaneseny (přílišná blízkost jiného vrstu, diskutabilní interpretace popisu jádra a podobně). Obrázek 9.22 pak vyznačuje zájmovou oblast s vyznačení obrysu sesuvu a pozice jednotlivých vrtů.

*Tabulka 9.6a: Vrtná dokumentace využitá k sestavení 3D modelu podloží, část 1.*

číslo	Zdroj	Označení	Signatura	Rok
1	Arcadis. inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum	HVR-1	GF P144917	2015
2	PÚDIS a. s.	J-757	GF P093864	1998
3	Geoindustria	V-6	GF FZ005763	1979
4	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HV MPT-217		2015
5	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV101		2014
6	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV103		2014
7	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV109		2014
8	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV111		2014
9	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV112		2014
10	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	HV114		2014
11	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HV-16		2013
12	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-210		2015
13	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-211		2015
14	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-212		2015
15	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-213		2015
16	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-219		2015
17	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-220A		2015
18	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	HVp-220B		2015
19	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IG106		2014
20	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IG110		2014
21	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IG115		2014
22	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IG-208		2015
23	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IG-209		2015
24	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IG-214		2015
25	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IG-215		2015
26	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IG-216		2015
27	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	IND-1	P132702	2011
28	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IND-10		2013
29	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IND102		2014
30	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IND102A		2014
31	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IND104		2014

Tabulka 9.6b: Vrtná dokumentace využitá k sestavení 3D modelu podloží, část 2.

číslo	Zdroj	Označení	Signatura	Rok
32	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IND107		2014
33	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	IND108		2014
34	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IND-11		2013
35	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-2	P132702	2011
36	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-3	P132702	2011
37	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-4	P132702	2011
38	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-5	P132702	2011
39	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-6	P132702	2011
40	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-7	P132702	2011
41	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	INd-8	P132702	2011
42	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	IND-9		2013
43	PÚDIS a.s.	J 523		1996
44	PÚDIS a.s.	J 645		1997
45	PÚDIS a.s.	J 646		1997
46	PÚDIS a.s.	J 754		1998
47	PÚDIS a.s.	J 755		1998
48	PÚDIS a.s.	J 756		1998
49	PÚDIS a.s.	J 757		1998
50	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	KS1		2014
51	AZ Consult. spol. s r.o. Ústní nad Labem	KS2		2014
52	Kámen Zbraslav. a.s.	V 15/16		2016
53	Kámen Zbraslav. a.s.	V 16/16		2016
54	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	V-10two	FZ005763	1979
55	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	V-11/05	FZ006735	2005
56	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	V-13two		2013
57	ARCADIS CZ a.s.. divize Geotechnika	V-15		2013
58	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	V-7	P023257	1971
59	ČGS - databáze geologicky dokumentovaných objektů	V-9	FZ005763	1979



Obrázek 9.22: Pozice vrtů využitých k sestavení 3D modelu geologického podloží s vyznačením zájmové oblasti a kontury sesuvu.

Při sestavování 3D modelu geologického podloží a následně 3D výpočtového modelu včetně povrchu terénu se postupovalo následovně:

1. Byly vyčleněny kvazihomogenní celky představující v modelu ucelené vrstvy (viz kapitola 9.1).
2. Ve vrtné dokumentaci byly jednotlivé kvazihomogenní celky identifikovány.
3. Záznam z jednotlivých vrtů byl v programu Plaxis zpracován s využitím funkce „borehole“, čímž vznikl prvotní model geologického podloží. Tento model byl zatížen chybami způsobenými tím, že vrty byly často nekonzistentně dokumentovány různými geology. Prostor mezi vrty byl lineárně interpolován, což vedlo k nejistotám v oblastech s nízkou vrtnou hustotou (zejména u paty odlučné hrany sesuvu a v odlučné hraně jako takové).
4. Model z bodu 3 prošel úpravou extrémů: záznamy z vrtů, které byly nekonzistentní s většinovým záznamem v blízkém okolí, byly upraveny tak, aby se v modelu neobjevovaly extrémní výkyvy hloubky jednotlivých vrstev.

5. Na základě modelu z bodu 4 byl s využitím geologické argumentace sestaven myšlený model podloží. Na jeho základě byly doplněny „pomocné“ vrty, které nemají ekvivalent ve skutečných vrtných pracích, ale upravují průběh vrstev v oblastech s nízkou hustotou vrtů tak, aby byl model geologicky opodstatněný.
6. V následujícím kroku byl využit model terénu č. 4 (model po skončení první etapy sanace, viz obrázek 9.23, kapitola 9.5.1) k zpřesnění průběhu hranice bazaltů s deluviálními sedimenty a výsypky kamenolomu. Využilo se skutečnosti, že odtěžování zemin v rámci první etapy sanace bylo ukončeno při dosažení skalního podloží (část modelu terénu nad odvodňovací rýhou).
7. Do modelu podloží z bodu 6 byla včleněna hladina podzemní vody o průběhu očekávaném na základě studia hydrogeologických dat (kapitola 5).
8. Takto vzniklým modelem byl proložen model terénu č. 1 a pro variantní analýzy modely terénu č. 2 a č. 3.
9. V další fázi byl spuštěn generátor sítě metody konečných prvků (viz kapitola 9.6.1). Vzhledem k velmi komplikovanému průběhu terénu a podloží vznikla v modelu řada oblastí („clusterů“) s extrémně malými velikostmi a úhly kontaktu, které efektivně znemožňovaly generování sítě. Tyto oblasti byly jedna po druhé z modelu eliminovány jemnou úpravou průběhu geologických vrstev.
10. Do modelu byla včleněna povrchová vrstva o mocnosti 20 m nad povrchem terénu.
11. Do modelu byl včleněn zářez povrchové vrstvy šířky cca 6 m sledující konturu sesuvu těsně po jeho inicializaci (kontura byla approximována ze známého finálního tvaru sesuvu).
12. Opět byl spuštěn generátor sítě, byly upraveny oblasti nevhodného tvaru vzniklé mezi průmětem obrysu sesuvu a povrchové vrstvy a byla vygenerována síť pro výpočty metodou konečných prvků.
13. Model z bodu číslo 12 byl využit pro prvotní analýzy sensitivity na zvolené parametry (jako vliv diskretizace a vliv elasticke tuhosti, kapitola 9.6). Dále byl využit pro prvotní analýzy, které ukázaly, že svah je s kritickými výpočtovými parametry stabilní a že sesuv byl kontrolován predisponovanou plochou staršího sesuvu s reziduálními parametry. V následujícím kroku byla tedy do modelu na základě vrtného průzkumu včleněna vrstva odpovídající smykové ploše, pro níž byly v modelu zadávány reziduální parametry (kvazihomogenní celky IV a V).
14. Byla vygenerována finální síť konečných prvků (kapitola 9.6.1, obrázky 9.42 až 9.47) a připraven tak model používaný v rámci analýz. V základní formě využívá model terénu č. 1, pro variantní řešení byl proložen modely terénu č. 2 a 3.

V následujícím textu jsou popsány detaily některých z výše zmíněných bodů. Pro vývoj modely byly zvoleny hranice zájmové oblasti tvořící obdélník o velikosti 420 x 440 m. Pro specifikaci pozice v rámci zájmové oblasti byly geografické souřadnice posunuty o hodnotu  $x=-764000$  m a  $y=-986500$  m. V rámci této lokální soustavy souřadnic je zájmová oblast ohrazena následovně:

$$\begin{aligned}x_1 &= -380 \text{ m}, x_2 = 40 \text{ m} \\y_1 &= -305 \text{ m}, y_2 = 135 \text{ m}\end{aligned}$$

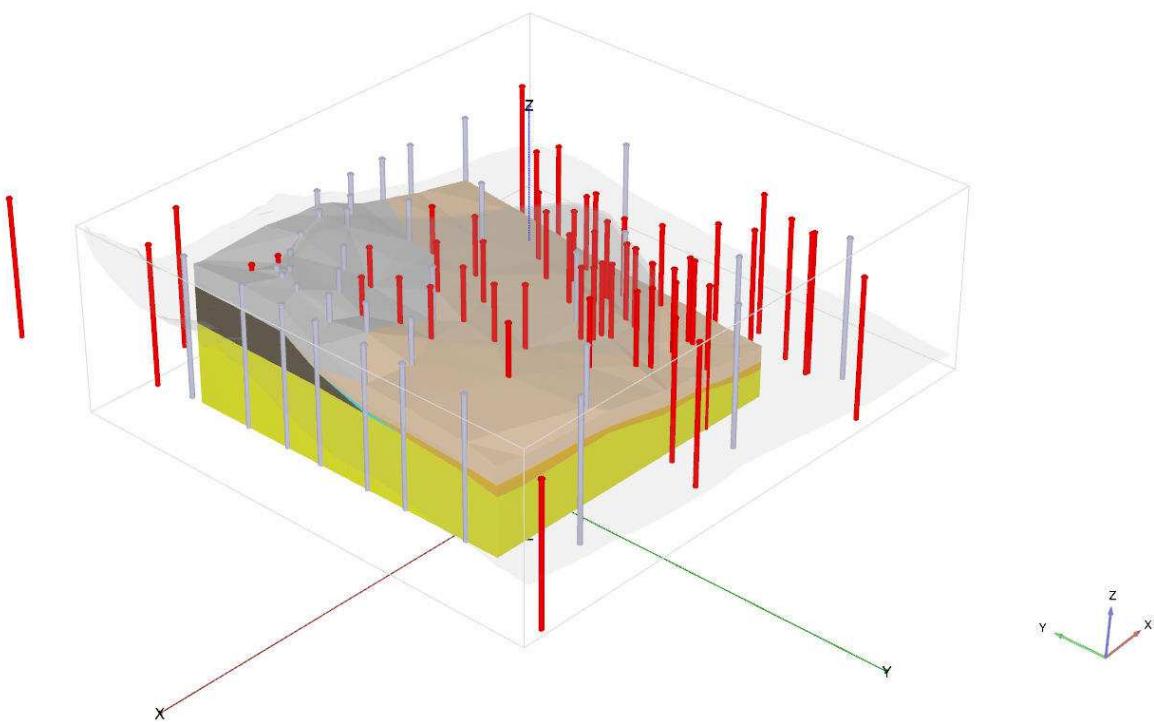
Jednotlivé kvazihomogenní celky byly definovány v kapitole 9.1. V tabulce 9.1b na následující stránce jsou pro úplnost znova shrnutý (včetně pouze numerických celků Vb a IX).

*Tabulka 9.1b: Shrnutí kvazihomogenních celků uvažovaných v analýzách*

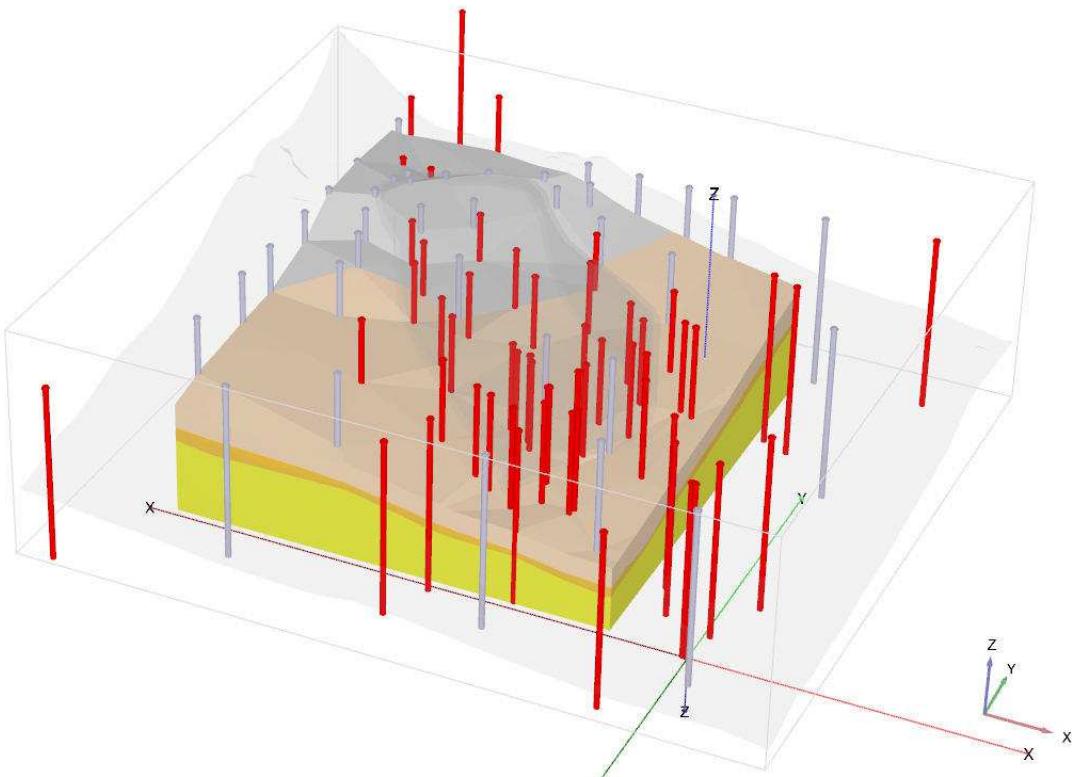
Označení a barva	Popis
I	Deluviální hlíny včetně produktu zvětrání slínovce mimo smykovou plochu sesuvu.
II	Deluviální sutě přirozené - hlinité štěrky deluválního původu. Zahrnuje i těleso náspu železniční tratě, které je obdobného charakteru a bylo pravděpodobně budováno z místních materiálů.
III	Materiál výsypky kamenolomu – ostrohranné kamenivo tvořené čedičovými kameny o velikosti několika cm.
IV	Silně zvětralý až rozložený křídový slínovec v smykové zóně charakterizovaný reziduálními smykovými parametry.
V	Kvazihomogenní celek zahrnující vulkanoklastika (tufy) a tercierní sedimenty (jílovce, tufitické jílovce, jílovce s uhelnou příměsí) ve smykové zóně charakterizované reziduálními smykovými parametry.
VI	Bazaltové těleso tvořící podloží studované oblasti.
VII	Křídový slínovec navětralý až čerstvý tvořící podloží studované oblasti.
VIII	Kontakt deluviálních sutí a lomových sutí s tělesem bazaltu mající snížené smykové parametry oproti kamenivu samotnému.
Vb	Vulkanoklastika (tufy) charakterizované kritickými smykovými parametry (použíte pouze v modelu „F“ místo celku V)
IX	Povrchová vrstva použitá v rámci analýz metodou povrchové vrstvy

V následujících obrázcích 9.23 až 9.24 jsou znázorněny pozice skutečných a pomocných vrtů využitých pro sestavení 3D geologického modelu, demonstrovány jsou průběhy jednotlivých vrstev a jsou sestaveny geologické řezy.

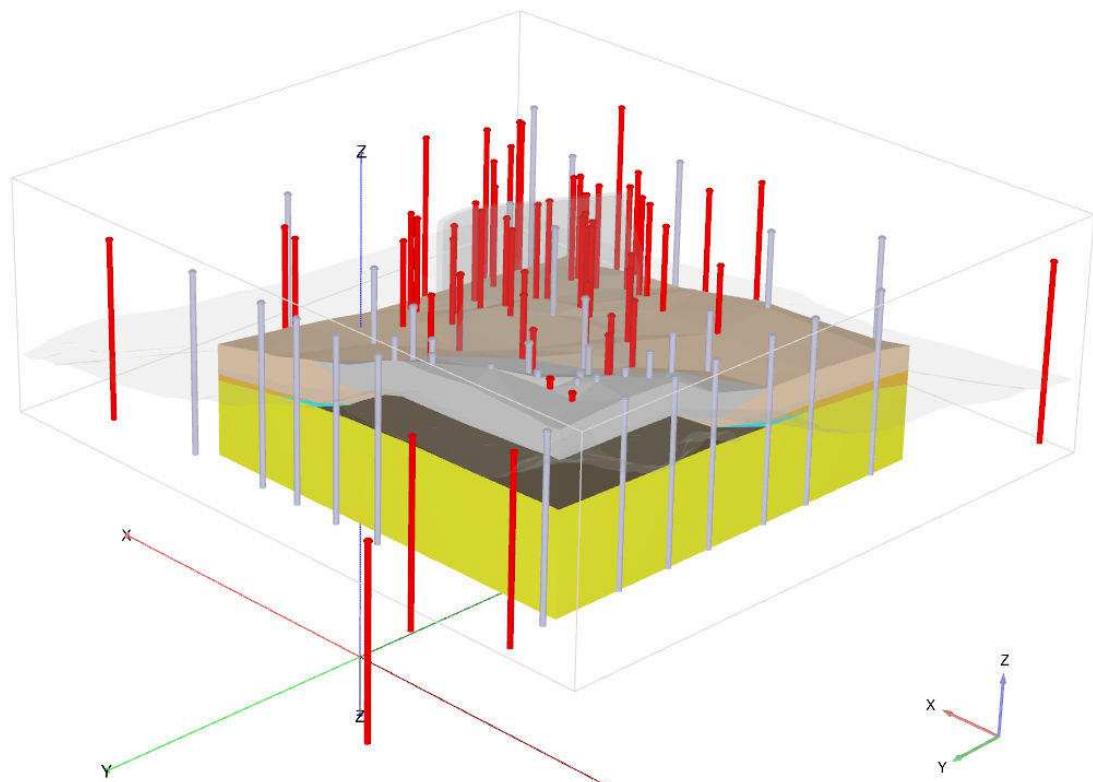
Výsledné vstupní soubory pro software Plaxis 3D jsou uloženy na pracovišti zpracovatele.



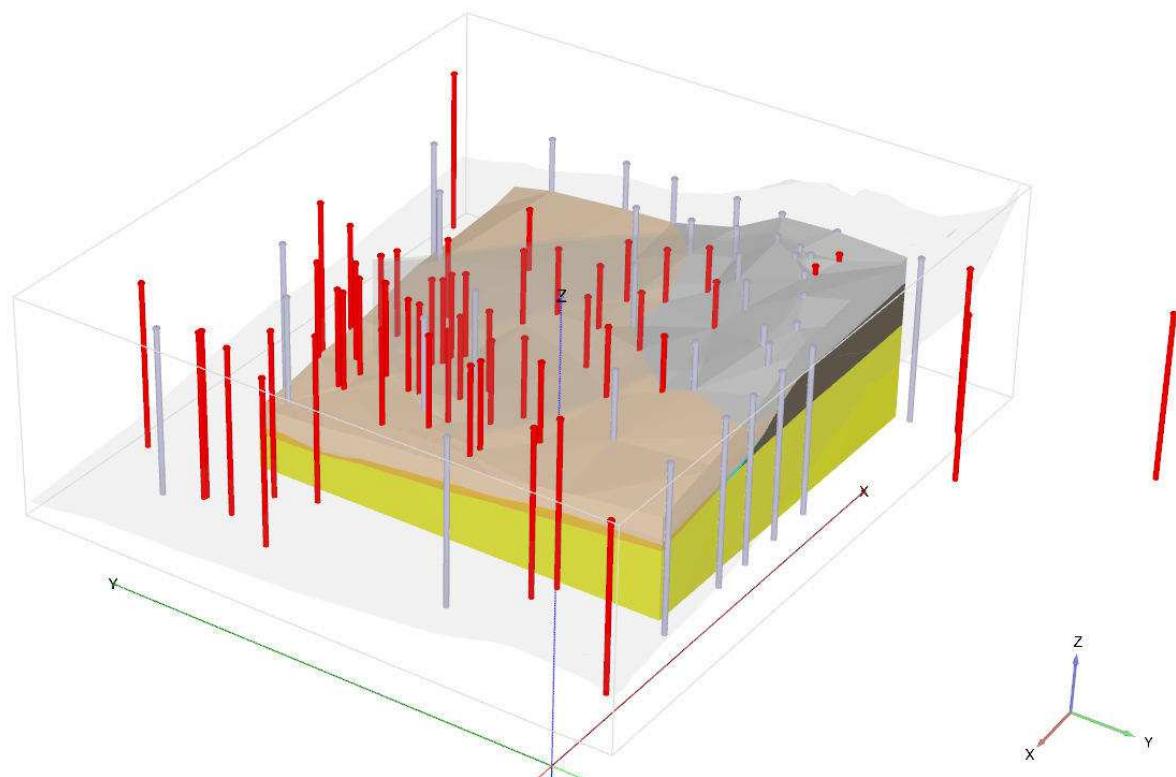
Obrázek 9.23: Pozice jednotlivých vrtů použitých pro sestavení 3D geologického modelu (pohled 1). Červeně označené vrty jsou skutečnými vrty jejichž dokumentace byla k disposici pro sestavování modelu, šedě označené vrty jsou pomocné vrty sloužící k zpřesnění modelu.



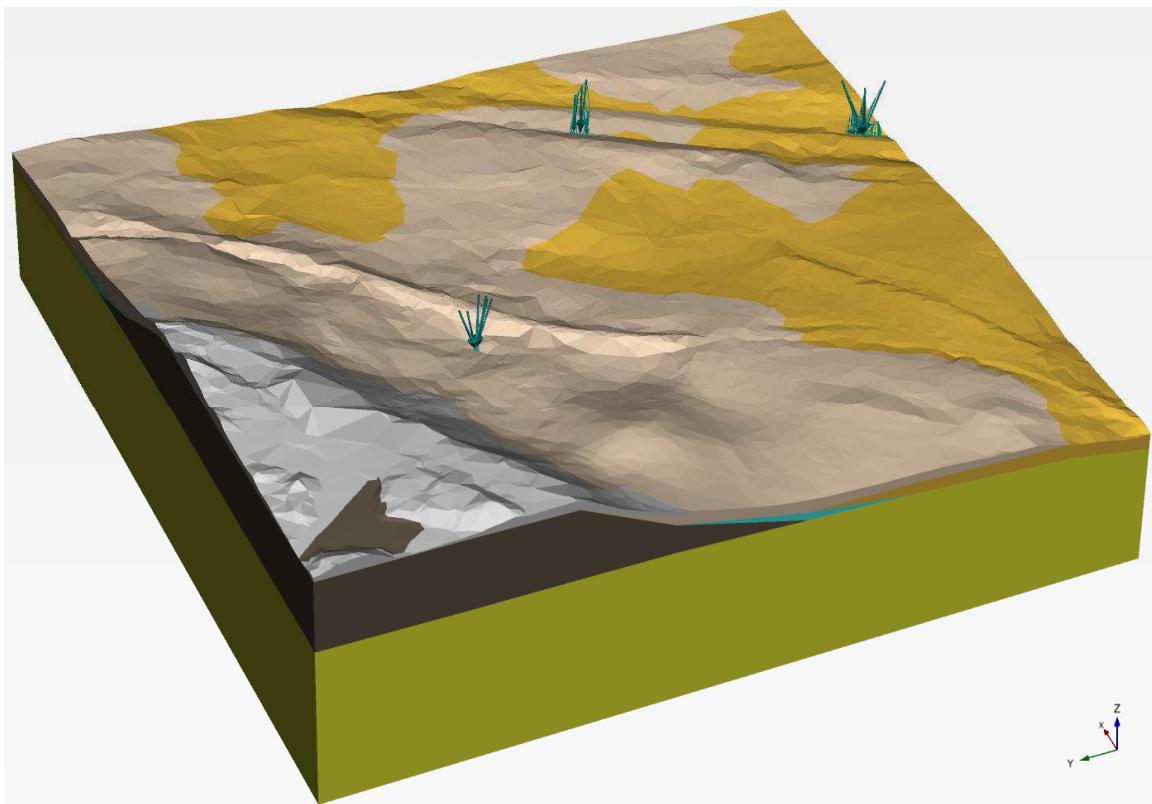
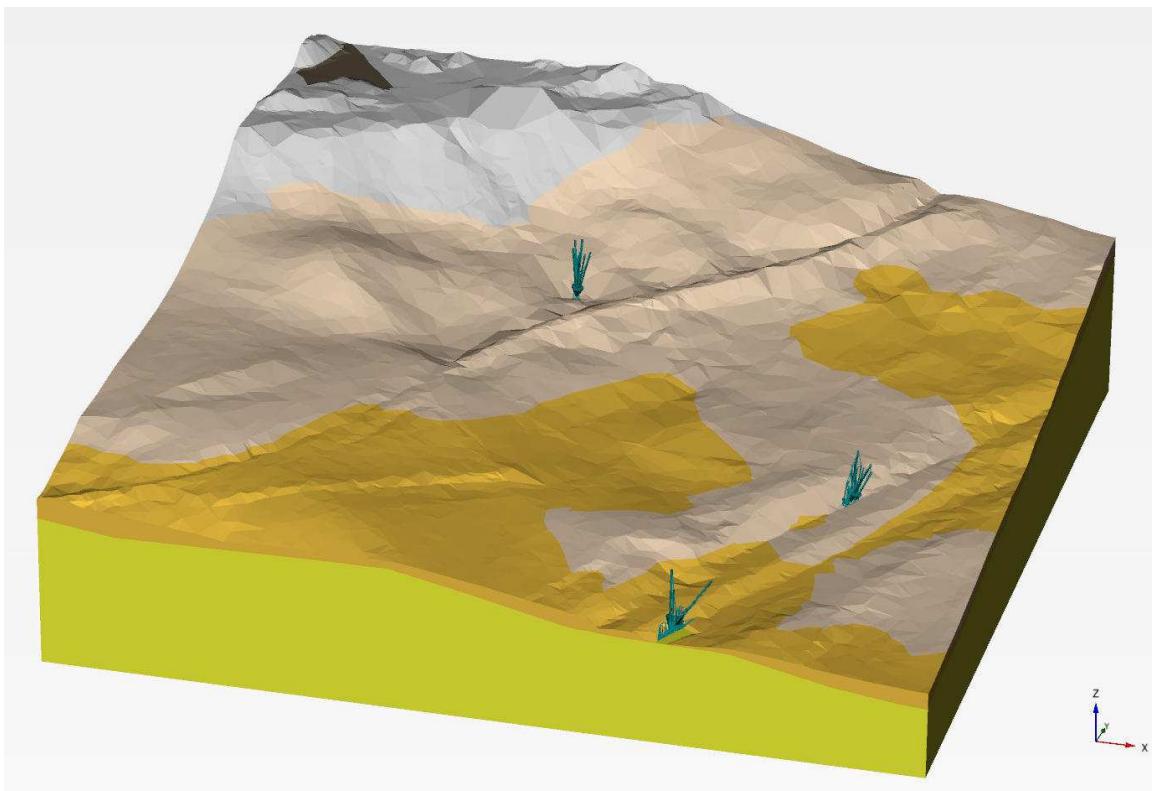
Obrázek 9.24: Pozice jednotlivých vrtů použitých pro sestavení 3D geologického modelu (pohled 2).



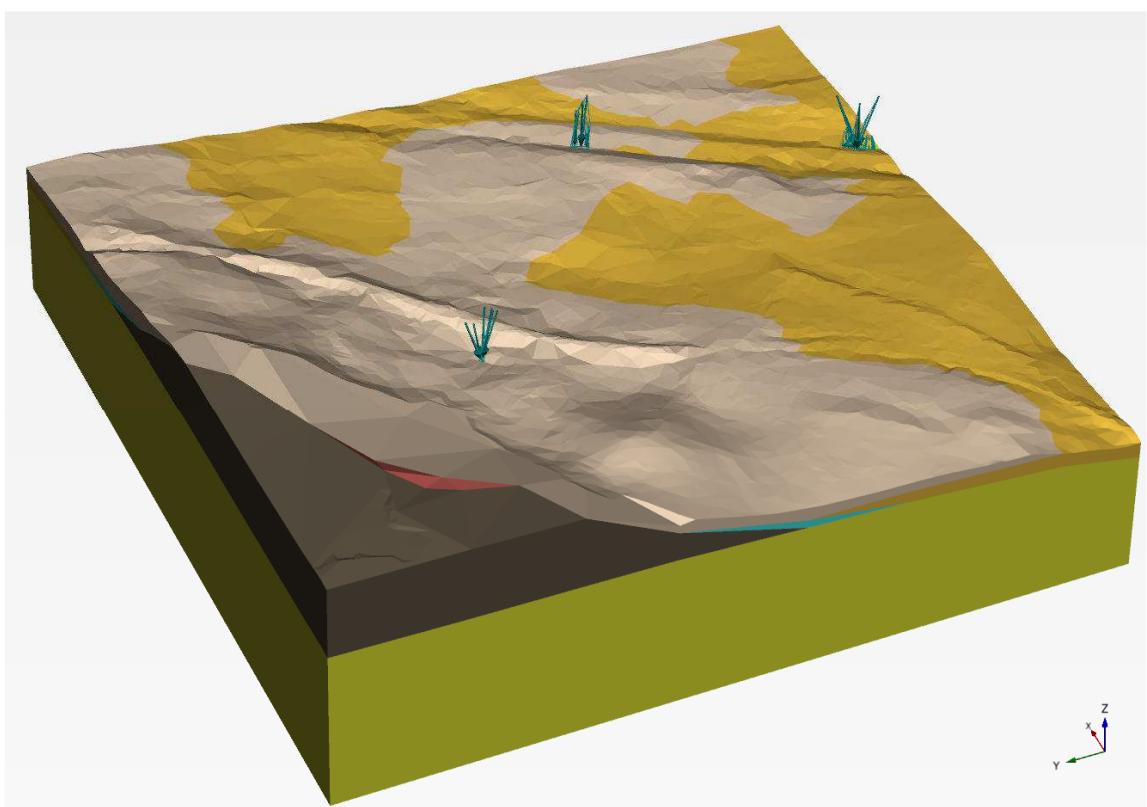
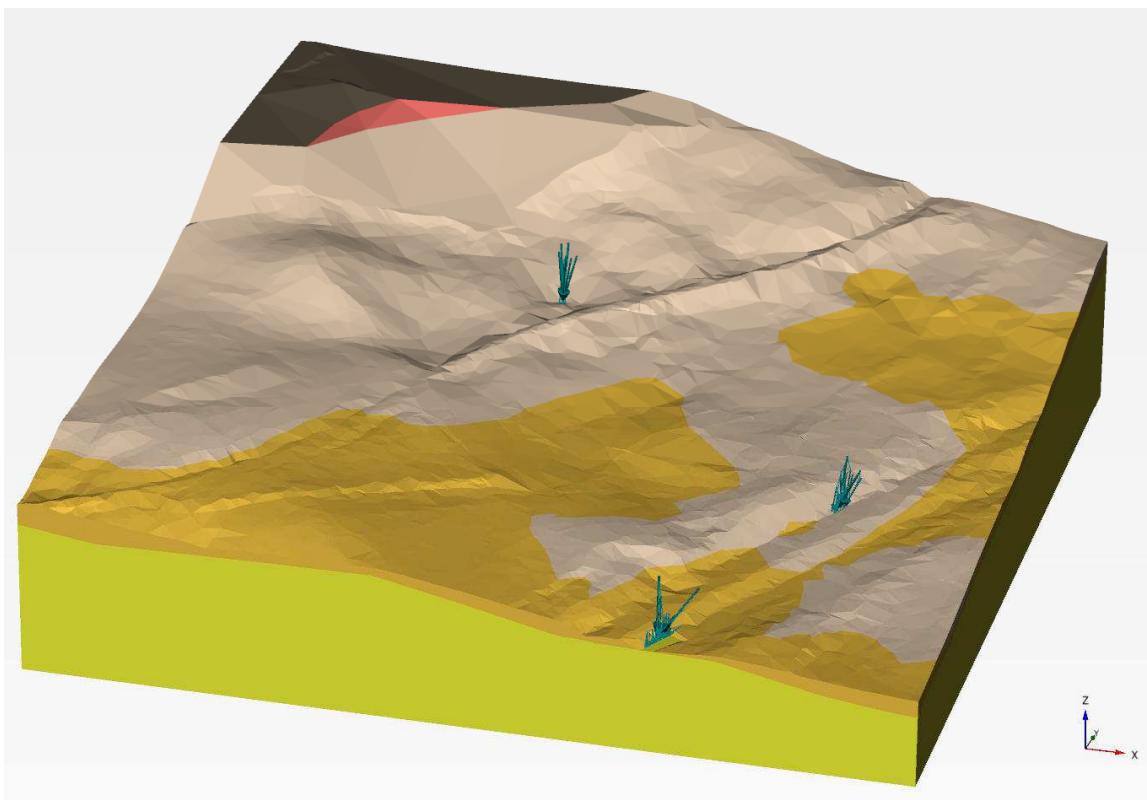
Obrázek 9.25: Pozice jednotlivých vrtů použitých pro sestavení 3D geologického modelu (pohled 3).



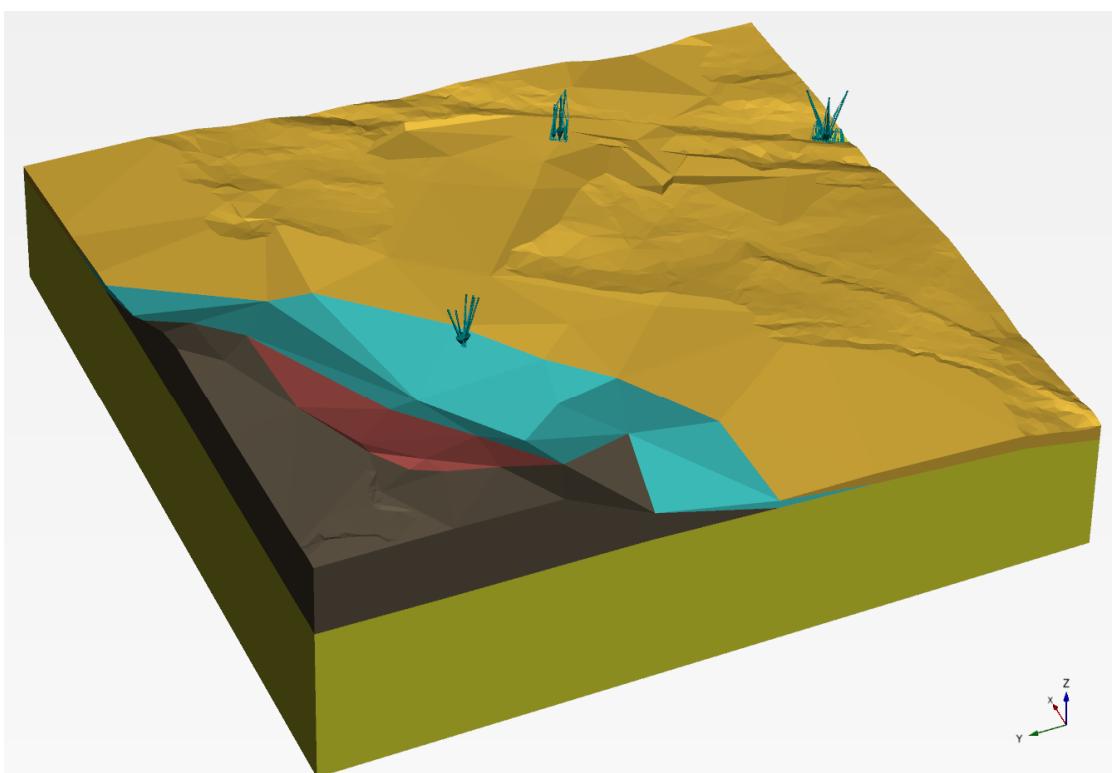
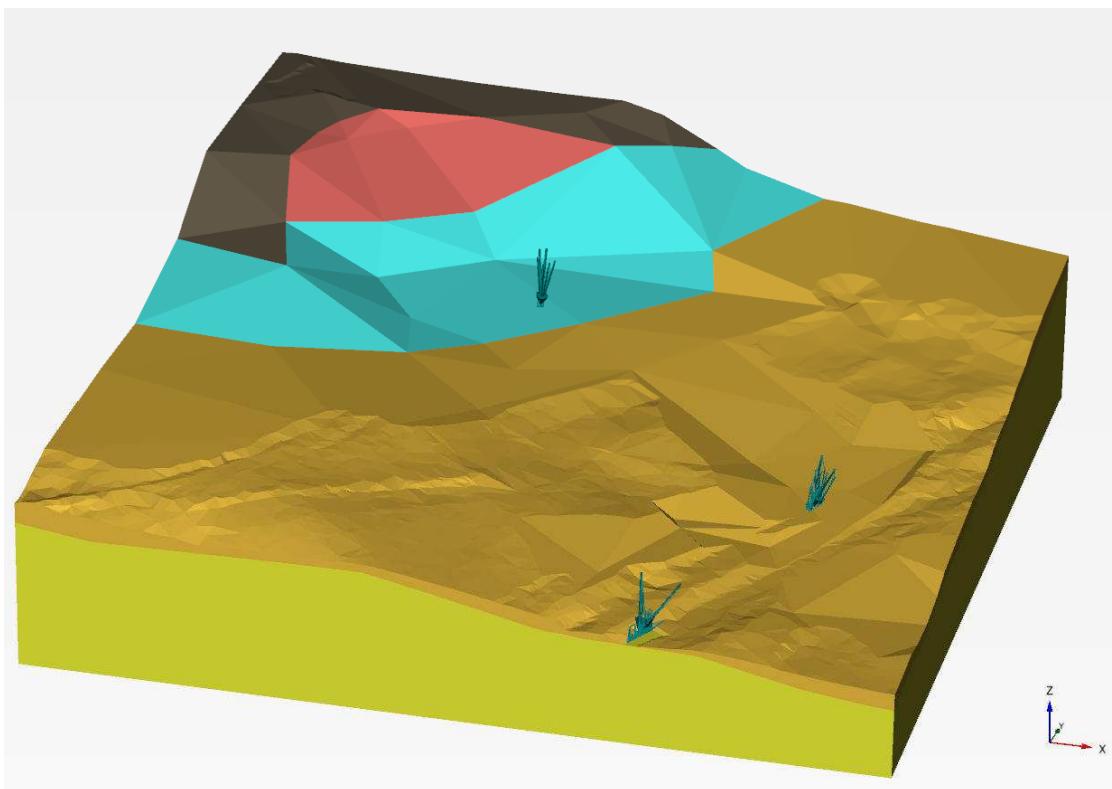
Obrázek 9.26: Pozice jednotlivých vrtů použitých pro sestavení 3D geologického modelu (pohled 4).



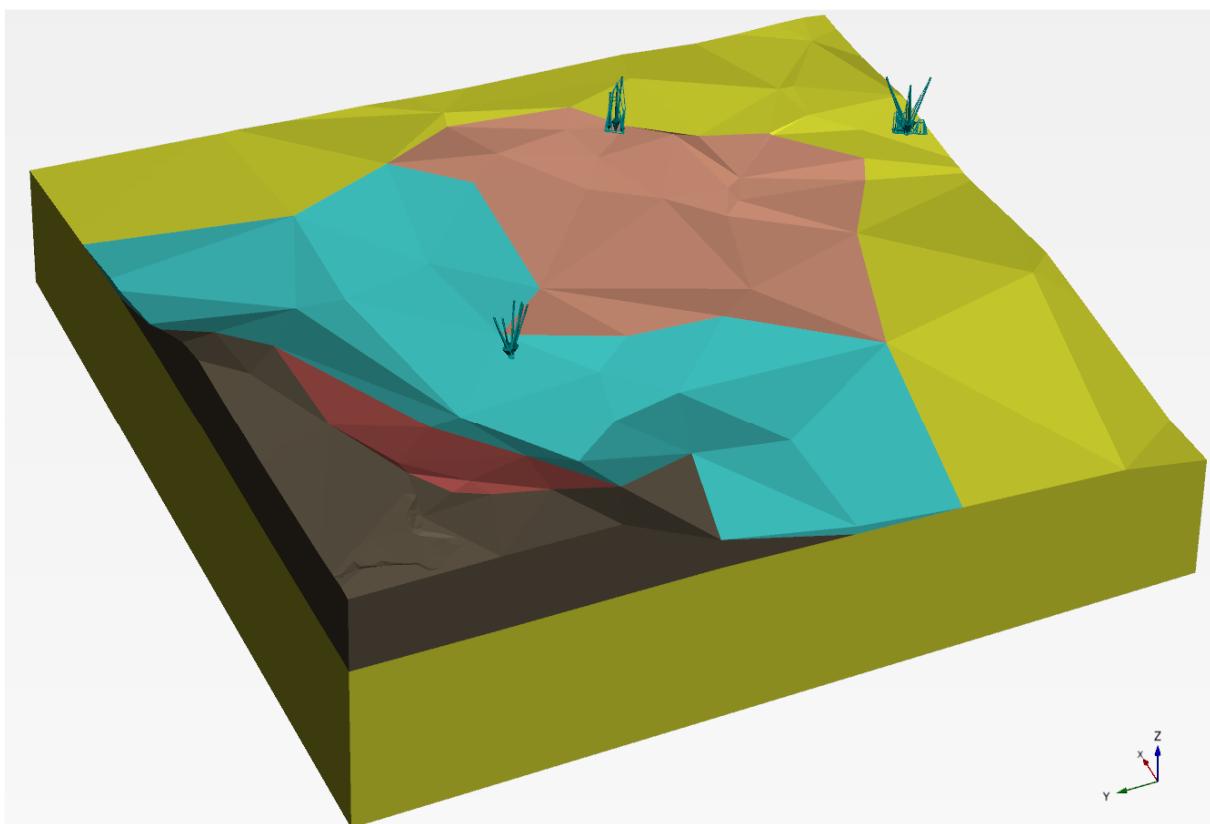
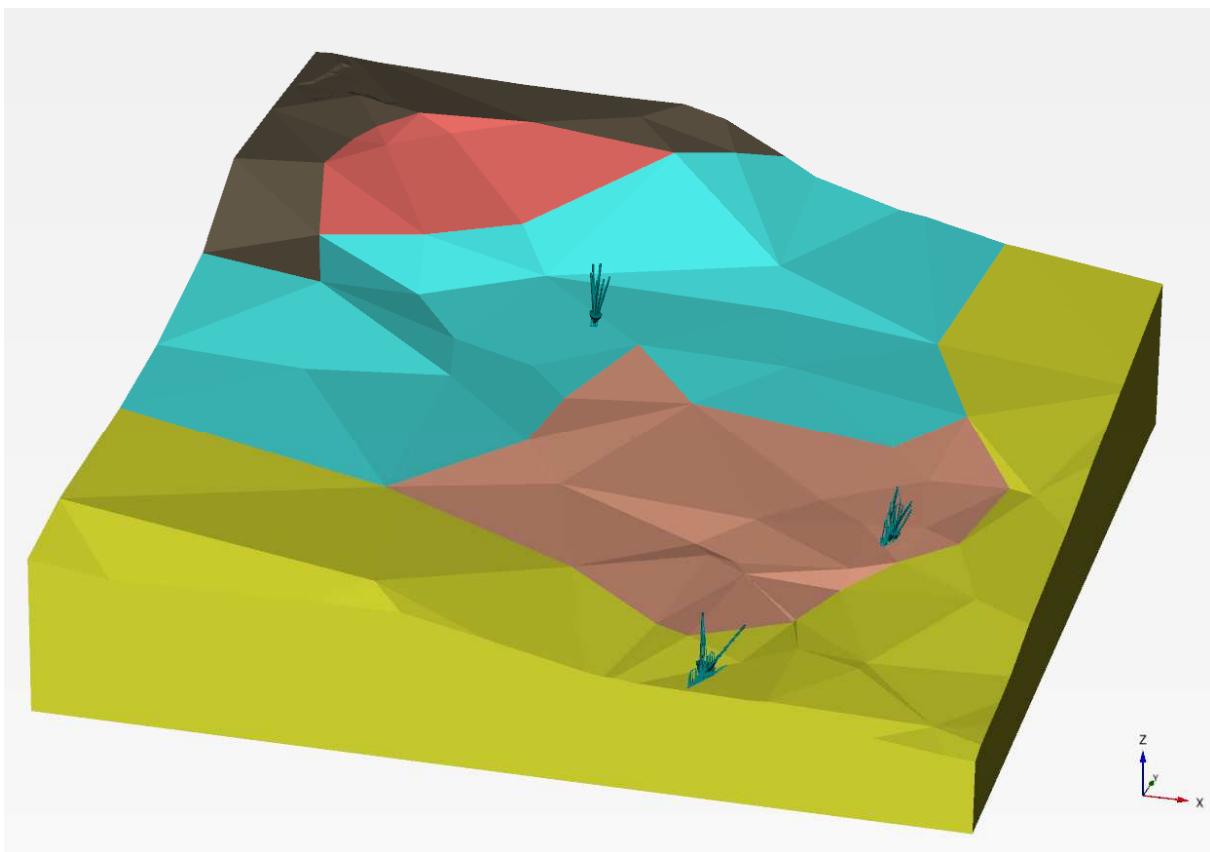
Obrázek 9.27: Kompletní 3D model geologického podloží a terénu. Šipky označují místa výronu podzemní vody na povrch.



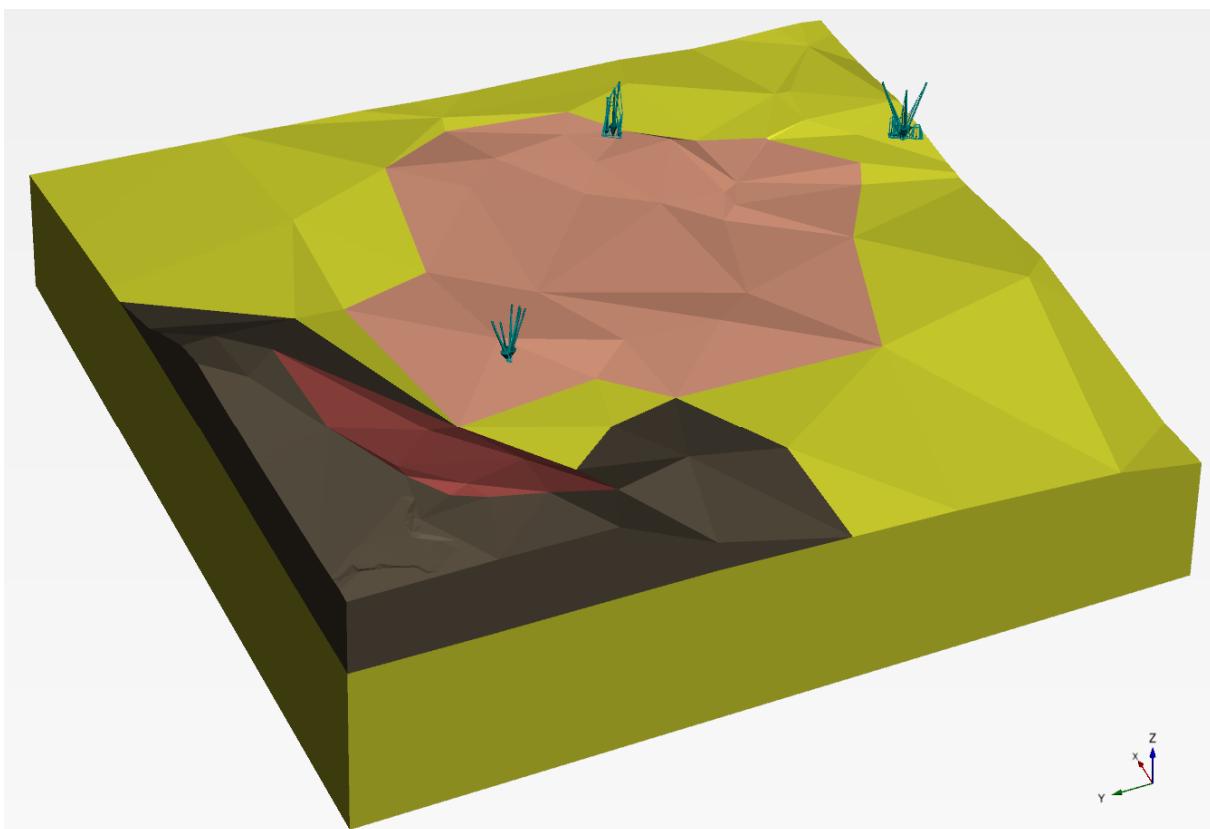
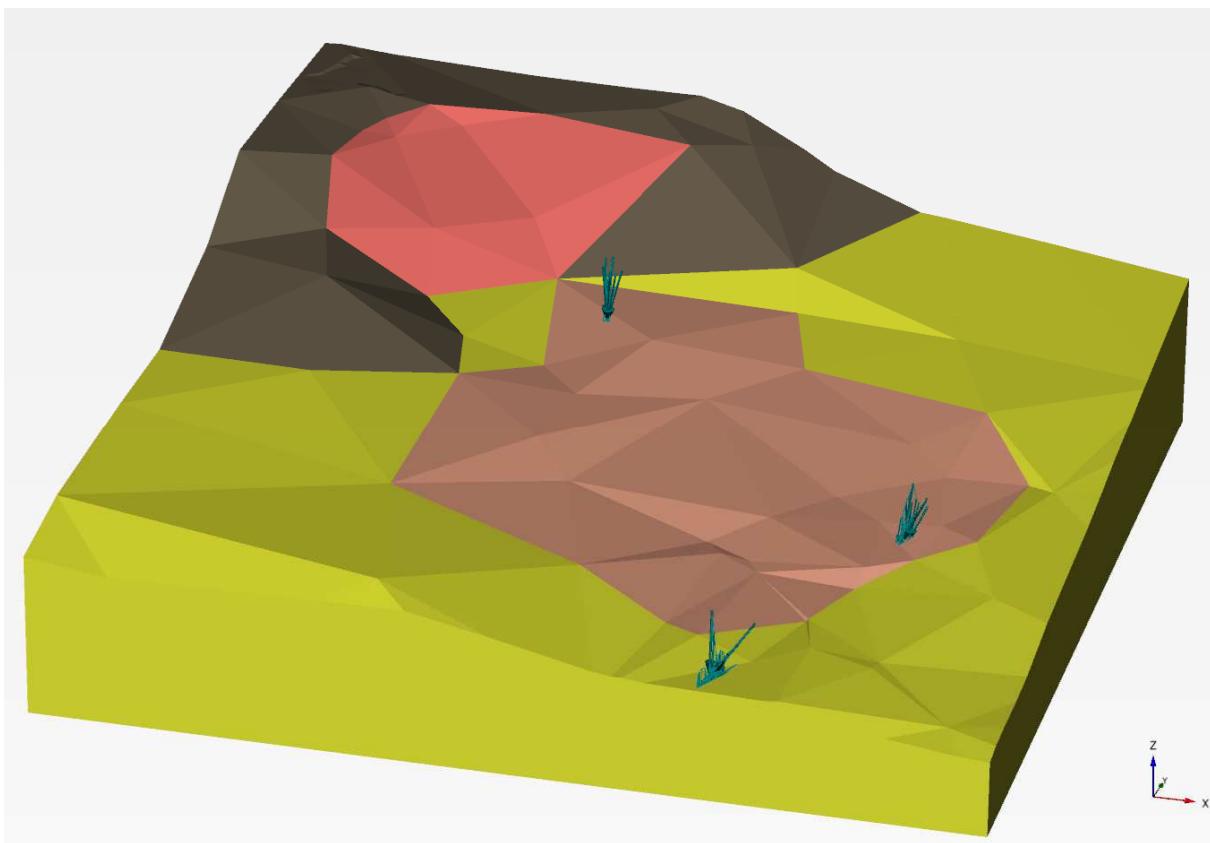
Obrázek 9.28: 3D model geologického podloží po odstranění celku III (výsypky kamenolomu), která pokrývá lomovou etáž a přilehlé svahy, kde nasedá na přirozené deluviaální hlinité sutě.



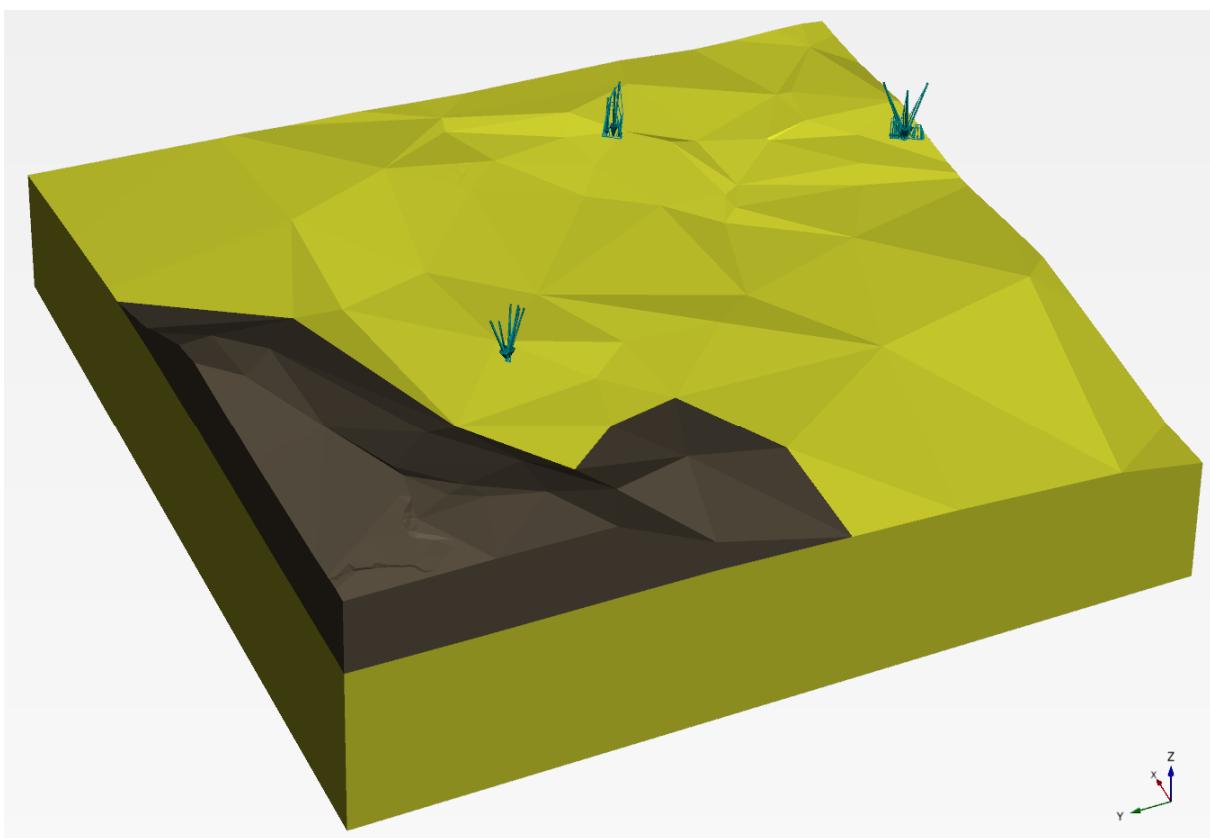
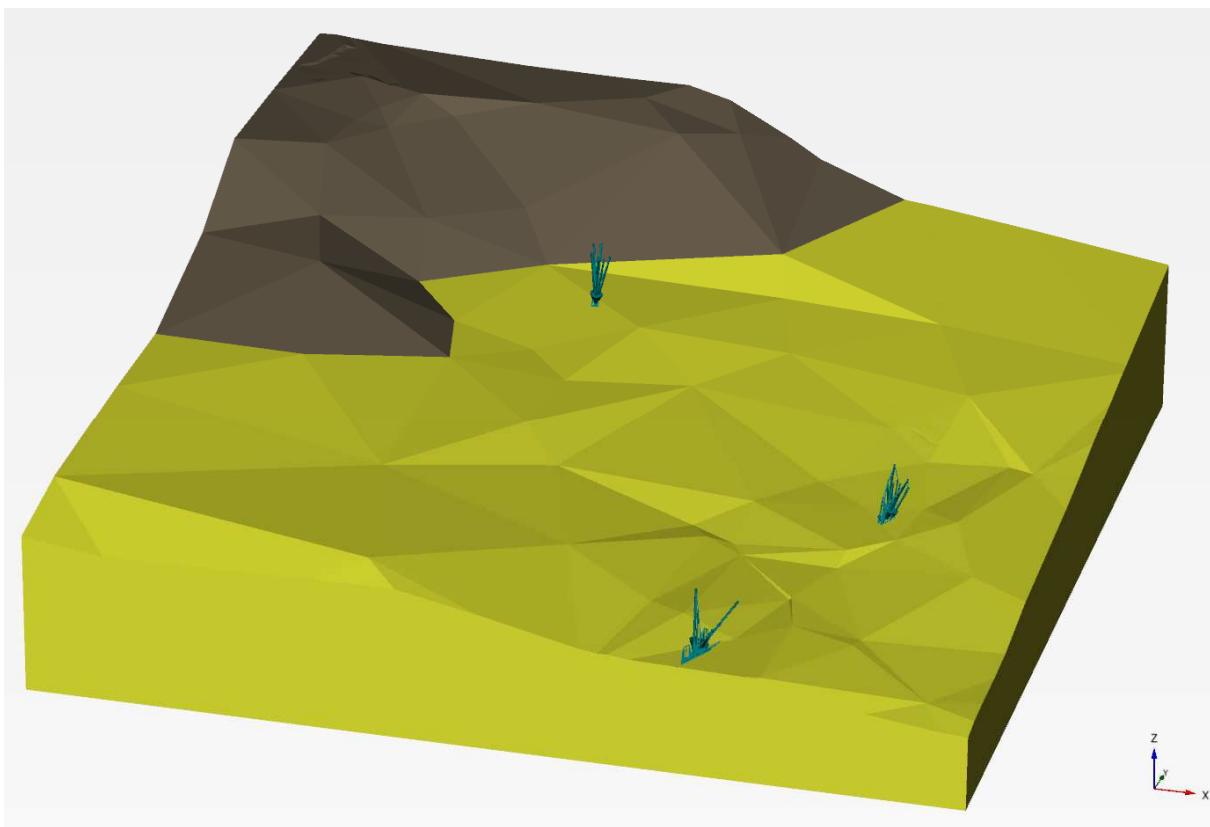
Obrázek 9.29: 3D model geologického podloží po odstranění celků III a II (deluviální sutě). Vrstva deluviálních sutí je nerovnoměrně rozvlečena níže po svahu a tvoří vrstvu nad deluviálními hlínami a zvětralým slínovcem. Při patě svahu se obnažují vrstvy vulkanoklastik (tufů) a zvětralých třetihorních jílovců, které jsou vzhledem k nízké mocnosti a obdobným reziduálním pevnostem uvažovány v rámci jednoho kvazihomogenního celku.



Obrázek 9.30: 3D model geologického podloží po odstranění celků III, II a I (deluviaální hliny a zvětralé slínovce). Plně obnažena je vrstva tufů a z velké části již i vrstva zvětralého slínovce s rozvinutou reziduální pevností.



Obrázek 9.31: 3D model geologického podloží po odstranění celků III, II, I a V (tufy a jílovce v reziduálních pevnostech). Plně obnažená je vrstva slínovce v reziduální pevnosti a vrstva kontaktu deluviálních a lomových sutí s bazaltovým tělesem.



Obrázek 9.32: 3D model geologického podloží po odstranění všech celků s výjimkou materiálu uvažovaného v modelu jako skalní podklad - celek IV (bazalt) a VI (slínovec).

## 9.6 3D modely - Parametrické studie

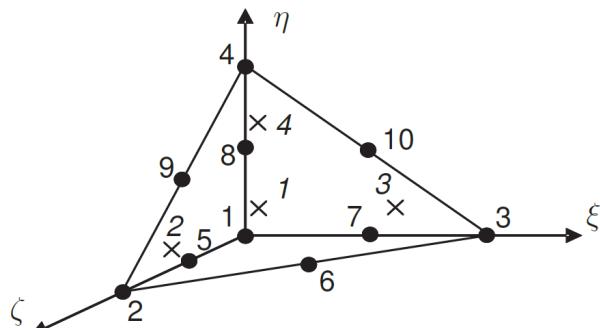
Modely metody konečných prvků zohledňují realitu komplexním způsobem a existuje celá řada výpočtových parametrů, které mohou potenciálně ovlivnit výsledky výpočtu. Tyto parametry přitom nemají přímou souvislost s hledaným výsledkem (stupeň stability svahu) a je proto záhadno jejich vliv na výsledek eliminovat. Protože není možné vliv těchto parametrů studovat analyticky, je třeba přistoupit k parametrickým studiím. V rámci řešeného problému se parametrické studie provedly zejména pro určení:

1. Vlivu hustoty sítě metody konečných prvků na výsledky výpočtu
2. Vlivu elastických parametrů jednotlivých materiálů na výsledky výpočtu
3. Vlivu nastavení iterační chyby ve fázi redukce smykové pevnosti na výsledky výpočtu
4. Vlivu způsobu aplikace metody povrchové vrstvy na výsledky výpočtu

Většina těchto parametrických studií byla provedena před dokončením experimentálního programu, proto se použily předběžné hodnoty parametrů pro jednotlivé vrstvy. Dále i geometrie řešené oblasti a geologického podloží byla ještě v průběhu výstavby modelu zpřesňována. Nelze tedy interpretovat výsledné hodnoty výpočtu, je pouze možné vzájemně porovnávat výsledky v rámci jednotlivých parametrických studií. V následujících kapitolách jsou výsledky těchto parametrických studií podrobněji popsány.

### 9.6.1 Vliv hustoty sítě

Software Plaxis 3D používá v defaultním nastavení 10-uzlové tetraedrické elementy, zobrazené na obrázku 9.33.



Obrázek 9.33: 10-uzlový tetraedrický element používaný v analýzách

Hustota sítě je kontrolovaná dvěma způsoby:

1. Globálním nastavením „relative element size“
2. Lokálním nastavením pro jednotlivé oblasti („clustery“), kontrolované veličinou nazývanou „local coarseness factor“

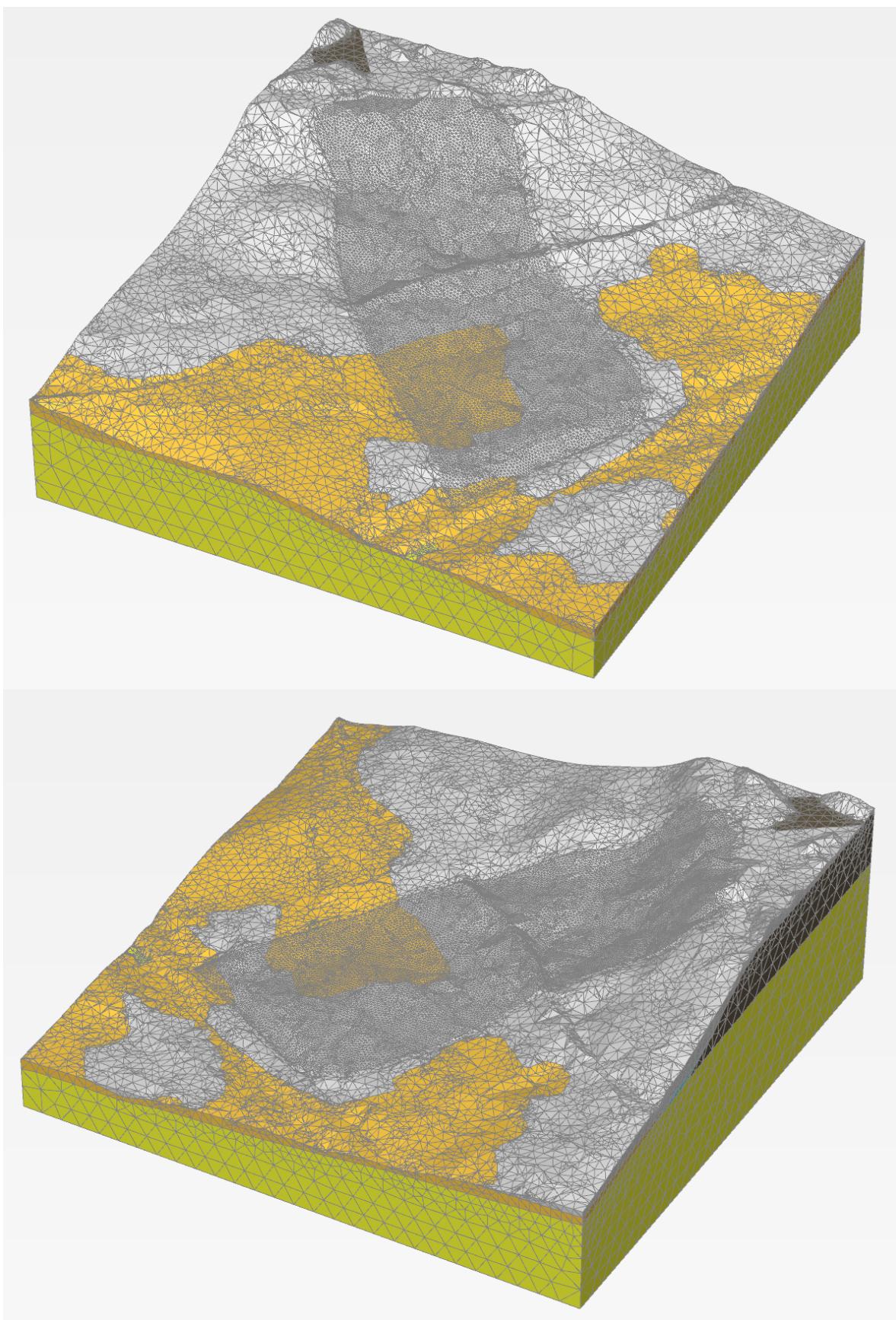
V parametrické studii byla ve všech případech nastavena „relative element size“ na 0,5, což znamená, že se jedná o „velmi jemnou síť“. Dále byl měněn „local coarseness factor“ tělesa sesuvu v následujících hodnotách: 0,14; 0,18; 0,2; 0,3; 0,5. Výsledné sítě měly počet elementů specifikovaný v tabulce 9.7. Pozn: v simulaci s „local coarseness factor“ 0,5 byl tento faktor aplikován na celou síť, v ostatních případech pouze na těleso sesuvu, přičemž zbytek síť byl popsán hodnotou „local coarseness factor“ rovný 1. Jedna analýza pak byla provedena

s hustotou „0,2“ pro těleso sesuvu, přičemž povrch terénu byl popsán hustotou 1 a zbytek geometrie hustotou 2.

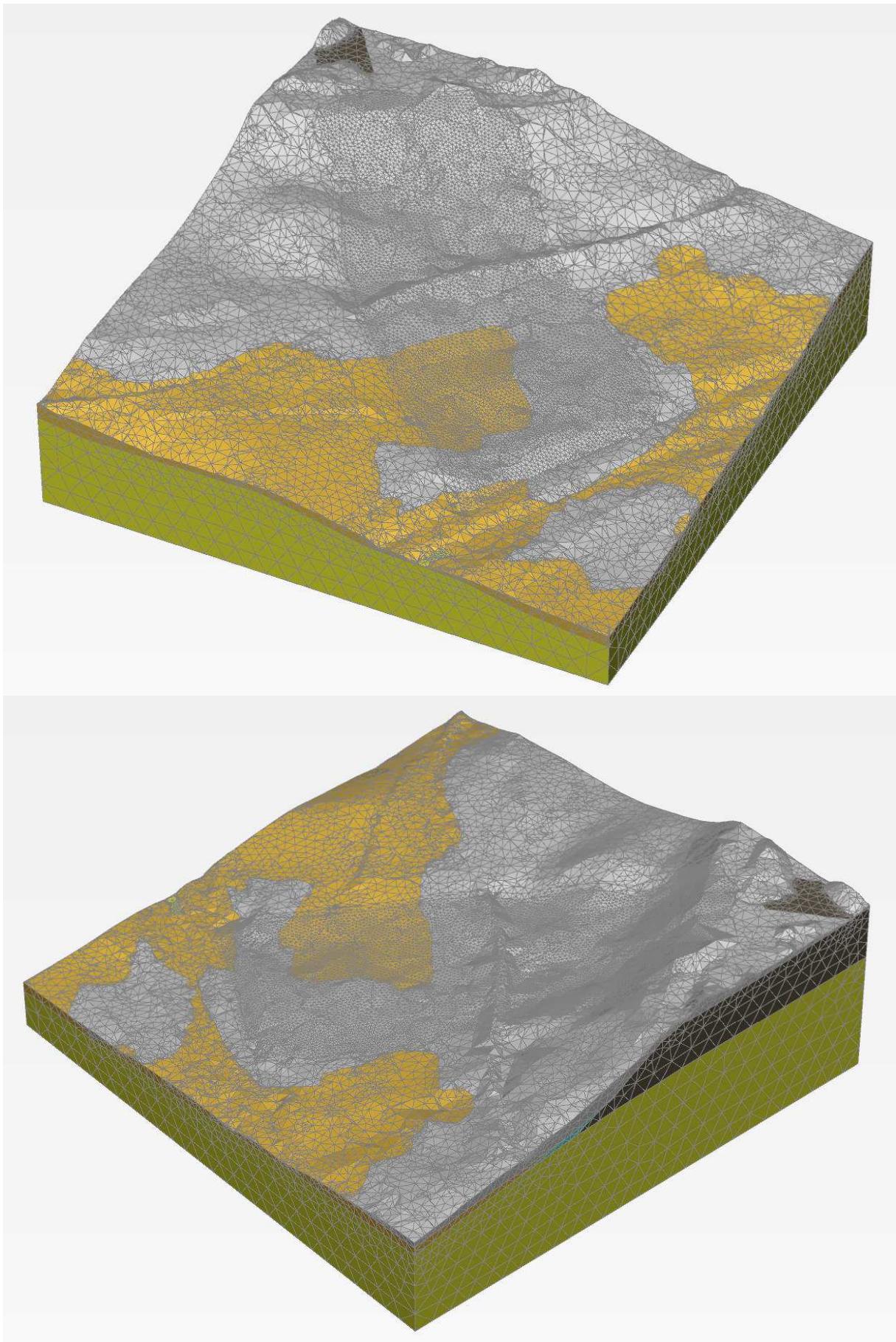
Tabulka 9.7: Počty elementů v celém modelu v parametrické studii pro vliv sítě:

„local coarseness factor“ tělesa sesuvu	Počet elementů v síti	Počet uzelů v síti
0,14	657937	891740
0,18	396376	541405
0,2	337131	461998
0,2, mimo sesuv 2	301411	411443
0,3	211033	292898
0,5 (celá síť)	166311	233112

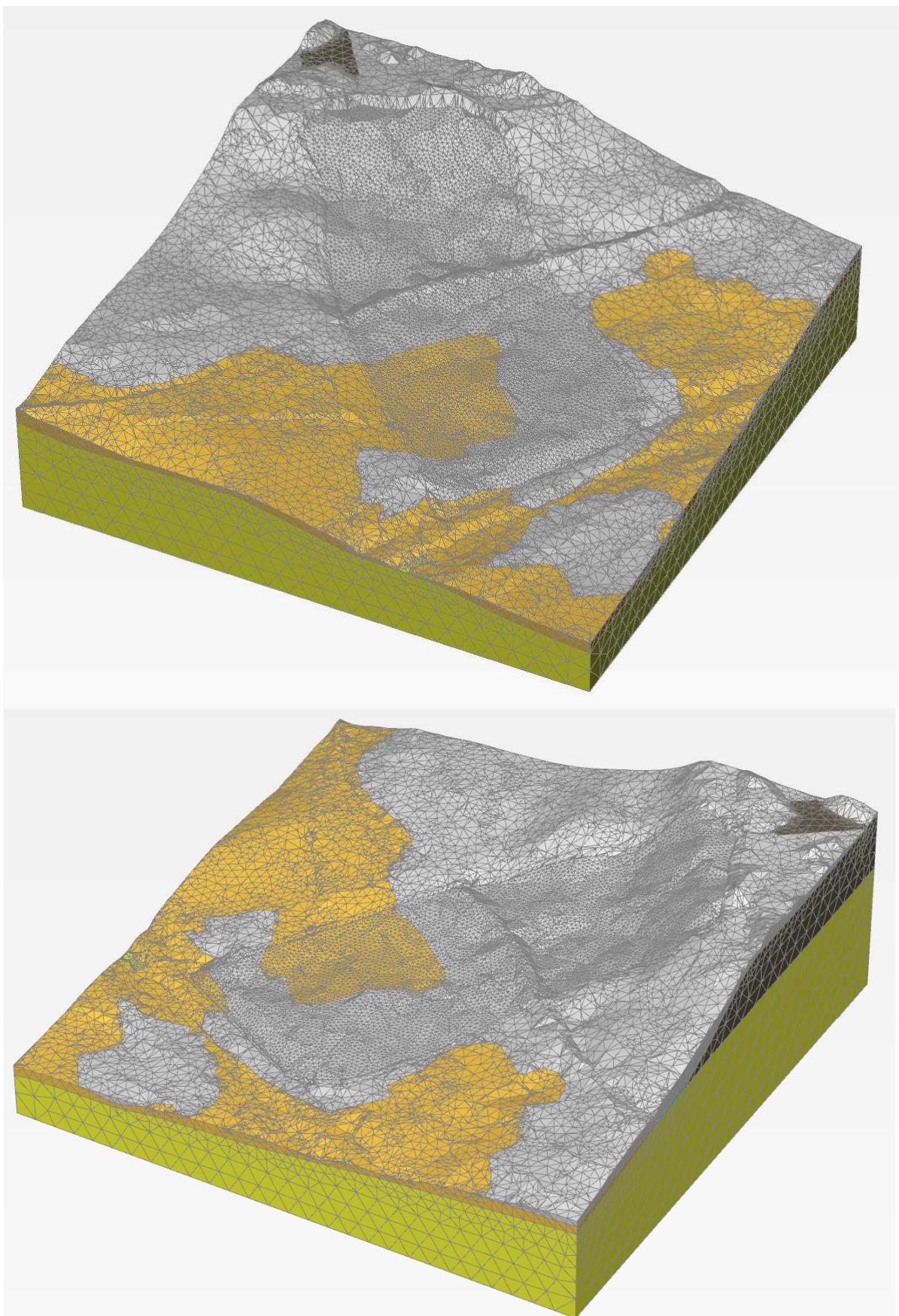
Zobrazení jednotlivých sítí použitých v parametrické studii je na obrázcích 9.34 až 9.39. Sítě s „local coarseness factor“ 0,2 a 0,3 jsou pro ilustraci zobrazeny v deformovaném stavu vzniklém po inicializaci sesuvu.



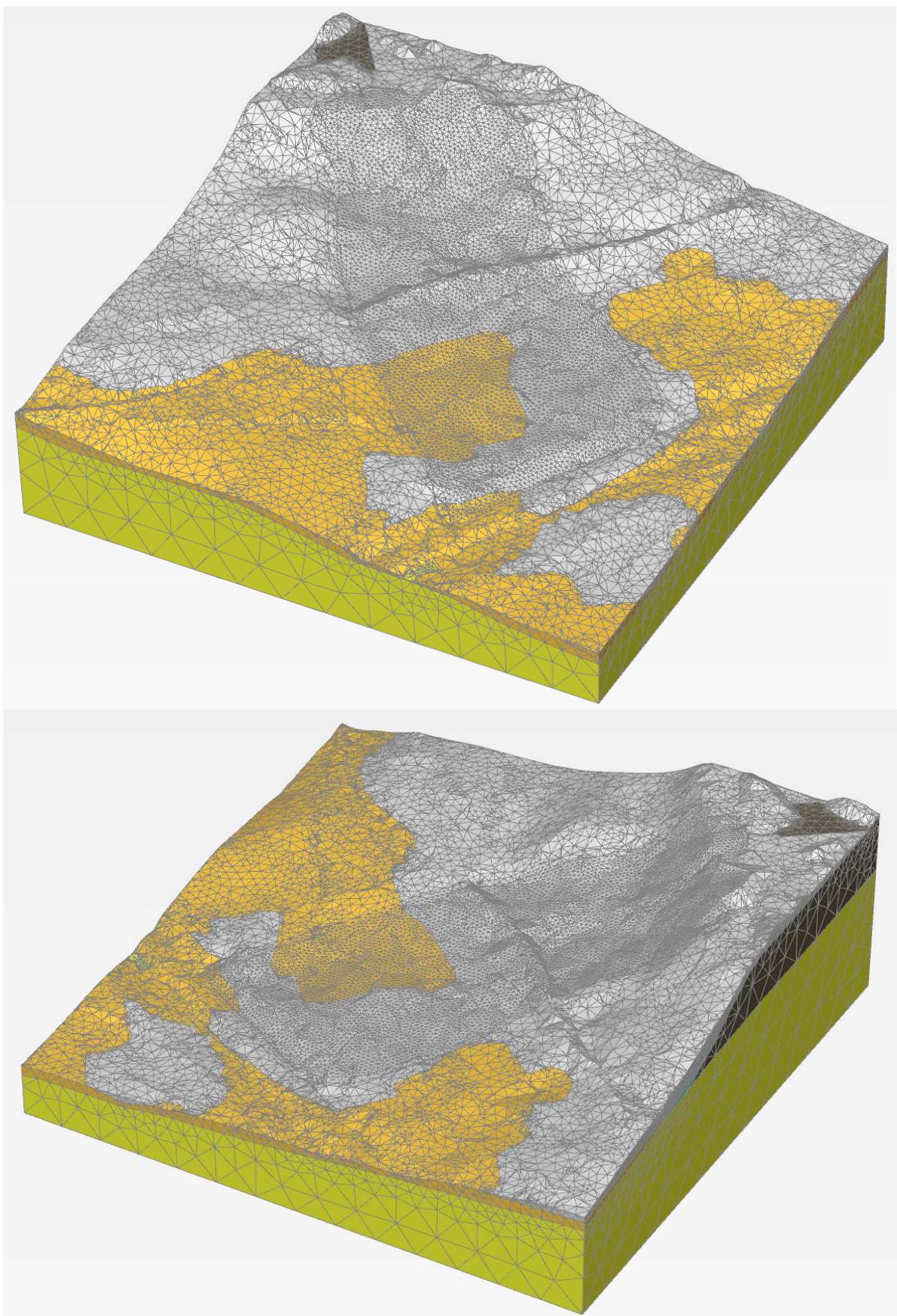
Obrázek 9.34: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ tělesa sesuvu 0,14.



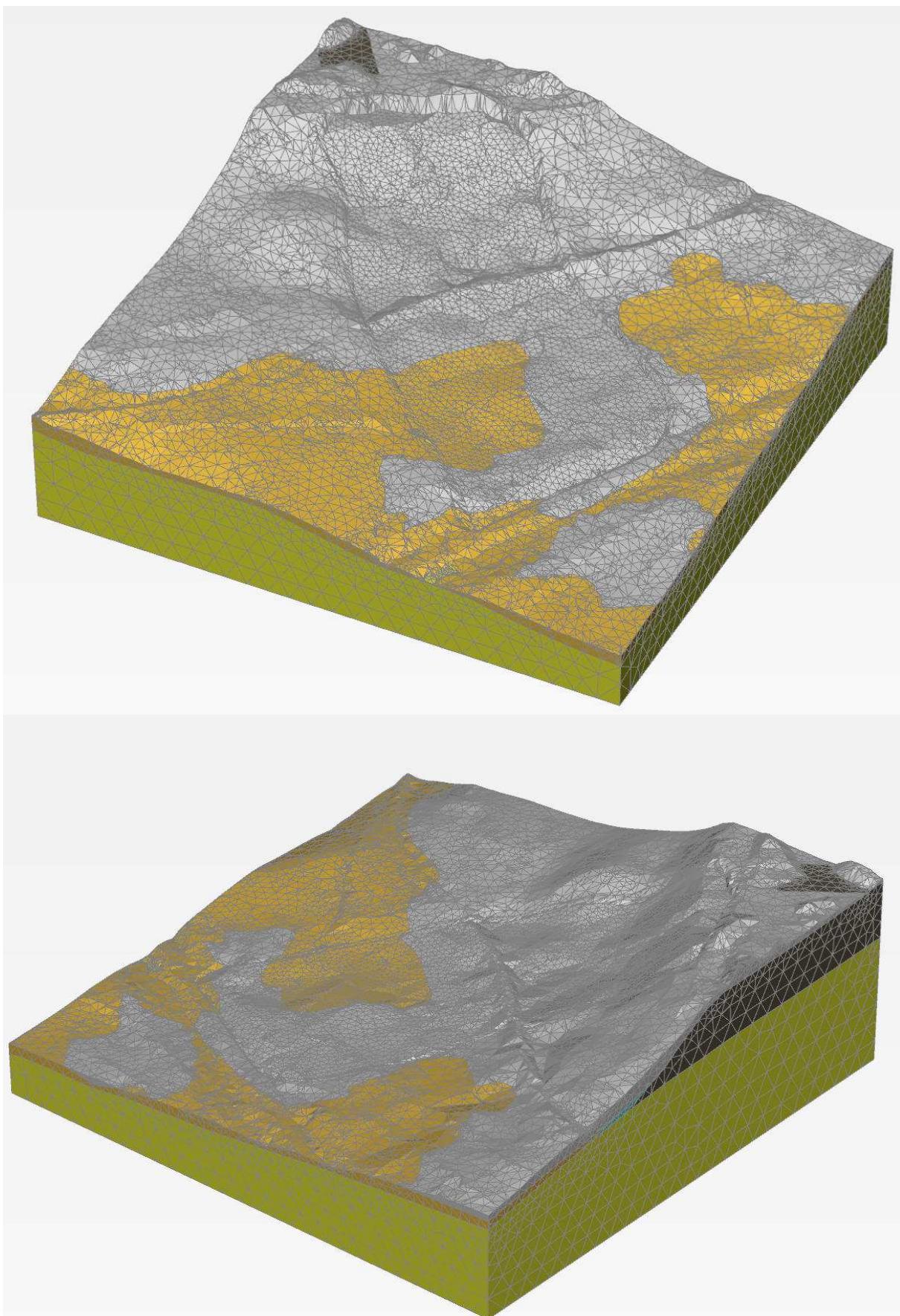
Obrázek 9.35: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ tělesa sesuvu 0,18.



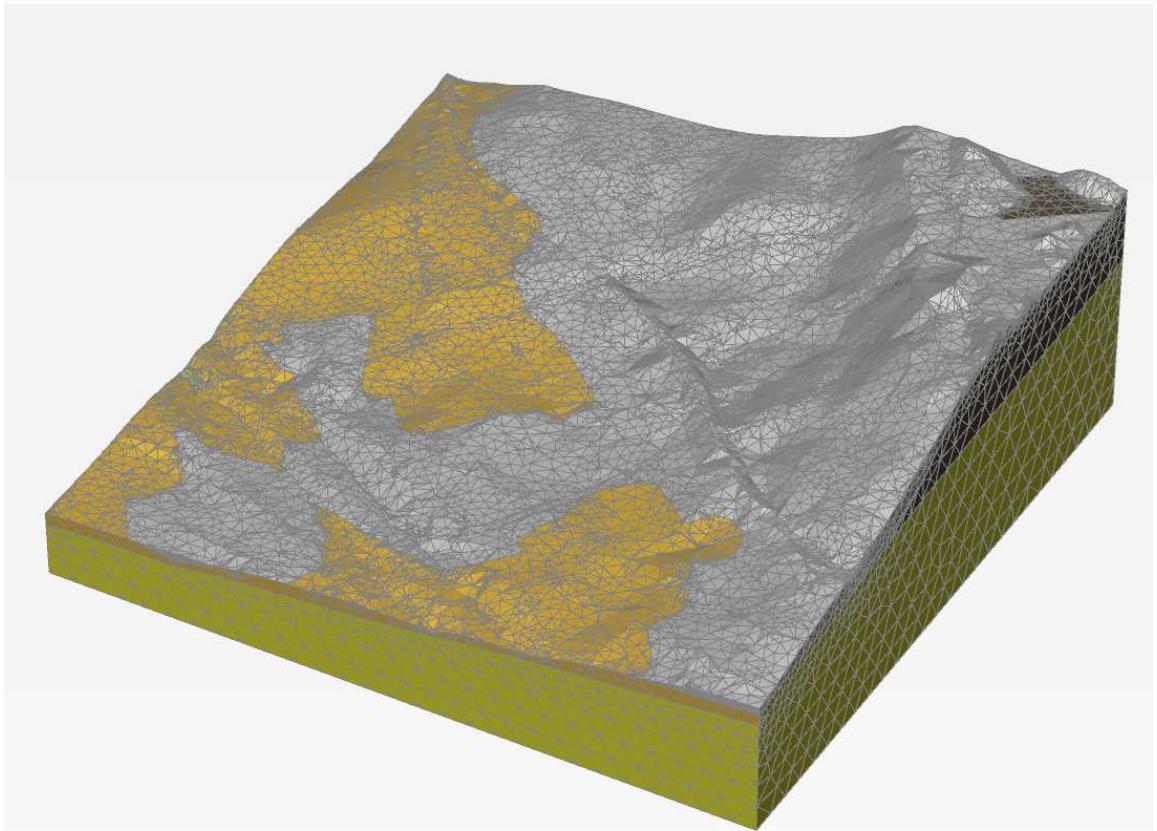
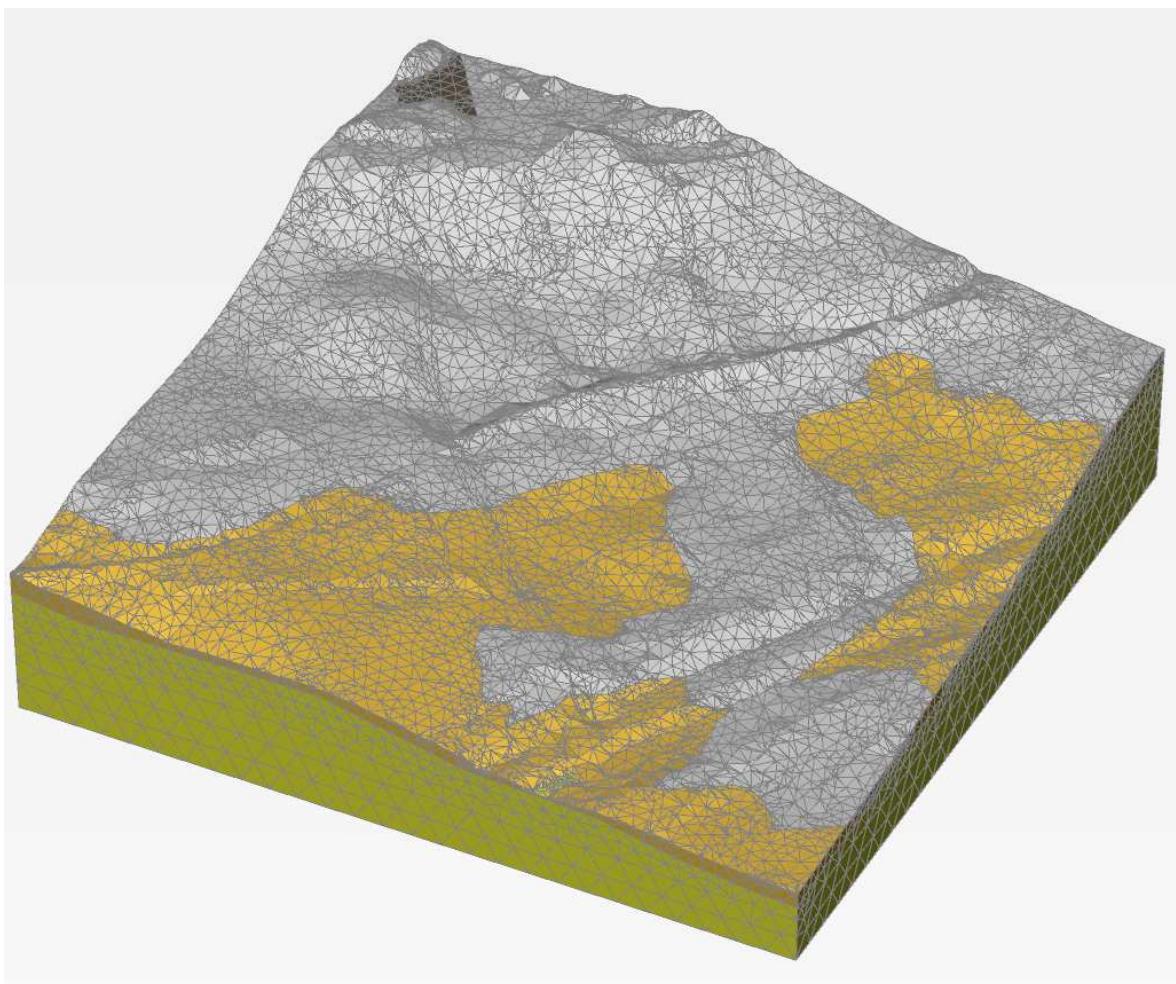
Obrázek 9.36: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ tělesa sesuvu 0,2. Síť je zobrazena v deformovaném stavu s inicializovaným sesuvem.



Obrázek 9.37: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ tělesa sesuvu 0,2. Mimo těleso sesuvu a mimo povrch terénu je síť diskretizována hustotou „2“.

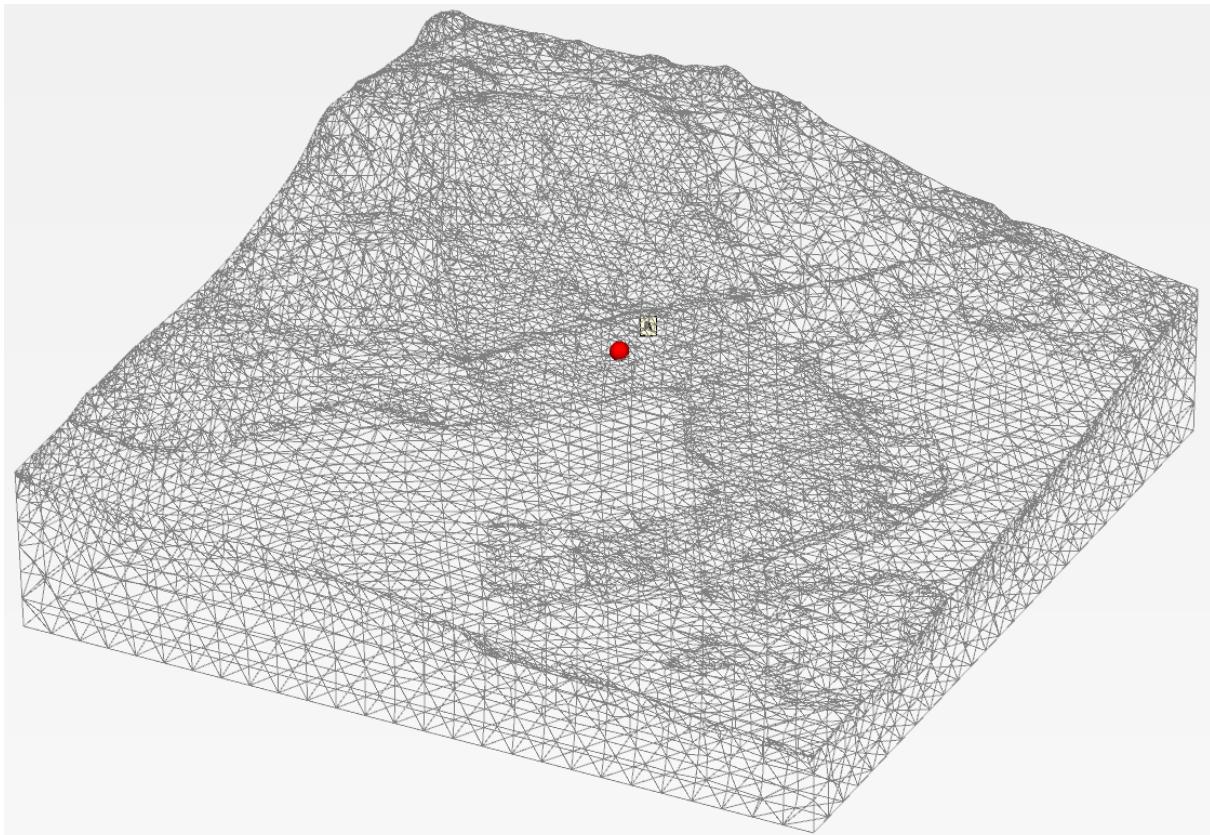


Obrázek 9.38: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ tělesa sesuvu 0,3. Síť je zobrazena v deformovaném stavu s inicializovaným sesuvem.



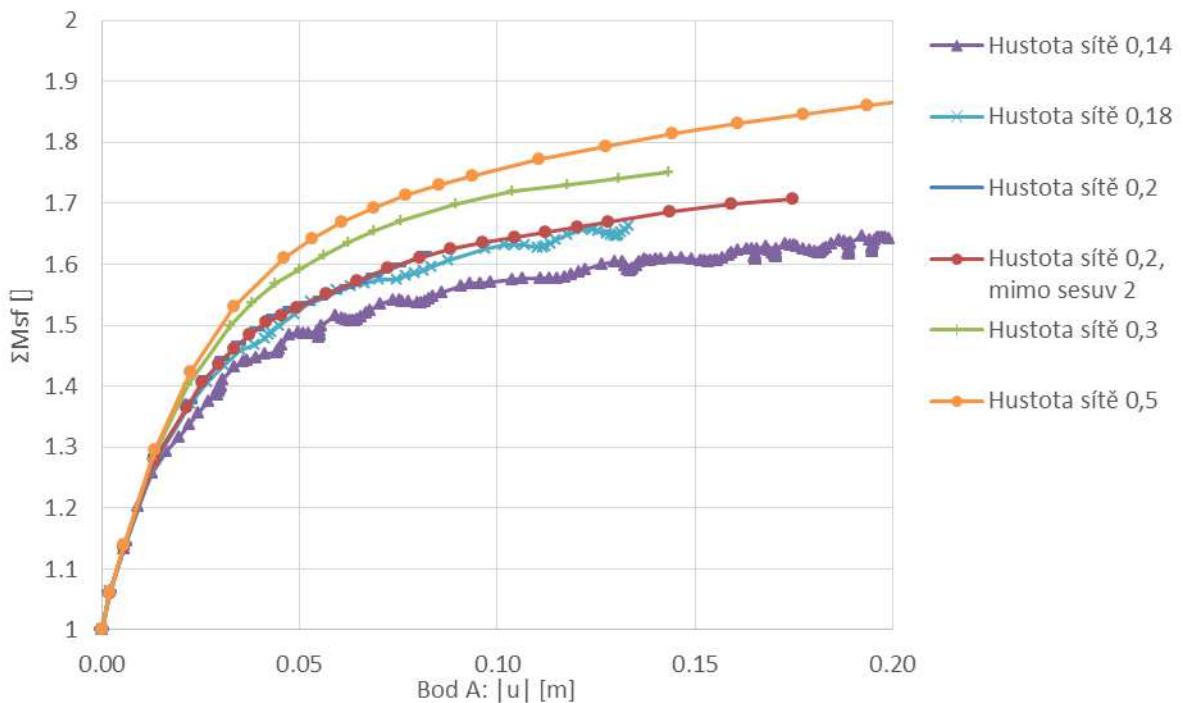
Obrázek 9.39: Dva pohledy na MKP síť s „local coarseness factor“ celé oblasti 0,5.

Vliv hustoty sítě byl studován v rámci analýzy metodou redukce smykové pevnosti s využitím kritických parametrů zemin (včetně smykové plochy). Při analýze byla sledována závislost celkových deformací v bodě „A“ (lokální souřadnice -175,8; -62,8; 325,8) na hodnotě redukčního faktoru MSF. Pozice bodu A v rámci geometrie studované úlohy je zobrazena na obrázku 9.39. Vzhledem k extrémní výpočetní náročnosti úlohy, zejména pro nejjemnější diskretizace, byla analýza prováděna jen v omezeném počtu výpočetních kroků.



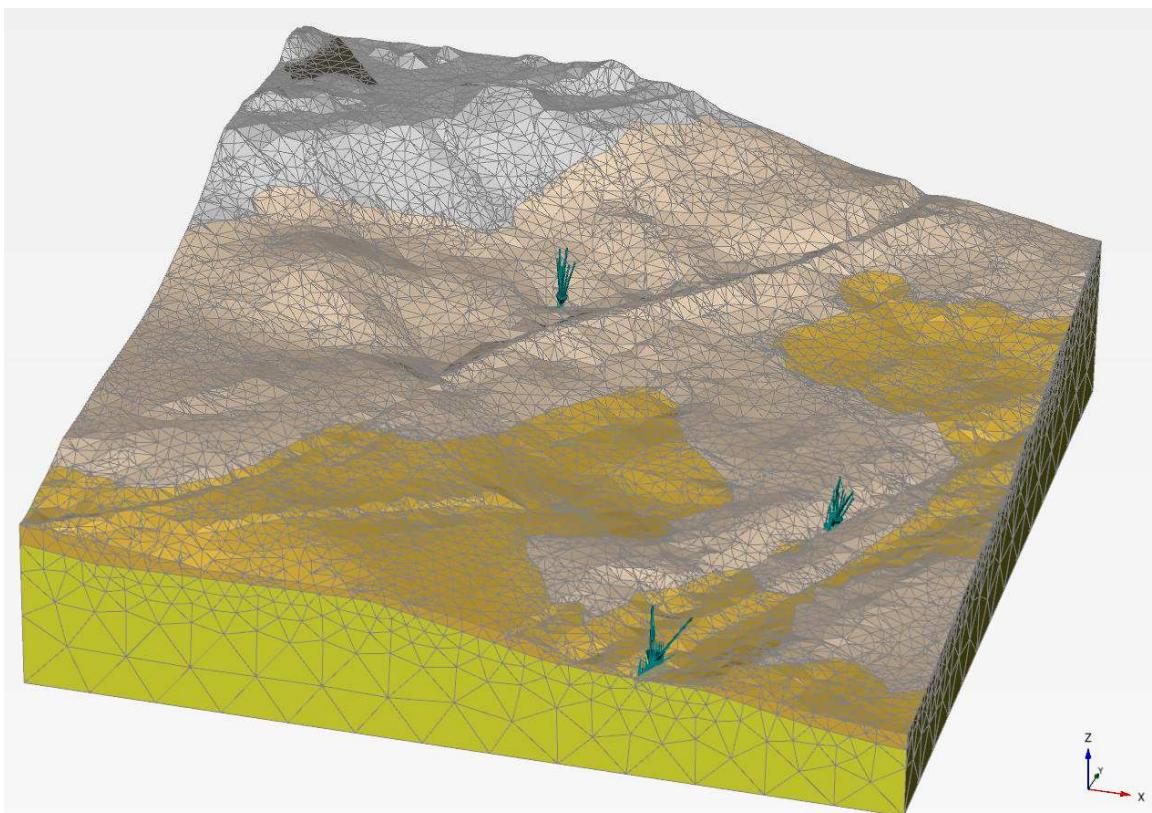
Obrázek 9.40: Pozice bodu A využitého pro analýzu vlivu hustoty sítě na výsledky výpočtu.

Výsledky parametrické studie vlivu hustoty sítě jsou na obrázku 9.41. Z něj je zřejmý všeobecně známý fakt, že vliv hustoty sítě ovlivňuje výsledný stupeň stability získaný MKP výpočtem. Analýzy s nízkou hustotou sítě (zejména analýzy „0,3“ a „0,5“) nadhodnocují výsledný stupeň stability. Se snižující se velikostí elementů se analýza zpřesňuje, nicméně pro velikosti pod „0,2“ se již začíná projevovat vliv numerických nestabilit, křivka závislosti MSF na velikosti deformací  $|u|$  osciluje a automatické iterační schéma je nuceno volit nízký výpočetový krok, což dále zvyšuje výpočetní náročnost úlohy. Je také zřejmé, že hrubší diskretizace stupněm „2“ v oblasti mimo sesuv neovlivňuje výsledky výpočtu.

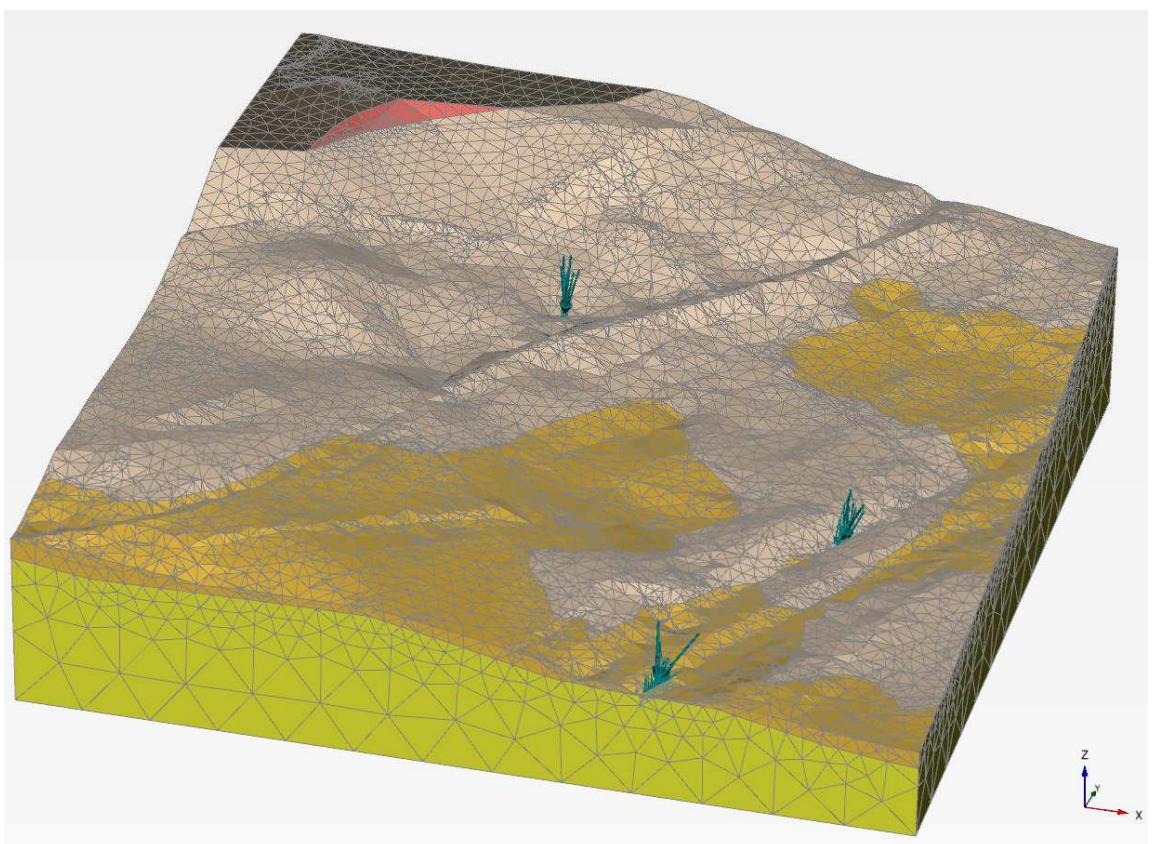


Obrázek 9.41: Křivky závislosti faktoru MSF na celkovém posunu bodu A v parametrické studii vlivu hustoty sítě.

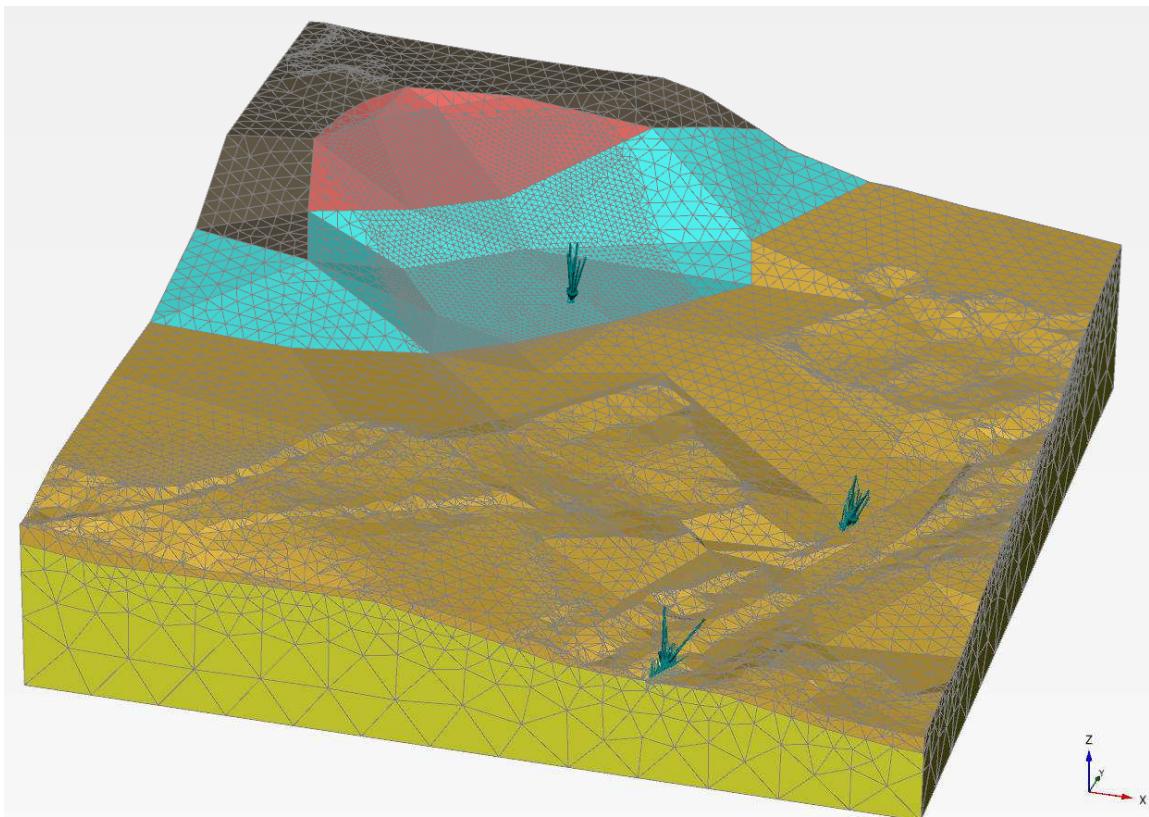
Na základě provedených analýz byla zvolena následující diskretizace, která se jeví jako optimální z hlediska přesnosti a výpočetní náročnosti: smyková zóna je diskretizována hustotou „0,18“, těleso sesuvu mimo smykovou zónu hustotou „0,5“ a oblast mimo těleso sesuvu hustotou „2“. Velikost výsledných sítí závisí na řešené konfiguraci (více detailů viz kapitola 9.7), přičemž základní model má 278677 elementů, 381192 uzelů a analýza jednoho modelu s 200 kroky metody redukce smykové pevnosti trvá cca 5 hodin na moderním PC s procesorem Intel i7-3930 s šesti výpočetními jádry taktovanými na 3,2 GHz a 32 GB operační paměti. Výsledná síť pro jednotlivé geologické vrstvy je na obrázcích 9.42 až 9.47.



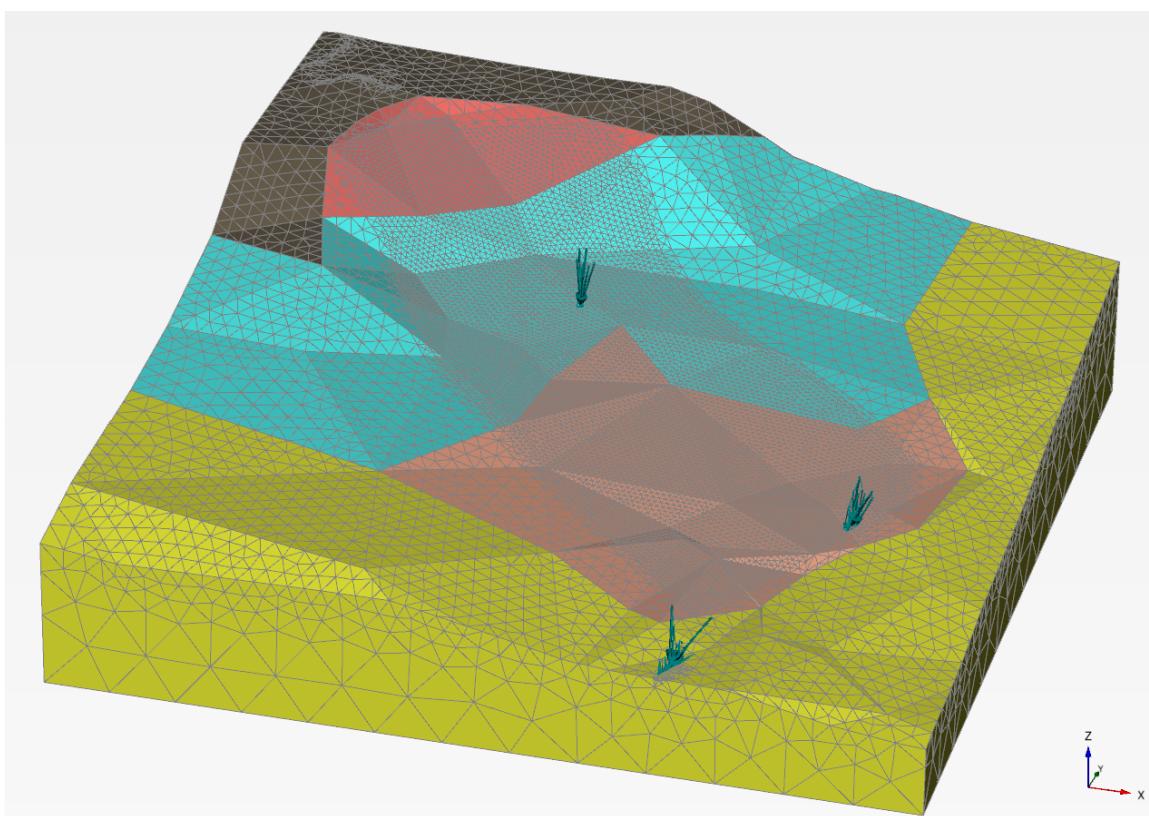
Obrázek 9.42: Výsledná síť pro základní analýzu A, povrch terénu.



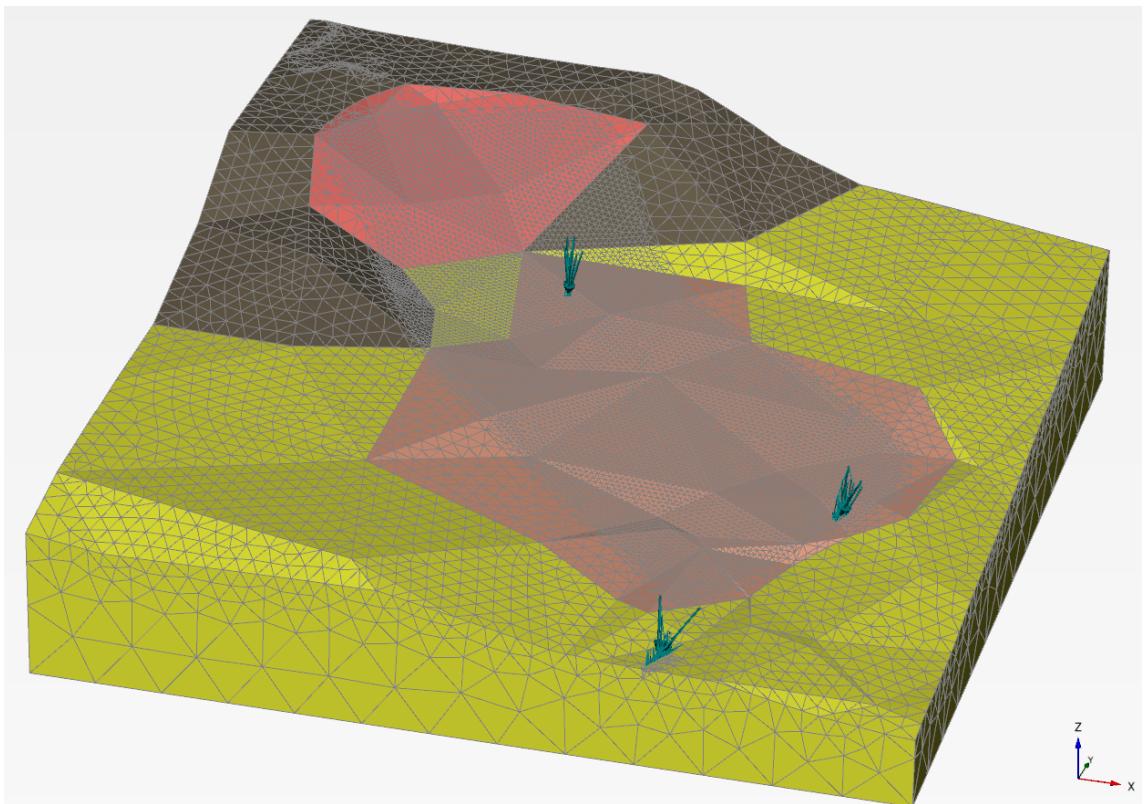
Obrázek 9.43: Výsledná síť pro základní analýzu A po odstranění sutí výsypky kamenolomu.



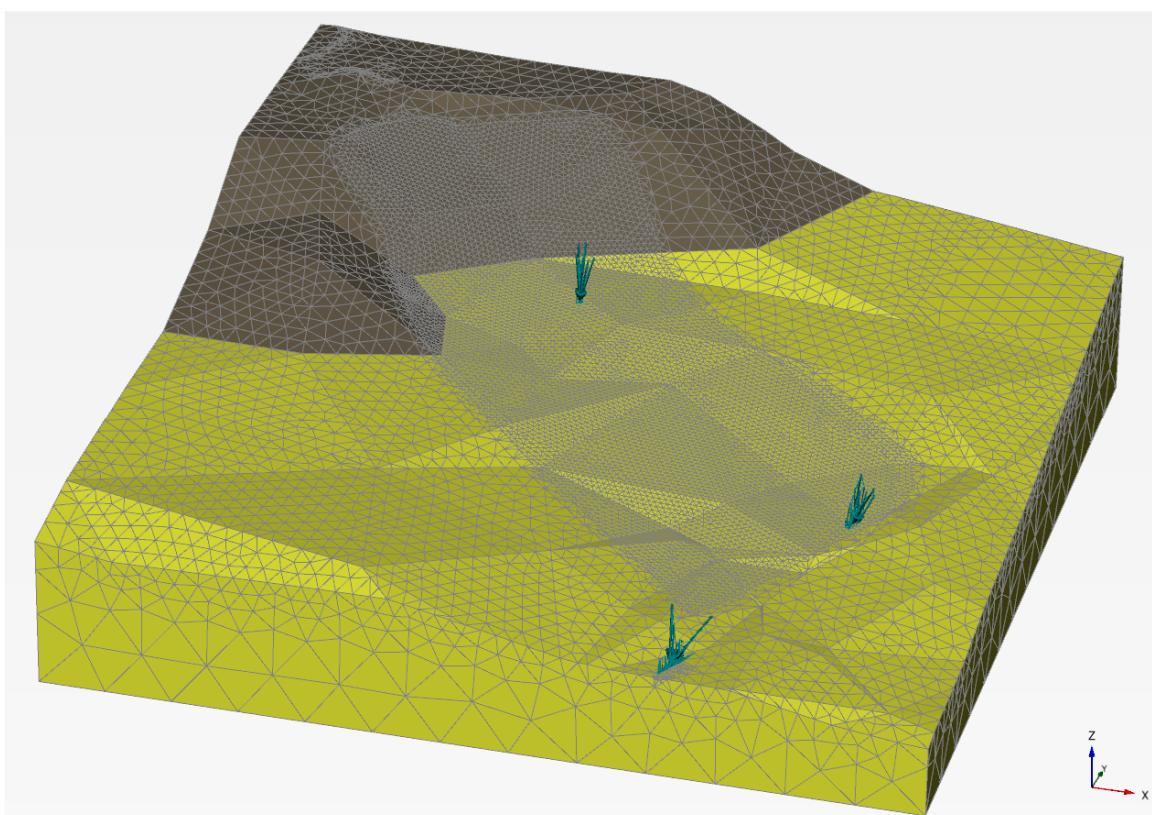
Obrázek 9.44: Výsledná síť pro základní analýzu A po odstranění sutí výsypky kamenolomu a deluviálních sutí.



Obrázek 9.45: Výsledná síť pro základní analýzu A po odstranění sutí výsypky kamenolomu, deluviálních sutí a deluviálních hlín. Zřejmá je jemnější diskretizace smykové plochy.



Obrázek 9.46: Výsledná síť pro základní analýzu A po odstranění sutí výsypky kamenolomu, deluviálních sutí, deluviálních hlín a tufů.



Obrázek 9.47: Výsledná síť pro základní analýzu A, skalní podklad.

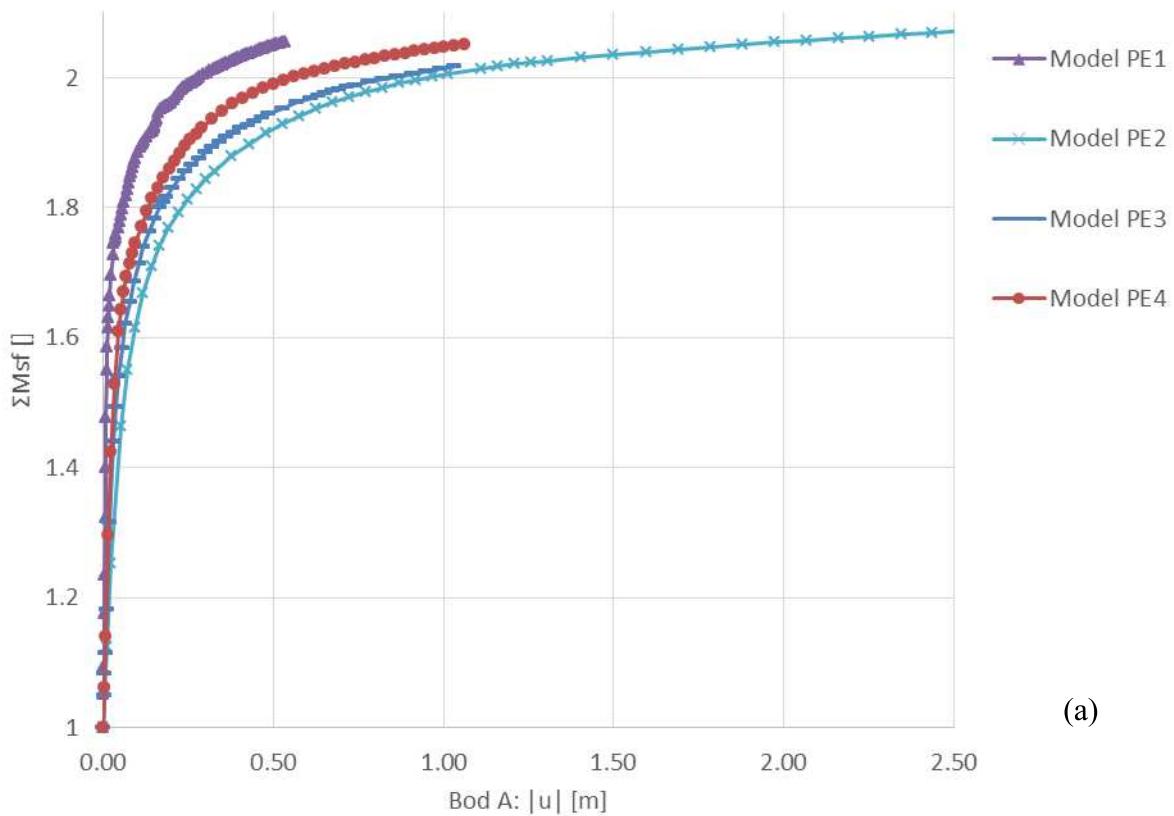
### 9.6.2 Vliv elastických parametrů

Vliv elastických parametrů byl studován s pevnostními parametry odpovídajícími odhadu kritických parametrů a s hustotou síťe „0,5“ popsanou v předchozí kapitole. V různých kombinacích se měnil Youngův modul deluviálního pokryvu a povrchové vrstvy. Testovaly se čtyři scénáře shrnuté v tabulce 9.8. Poissonovo číslo bylo zadáno fixně jako 0,1 pro skalní podloží a povrchovou vrstvu a 0,2 pro deluviální pokryv. Youngův modul skalního podloží byl ve všech případech uvažován 200 MPa.

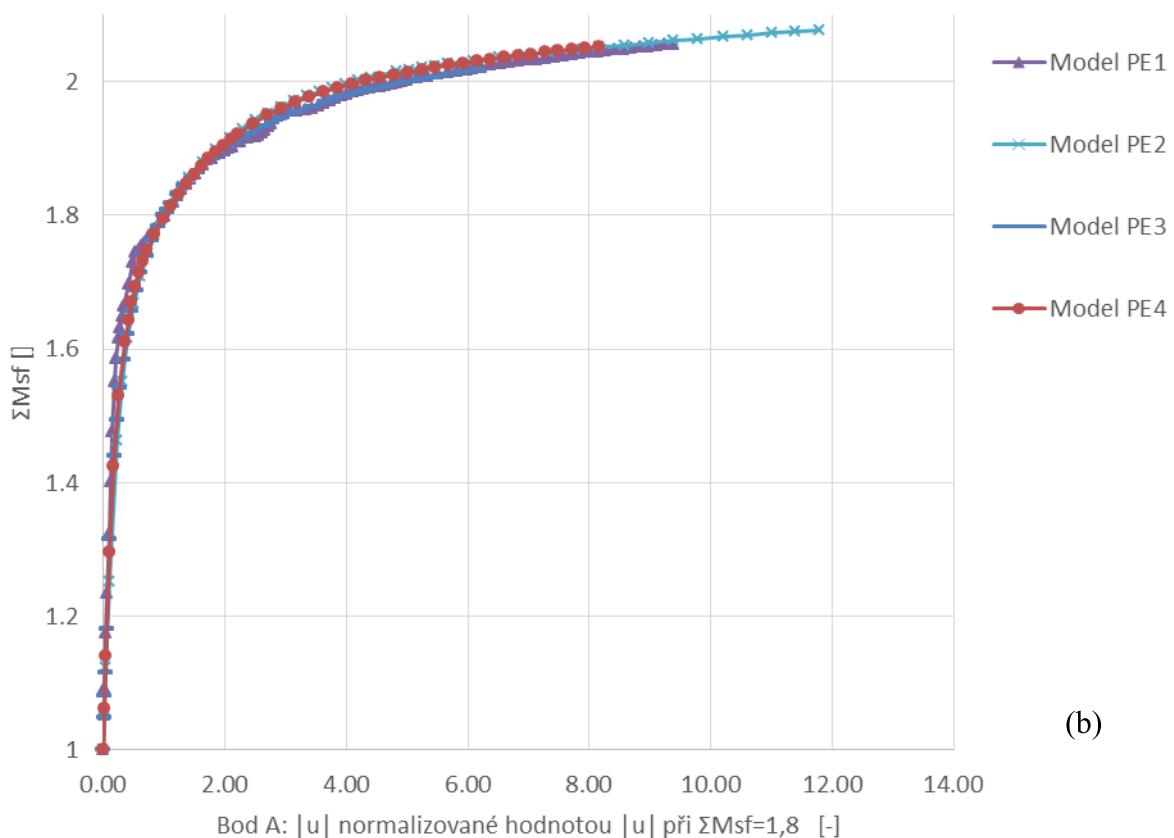
*Tabulka 9.8: Čtyři scénáře využité při testování vlivu tuhosti na výsledky výpočtu. Tabulka udává hodnoty Youngova modulu v MPa.*

	Deluvia	Povrchová vrstva
Model PE1	100	1000
Model PE2	10	100
Model PE3	20	20
Model PE4	20	200

Lze očekávat, že tuhosti jednotlivých vrstev ovlivní vypočtenou hodnotu deformací odpovídající danému stupni redukce smykových parametrů MSF. Protože tato hodnota není předmětem analýzy (studována je maximální hodnota MSF, nikoliv deformace, které jí odpovídají), jsou výsledky analýzy vlivu elastických parametrů prezentovány dvěma způsoby. Prvním je graf závislosti celkových posunů v bodě A na hodnotě MSF. Ve druhém případě, pro přímé srovnání křivek, je hodnota  $|u|$  v bodě A normalizována hodnotou  $|u|_0$ , která odpovídá  $MSF=1,8$ . Tyto grafy jsou v obrázku 9.28. Obrázky 9.49 a 9.50 pak zobrazují rozložení celkových deformací pro analýzy PE3 a PE4.

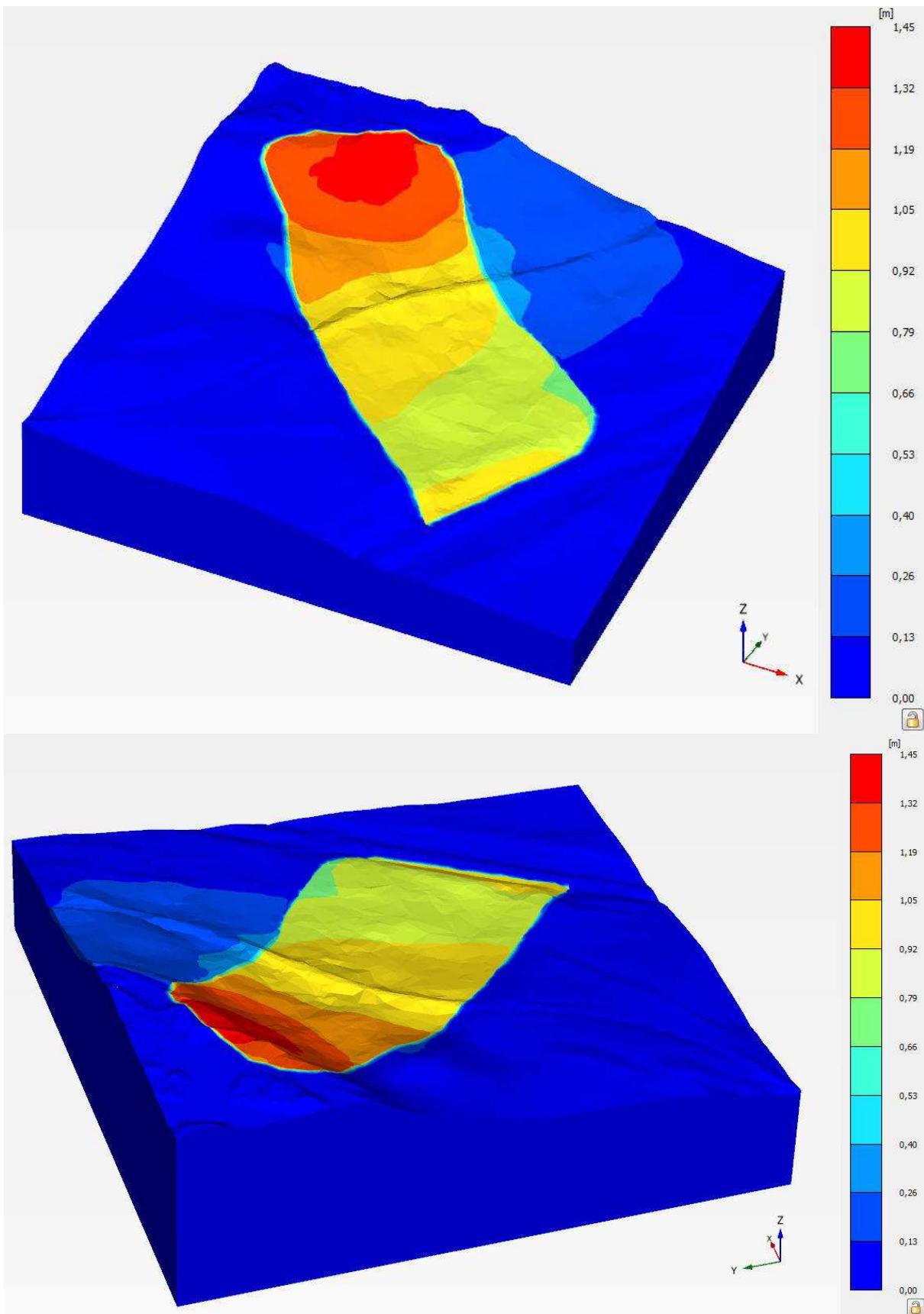


(a)

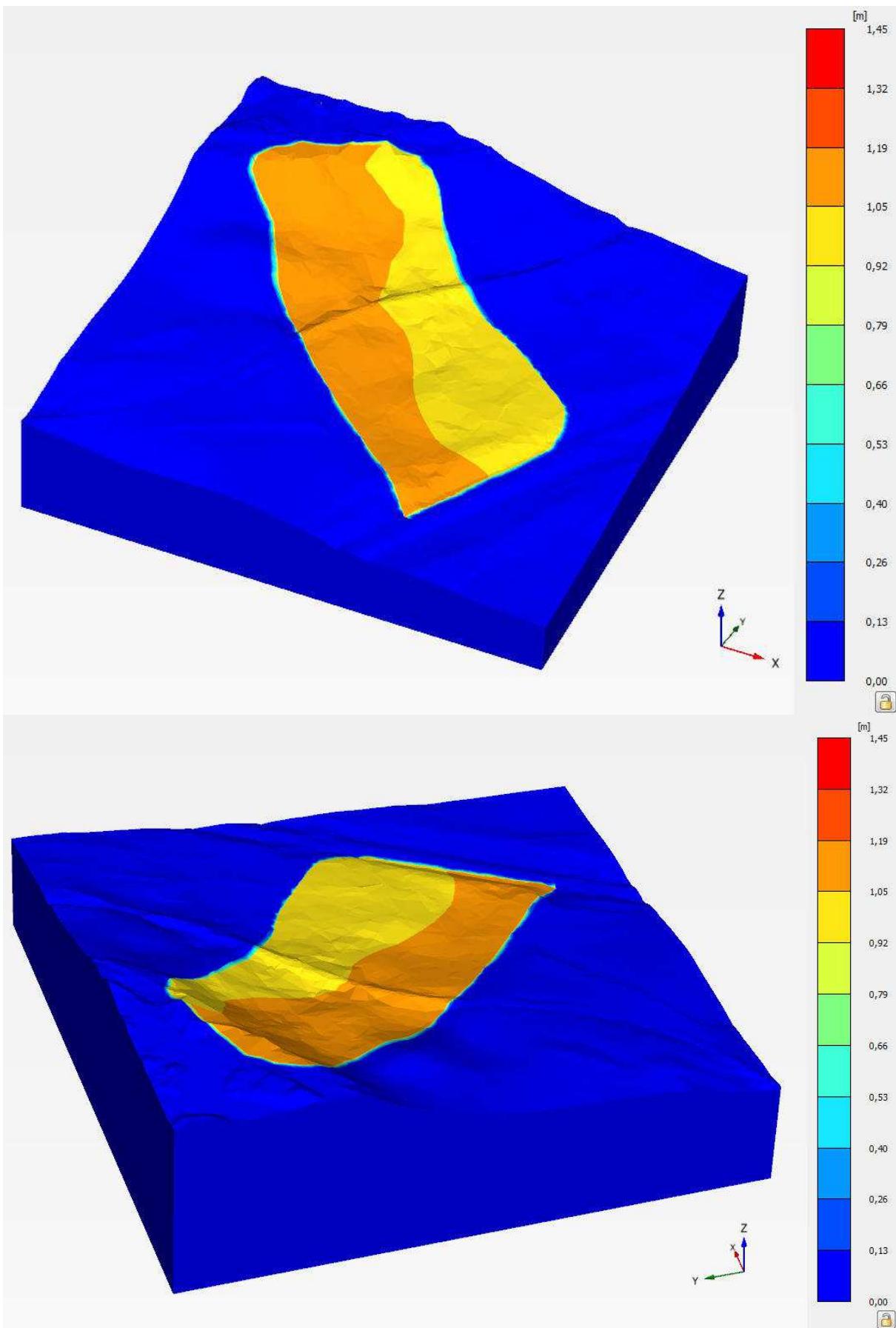


(b)

Obrázek 9.48: Výsledky parametrické studie vlivu Youngova modulu různých vrstev na výsledky výpočtu. Výsledky jsou prezentovány ve standardním (a) a normalizovaném (b) zobrazení.



Obrázek 9.49: Rozložení celkových deformací na povrchu terénu pro Model PE3 (případ, kde má povrchová vrstva stejný Youngův modul jako deluviaální zeminy tvořící tělo sesuvu).



Obrázek 9.50: Rozložení celkových deformací na povrchu terénu pro Model PE4 (případ, kde má povrchová vrstva 10x větší Youngův modul než deluviální zeminy tvořící tělo sesuvu).

Z výsledků parametrické studie vlivu elasticích parametrů plynou následující závěry. Graf na obrázku 9.48(a) ukazuje očekávaný fakt, že Youngův modul ovlivňuje celkovou velikost vypočtených deformací. Důležitější je ovšem závěr plynoucí z normalizovaného grafu na obrázku 9.48(b): i přes odlišné hodnoty deformací nemají tuhosti zemin vliv na výsledné stupně stability.

Pro vyhodnocení validity metody povrchové vrstvy je dále zásadní srovnání obrázků 9.49 a 9.50. Obrázek 9.50 (povrchová vrstva 10x vyšší tuhosti než zeminy sesuvu) demonstруje očekávaný fakt, že při vysoké tuhosti povrchové vrstvy se těleso sesuvu pohybuje jako jeden celek bez výrazného rozdílu v deformacích horní a spodní části. Naproti tomu obrázek 9.49 (povrchová vrstva o stejně tuhosti jako zeminy sesuvu) indikuje, že pro danou kombinaci povrchu terénu, geologického podloží a pevnostních parametrů zemin prodélavá vyšší část sesuvu větší deformace, než část spodní. Bez aplikace metody povrchové vrstvy by v modelu pravděpodobně došlo ke kolapsu horní části svahu (výsypky kamenolomu) dříve, než by došlo k vývoji celkové svahové deformace tak, jak vznikla ve skutečnosti. I přes tyto rozdíly v deformacích vede ovšem metoda povrchové vrstvy s vrstvami o různých tuhostech k identickému stupni stability.

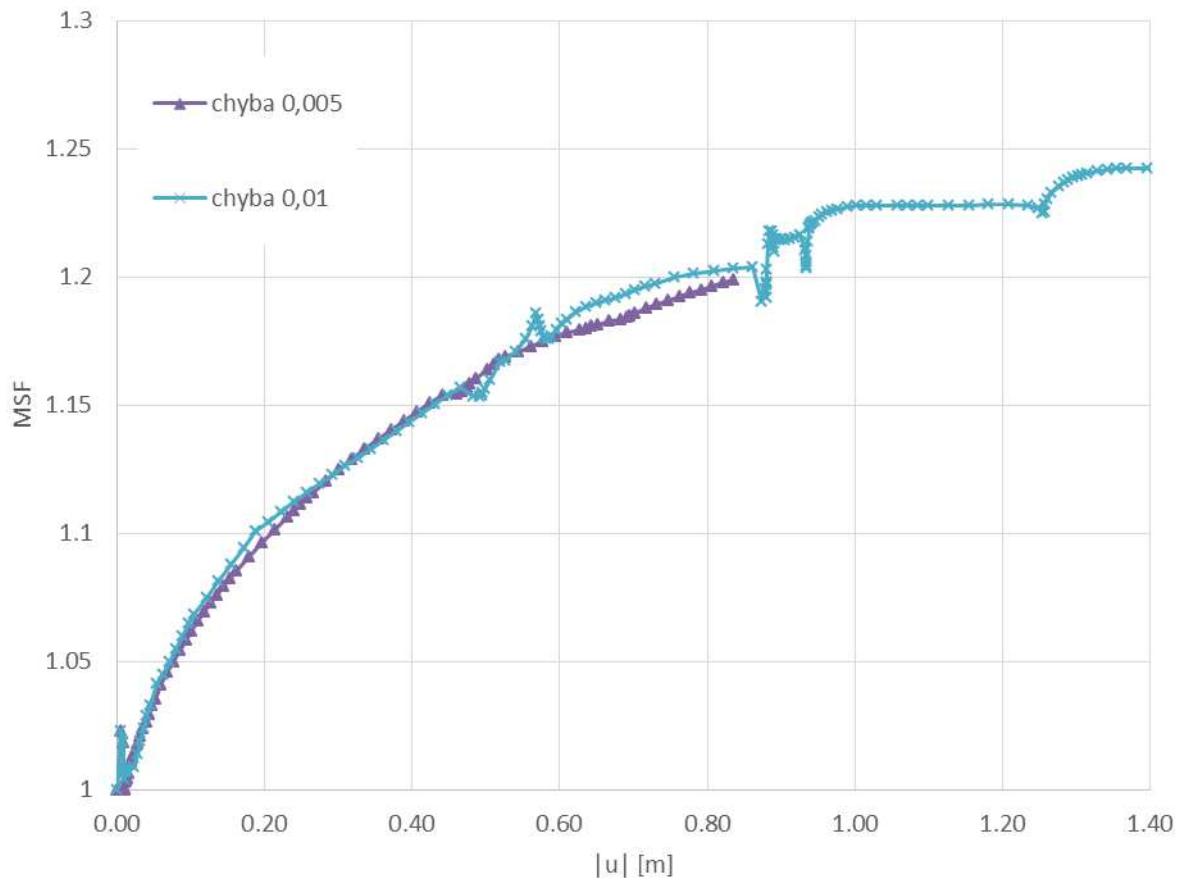
Na základě zjištěných výsledků byly pro všechny následující simulace zvoleny následující Youngovy moduly jednotlivých materiálů: 20 MPa pro deluviální zeminy a zeminy smykové zóny a 200 MPa pro horniny skalního podloží a povrchovou vrstvu.

### 9.6.3 Vliv nastavení iterační chyby

V software Plaxis je možné nastavit chybu Newton-Raphsonova iteračního schématu („Global error“). Standardní nastavení udává pro metodu redukce smykové pevnosti hodnotu chyby 0,01. V parametrické studii se testovaly tři různé hodnoty chyby 0,001, 0,005 a 0,01. Analýza s hodnotou chyby 0,001 vykazovala problematickou konvergenci od počátku výpočtu, výsledky analýzy s hodnotou chyby 0,005 a 0,01 jsou na obrázku 9.51. Je zřejmé, že obě vedou k obdobným výsledkům, nicméně analýza s velikostí chyby 0,005 má hladší průběh křivky MSF vs.  $|u|$ , což indikuje lepší konvergenci automatizovaného iteračního algoritmu. V analýzách byla tedy následně využita velikost chyby 0,005.

### 9.6.4 Vliv aplikace metody povrchové vrstvy

Vliv způsobu aplikace metody povrchové vrstvy byl studován z mnoha hledisek: například se testoval vliv okamžiku vytvoření zářezu (ve fázi gravitačního zatěžování či ve fázi následující), vliv tuhosti krusty (více viz kapitola 9.6.2), vliv tuhosti zeminy v zářezu na povrchu terénu a vliv mocnosti krusty. Ukázalo se, že tato nastavení pouze ovlivňují kvalitu konvergence iteračního algoritmu, nicméně nemají vliv na vypočtený stupeň stability.



Obrázek 9.51: Vliv nastavení iterační chyby na křivku MSF vs.  $|u|$ .

## 9.7 3D modely – Řešené konfigurace

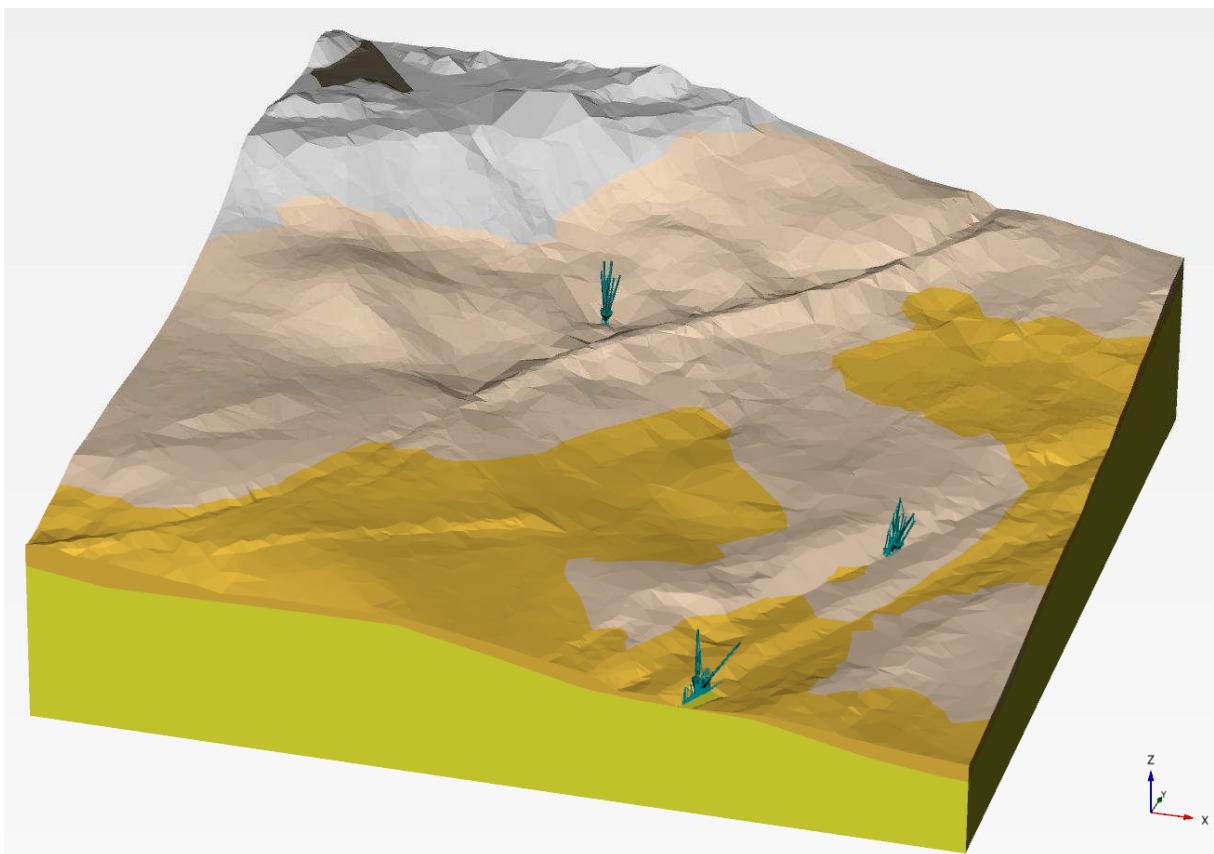
3D modely byly řešeny v šesti různých konfiguracích, které jsou shrnutý v tabulce 9.9. Detailnější informace jsou v kapitolách 9.7.1 až 9.7.5.

Tabulka 9.9: Shrnutí řešených konfigurací

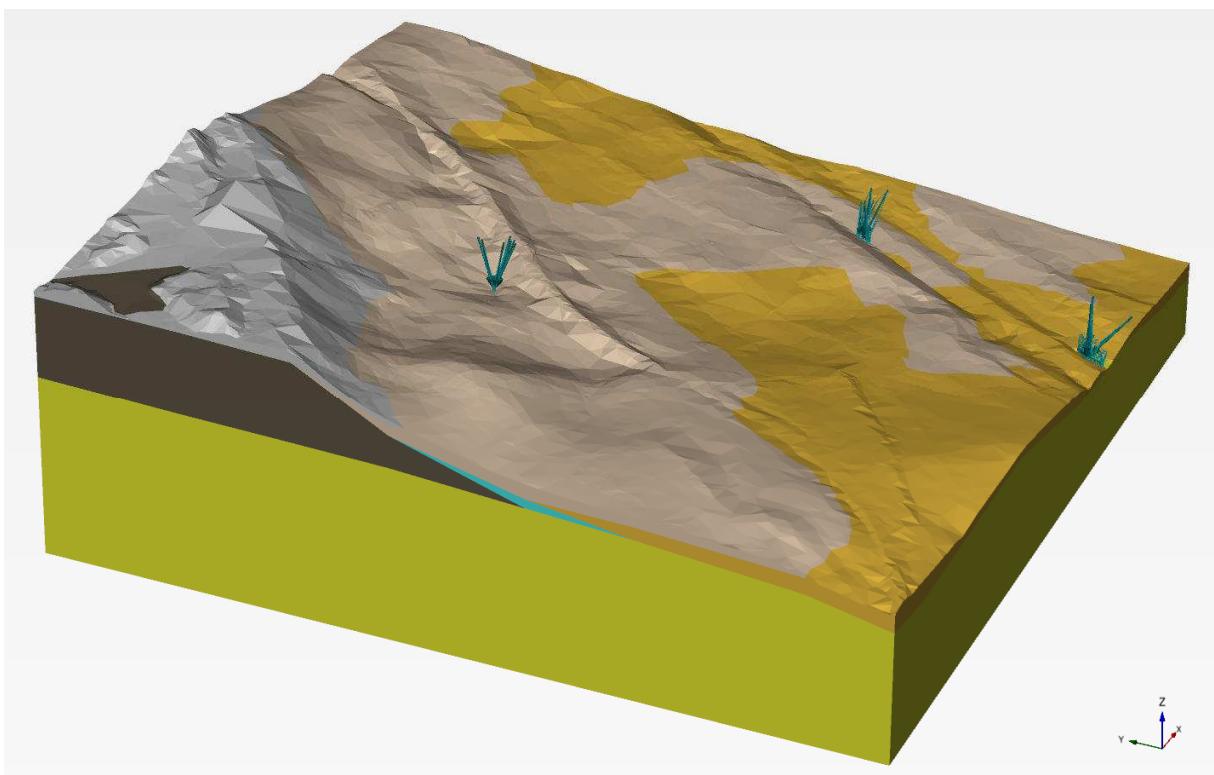
Označení analýzy	Popis analýzy
A	Základní analýza reprezentující svah v okamžiku inicializace sesuvu v červnu 2013.
B	V této analýze je odstraněna výsypka kamenolomu, ostatní konfigurace odpovídá analýze A.
C	Geometrie odpovídá analýze A, hladina podzemní vody je zaklesnutá na úroveň křídových slínovců.
D	Odstraněný násep železnice, ostatní konfigurace odpovídá analýze A.
E	Analýza bez zářezu dálnice. Geometrie terénu je tvořena povrchem č. 2 (kap. 9.5.1). Ostatní konfigurace včetně výsypky kamenolomu odpovídá analýze A.
F	Geometrie odpovídá analýze A, na smykové ploše jsou uvažovány kritické pevnostní parametry místo reziduálních.

### 9.7.1 Analýza A (stav v době sesuvu)

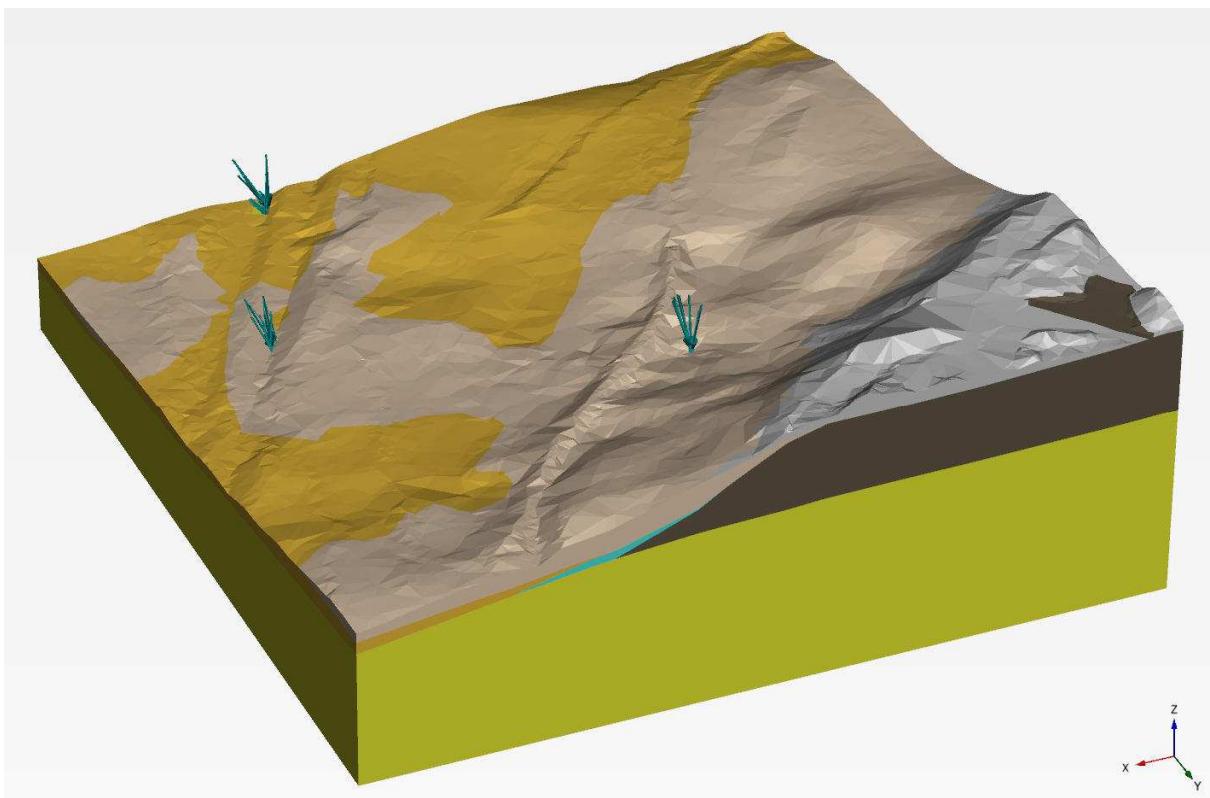
Základní analýza, ve které se uvažuje povrch terénu č. 1 (kapitola 9.5.1), geometrie geologických vrstev popsaná v kapitole 9.5.2, hladina podzemní vody v hloubce 1-2 m pod povrchem terénu a reziduální parametry smykové pevnosti zemin. Obrázky 9.52 až 9.54 ukazují tři základní pohledy na modely o natočení  $-17^\circ$  -  $-26^\circ$  (vůči ose z a rovině xy),  $-66^\circ$  -  $32^\circ$  a  $-157^\circ$  -  $-32^\circ$ . Obrázek 9.55 pak indikuje vedení řezů A (řez 1) a B (řez 2) používaných pro 2D analýzy. Tyto geologické řezy jsou pak včetně hladiny podzemní vody zobrazeny v obrázcích 9.56 a 9.57.



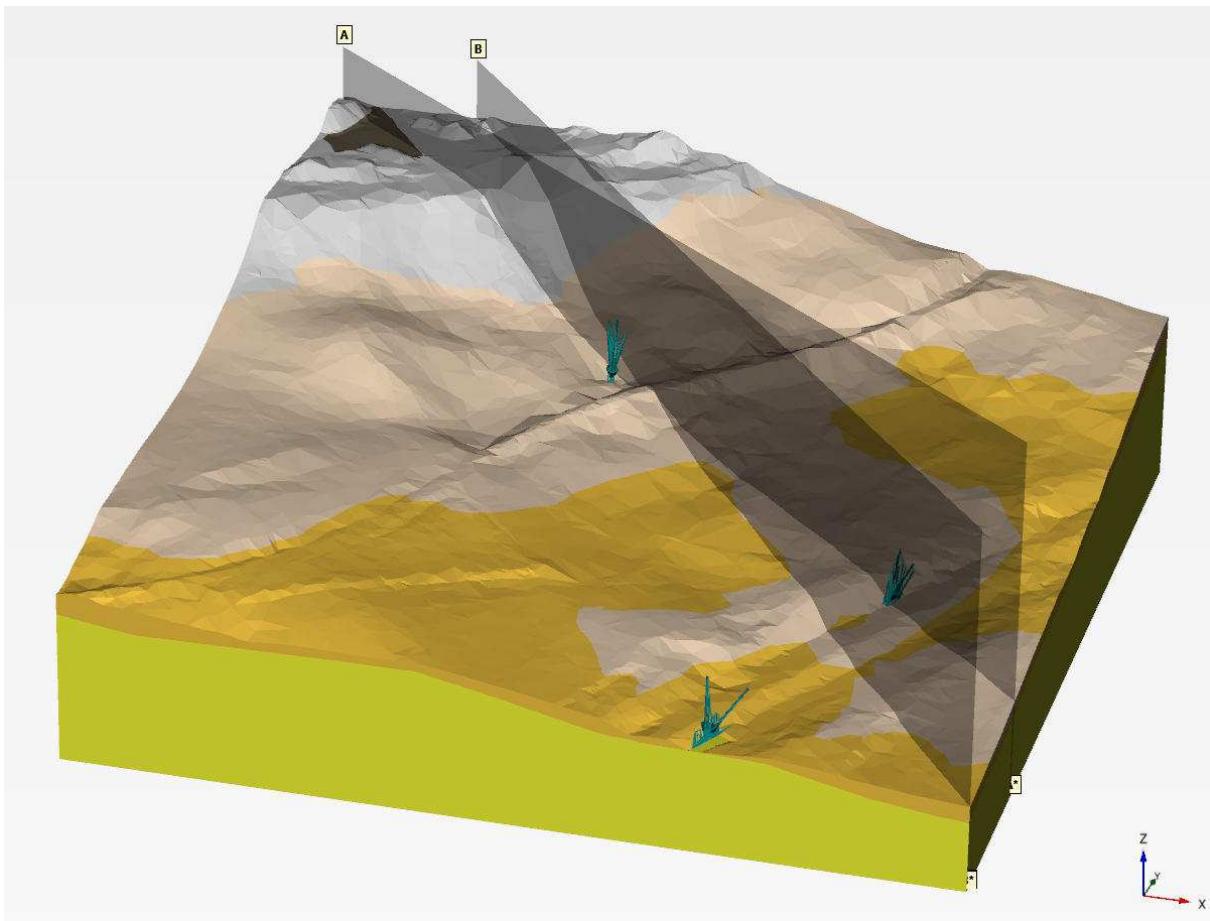
Obrázek 9.52: Geometrie modelu A, pohled 1. Šipky označují místa výronu podzemní vody.



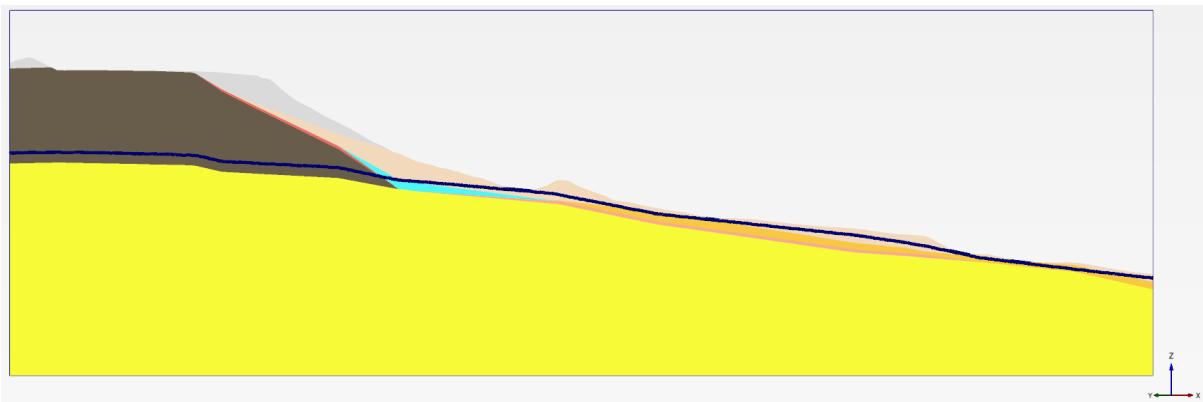
Obrázek 9.53: Geometrie modelu A, pohled 2.



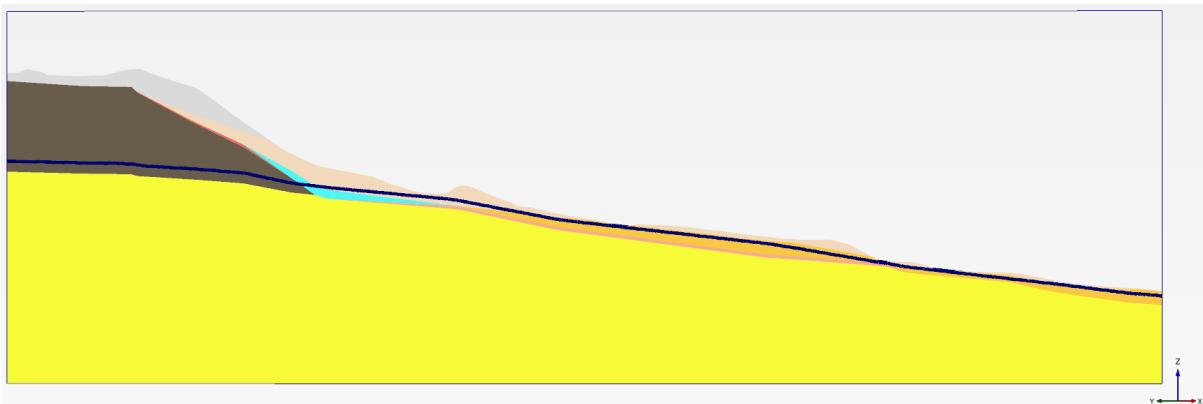
Obrázek 9.54: Geometrie modelu A, pohled 3.



Obrázek 9.55: Geometrie modelu A, pohled 1, vedení řezů A a B.



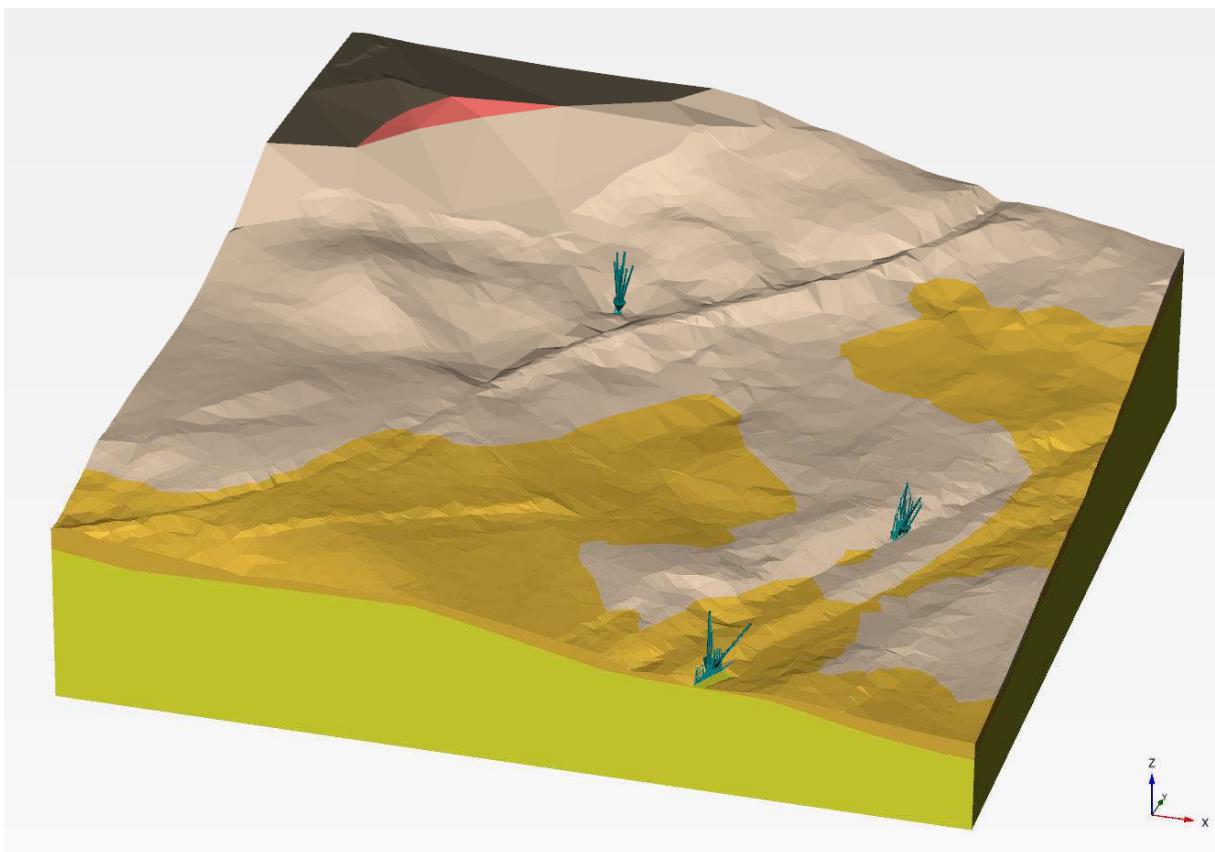
Obrázek 9.56: Model A, geologický řez 1 (řez A).



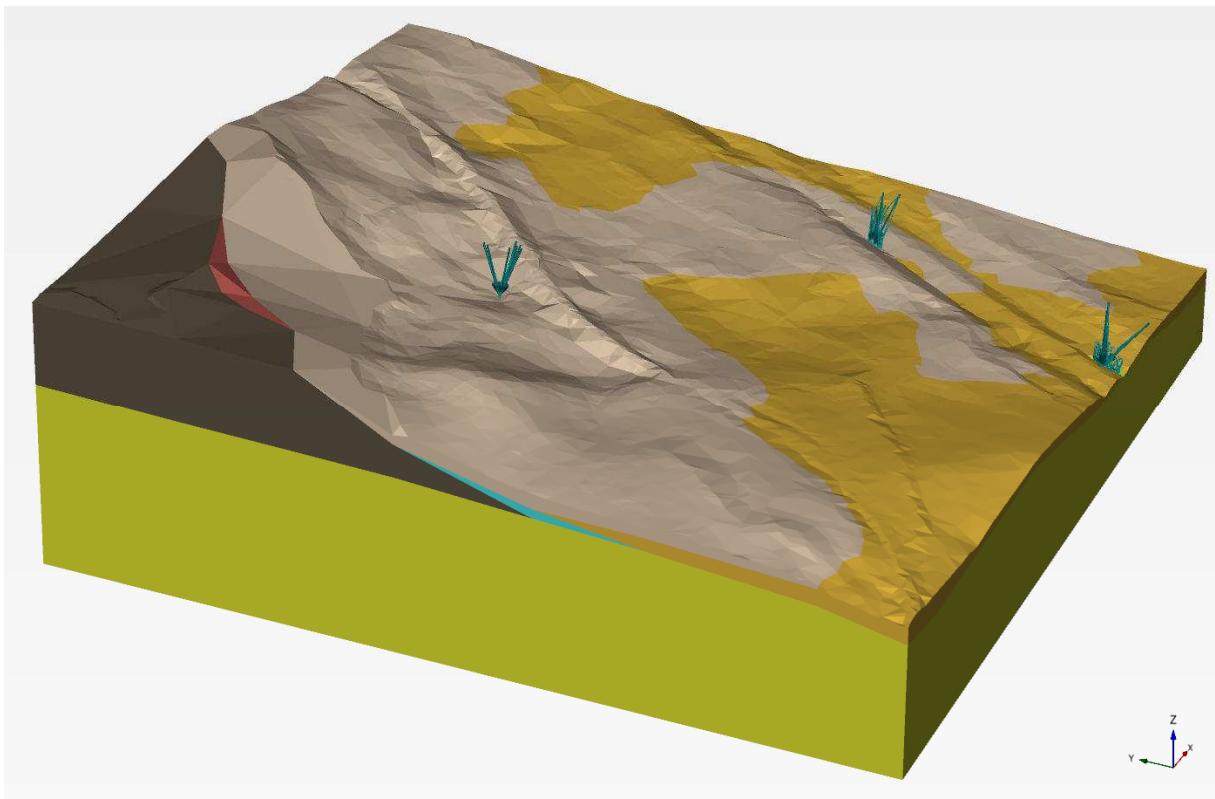
Obrázek 9.57: Model A, geologický řez 2 (řez B).

### 9.7.2 Analýza B (bez výsypky kamenolomu)

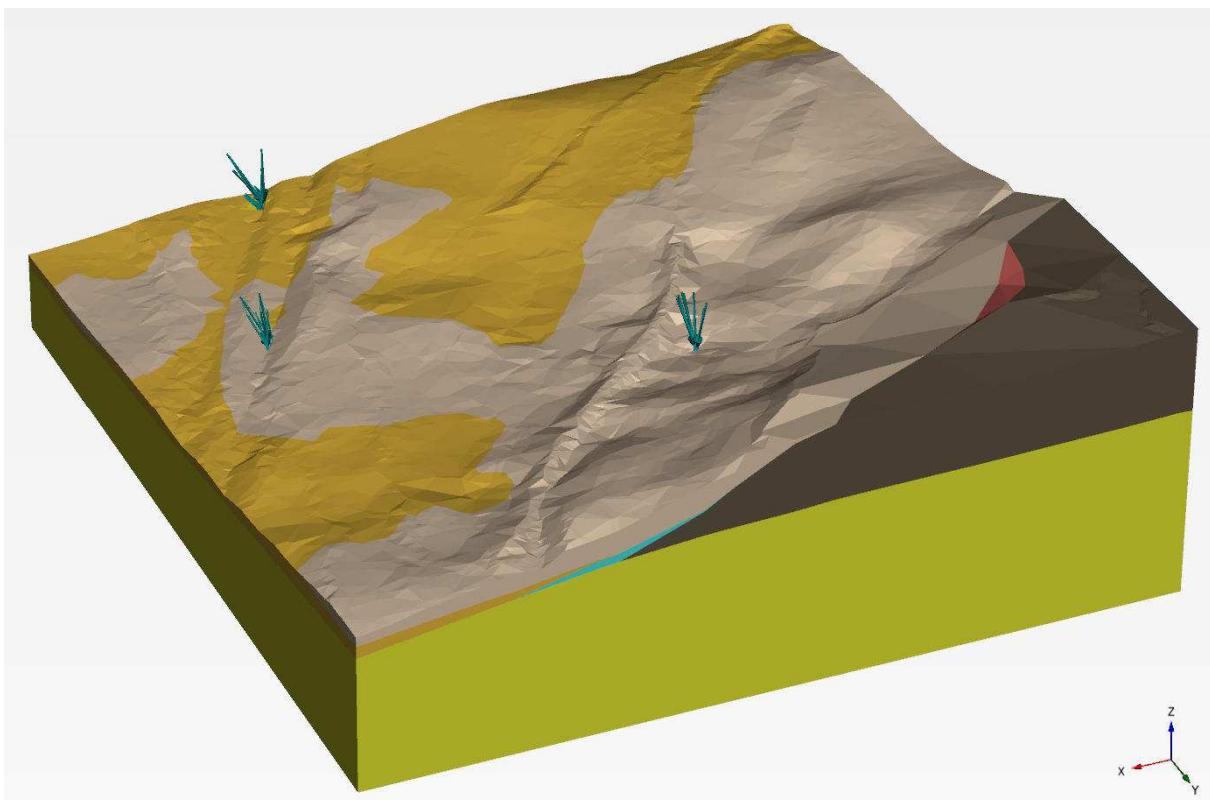
Analýza B se odlišuje od analýzy A tím, že není uvažována výsypka kamenolomu. Model byl formován následujícím způsobem. Geometrie podložních bazaltů v horní části sesuvného svahu byla sestavena s využitím povrchu terénu č. 4 (stav po I etapě sanace). I etapa sanace byla totiž ukončena po dosažení povrchu bazaltu, proto je geometrie povrchu terénu po I etapě sanace adekvátní approximací povrchu bazaltového tělesa. Na tělese bazaltu se uvažuje pokryv deluviálních sutí, které jsou překryty sutěmi výsypky kamenolomu. Geometrie horní části výsypek (na pracovní ploše kamenolomu) je evidentní, nicméně geometrie výsypky na prudkém svahu pod plošinou kamenolomu je méně zřejmá z důvodu absence vrtných prací. Zde byla geometrie modelována s využitím znalosti úhlu přirozené sklonitosti staršího deluviálního pokryvu a také s využitím fotodokumentace postupného rozvoje výsypky mezi lety 2000 a 2013. Výsledný model analýzy B včetně dvou řezů je shrnut na obrázcích 9.58 až 9.63.



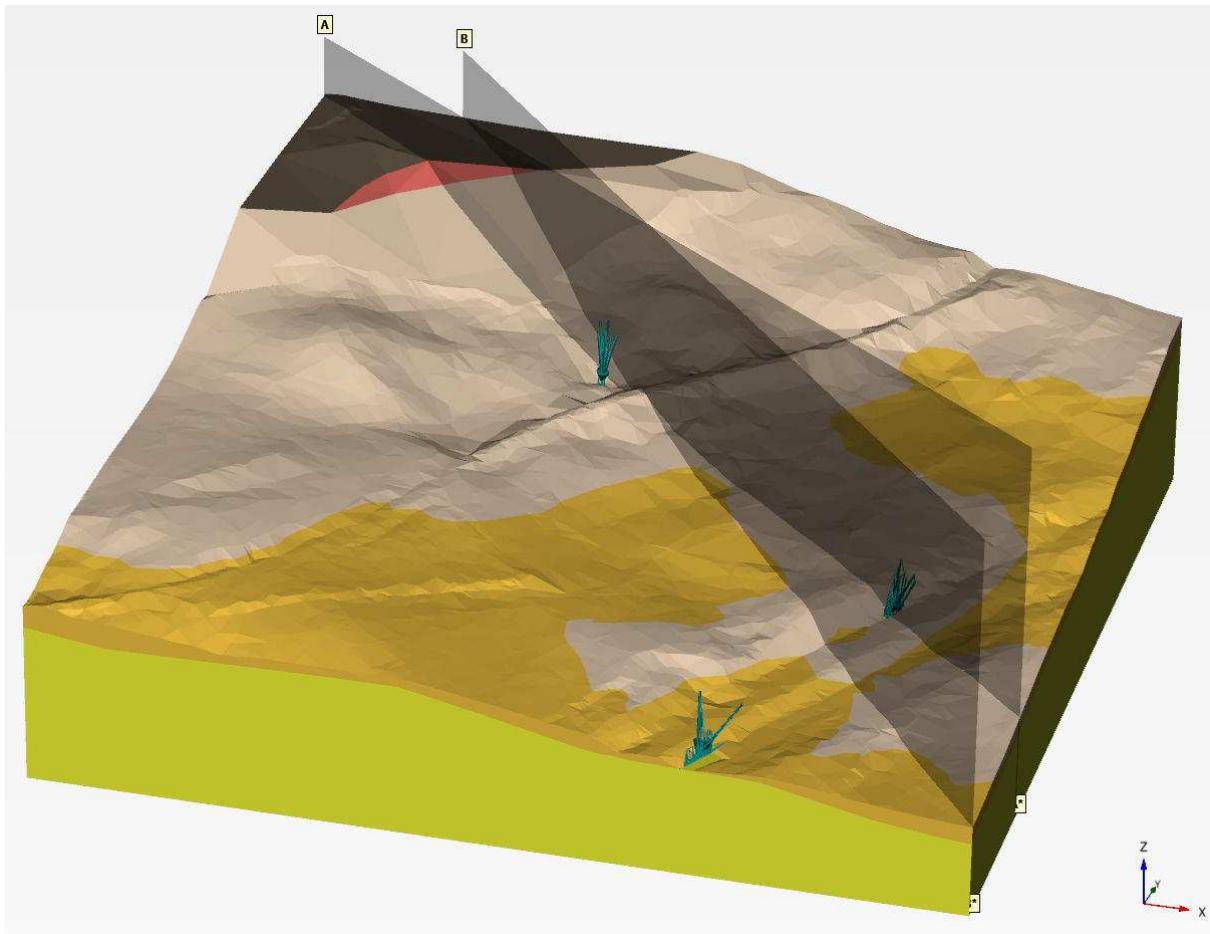
Obrázek 9.58: Geometrie modelu B, pohled 1.



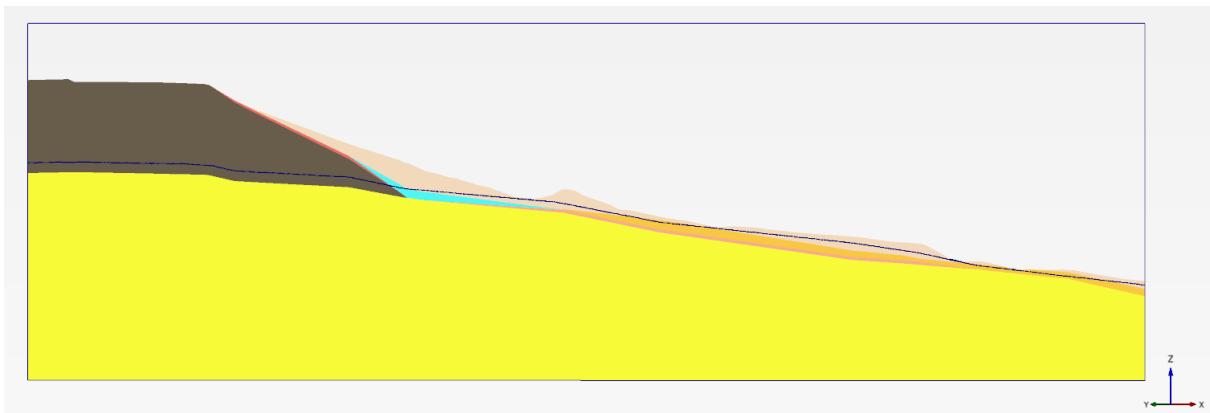
Obrázek 9.59: Geometrie modelu B, pohled 2.



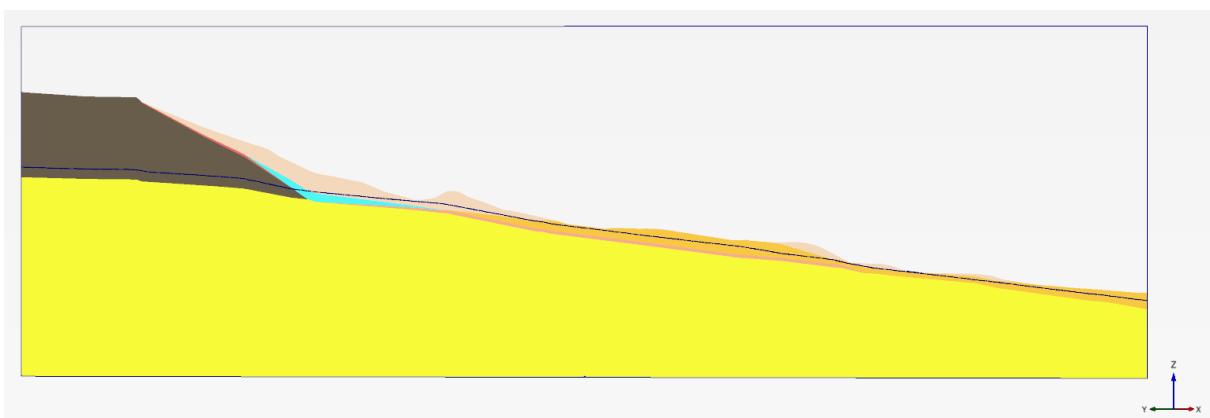
Obrázek 9.60: Geometrie modelu B, pohled 3.



Obrázek 9.61: Geometrie modelu B, pohled 1, vedení geologických řezů.



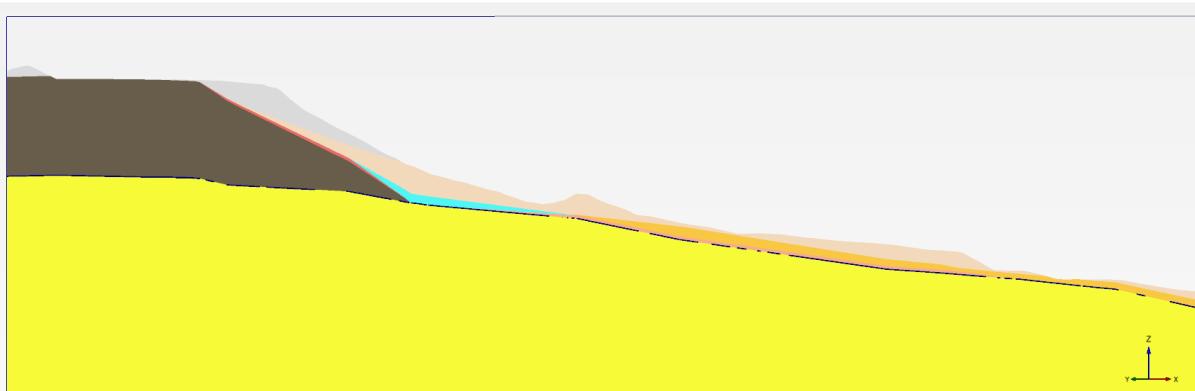
Obrázek 9.62: Model B, geologický řez 1 (řez A).



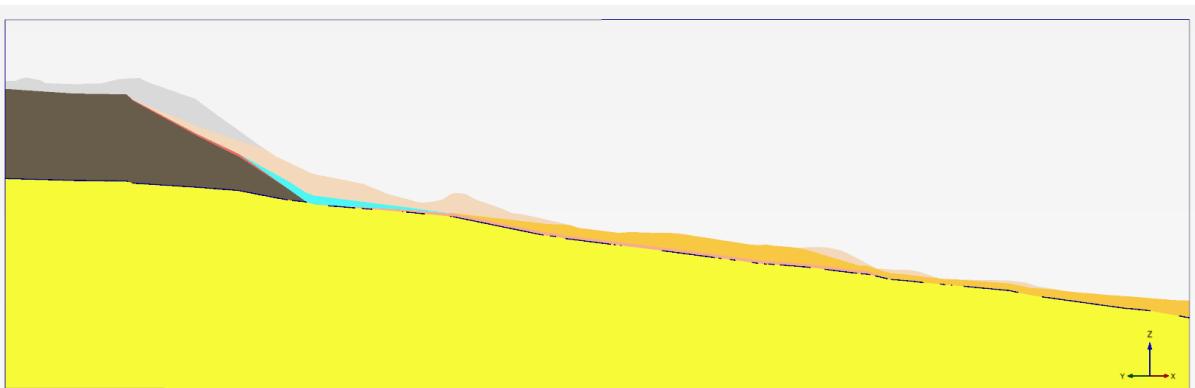
Obrázek 9.63: Model B, geologický řez 2 (řez B).

### 9.7.3 Analýza C (HPV na úrovni slínovce)

Analýza C se odlišuje od analýzy A tím, že je uvažována nižší hladina podzemní vody odpovídající bázi kvartérního pokryvu. Hladina podzemní vody v tomto modelu kopíruje povrch křídových slínovců. Průběh hladiny podzemní vody je zřejmý z řezů na obrázcích 9.64 a 9.65.



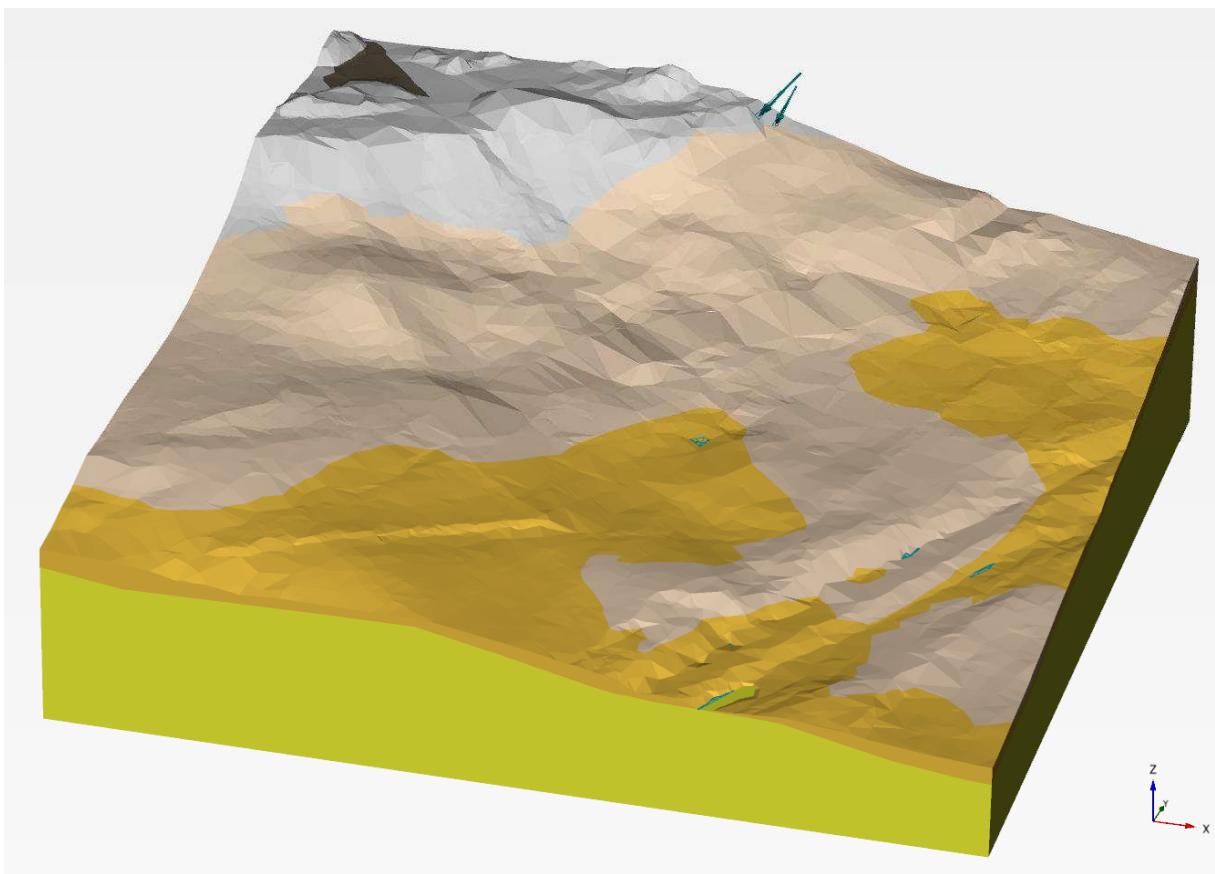
Obrázek 9.64: Model C, geologický řez 1 (řez A). Modrá přerušovaná linie zobrazuje zaklesnutou hladinu podzemní vody.



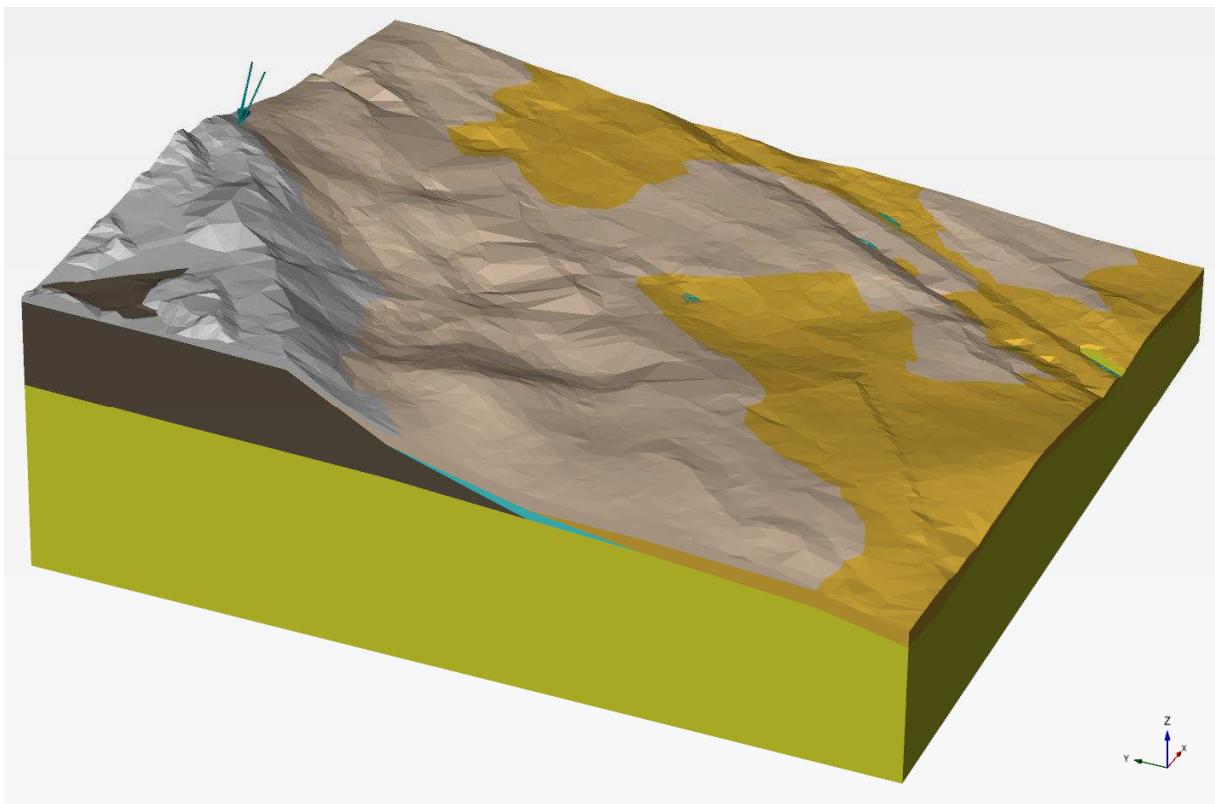
Obrázek 9.65: Model C, geologický řez 2 (řez B). Modrá přerušovaná linie zobrazuje zaklesnutou hladinu podzemní vody.

### 9.7.4 Analýza D (bez náspu železnice)

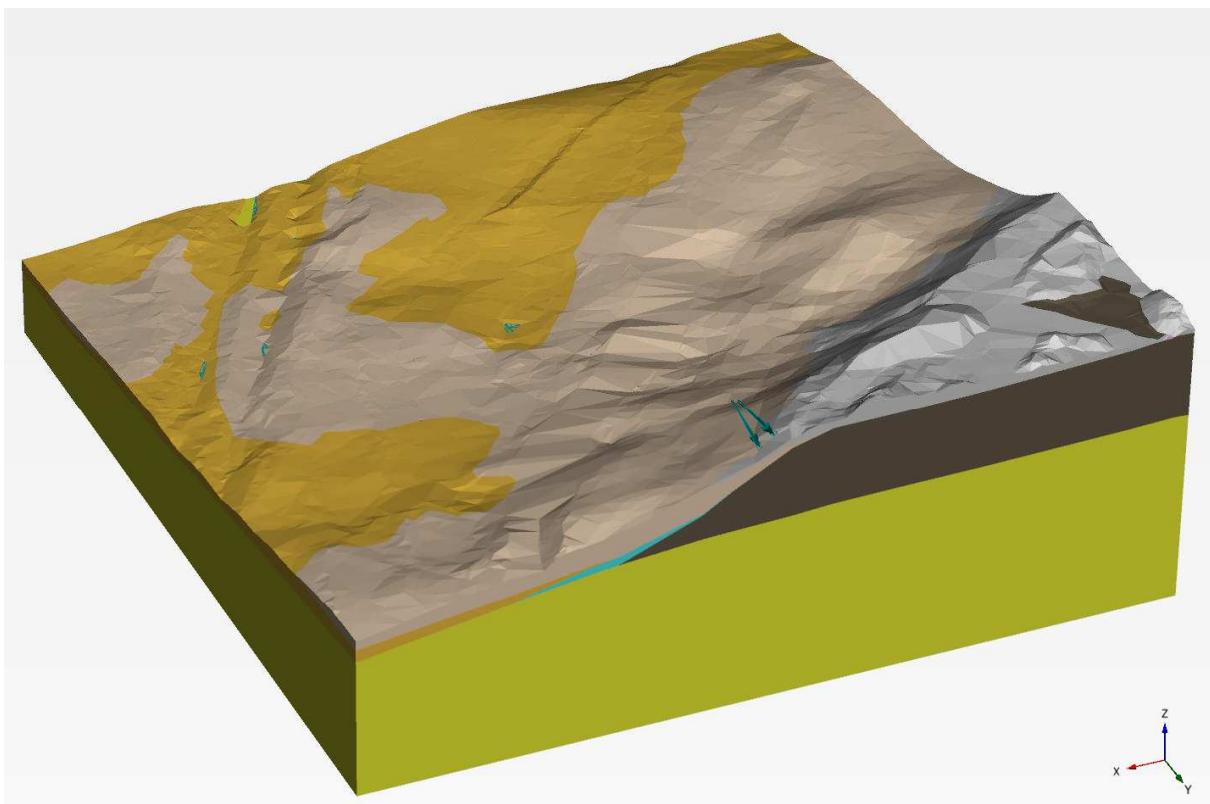
Analýza D (bez náspu železnice) vychází z analýzy A, ovšem využívá model terénu č. 3. Jedná se model terénu vycházející z modelu terénu č. 1, v němž byl metodami počítačové grafiky odstraněn násep železnice tak, aby povrch terénu odpovídal předpokládanému tvaru povrchu před výstavbou železničního náspu. Všechny ostatní aspekty analýzy A zůstaly zachovány. Zobrazení modelu pro analýzu D je v obrázcích 9.66 až 9.71.



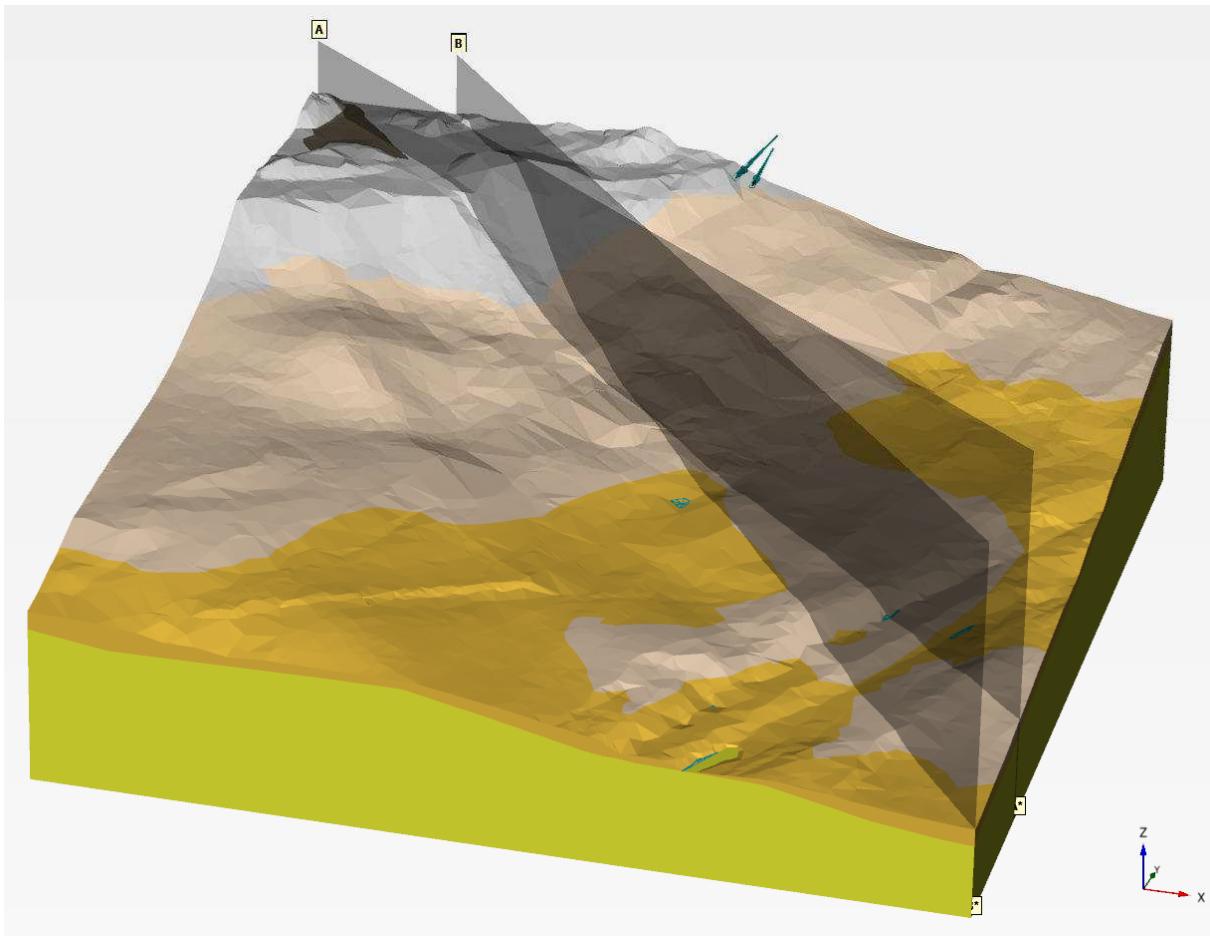
Obrázek 9.66: Geometrie modelu D, pohled 1.



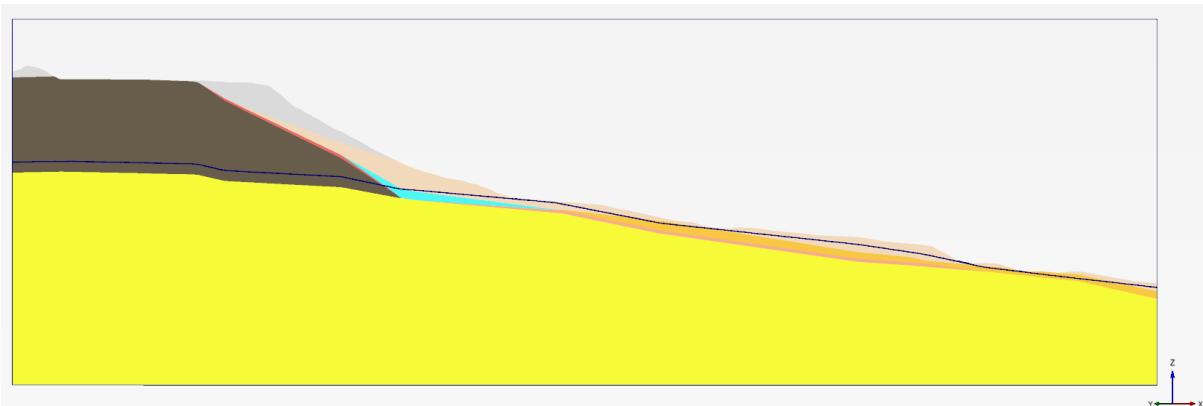
Obrázek 9.67: Geometrie modelu D, pohled 2.



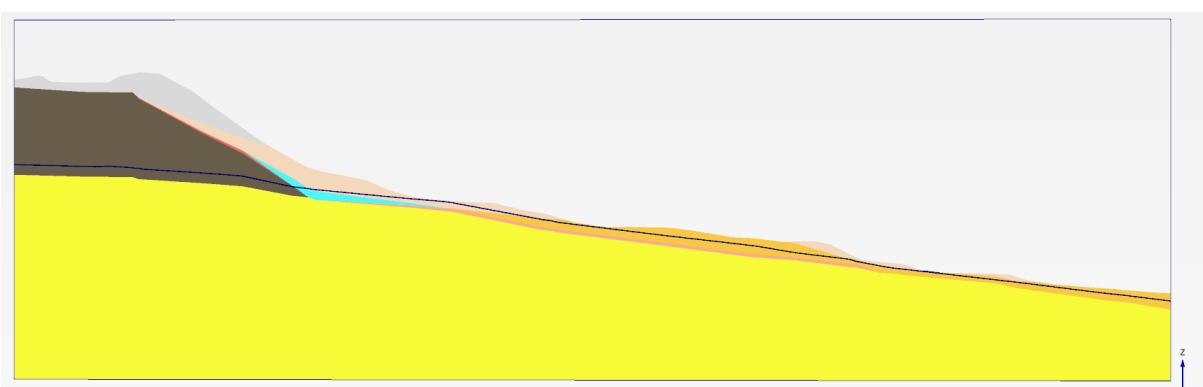
Obrázek 9.68: Geometrie modelu D, pohled 3.



Obrázek 9.69: Geometrie modelu D, pohled 1, vedení geologických řezů.



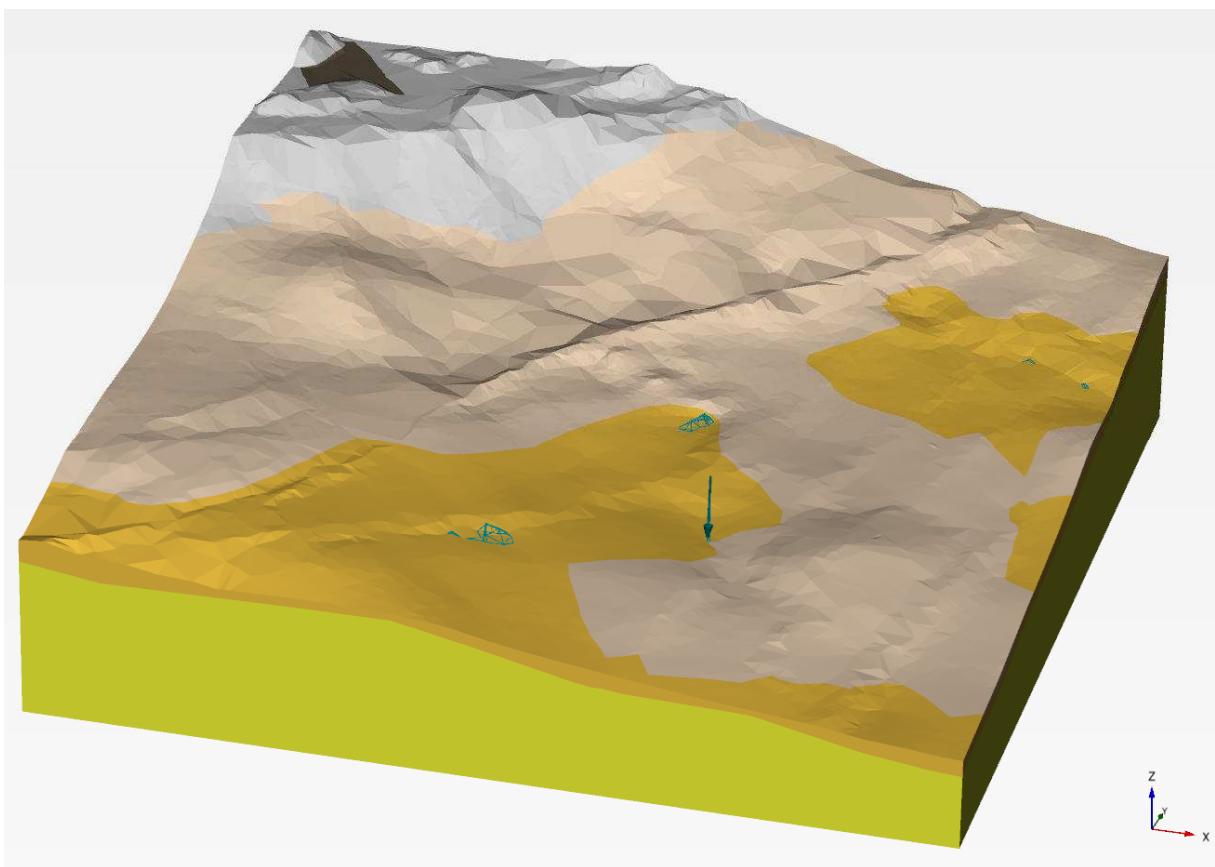
Obrázek 9.70: Model D, geologický řez 1 (řez A).



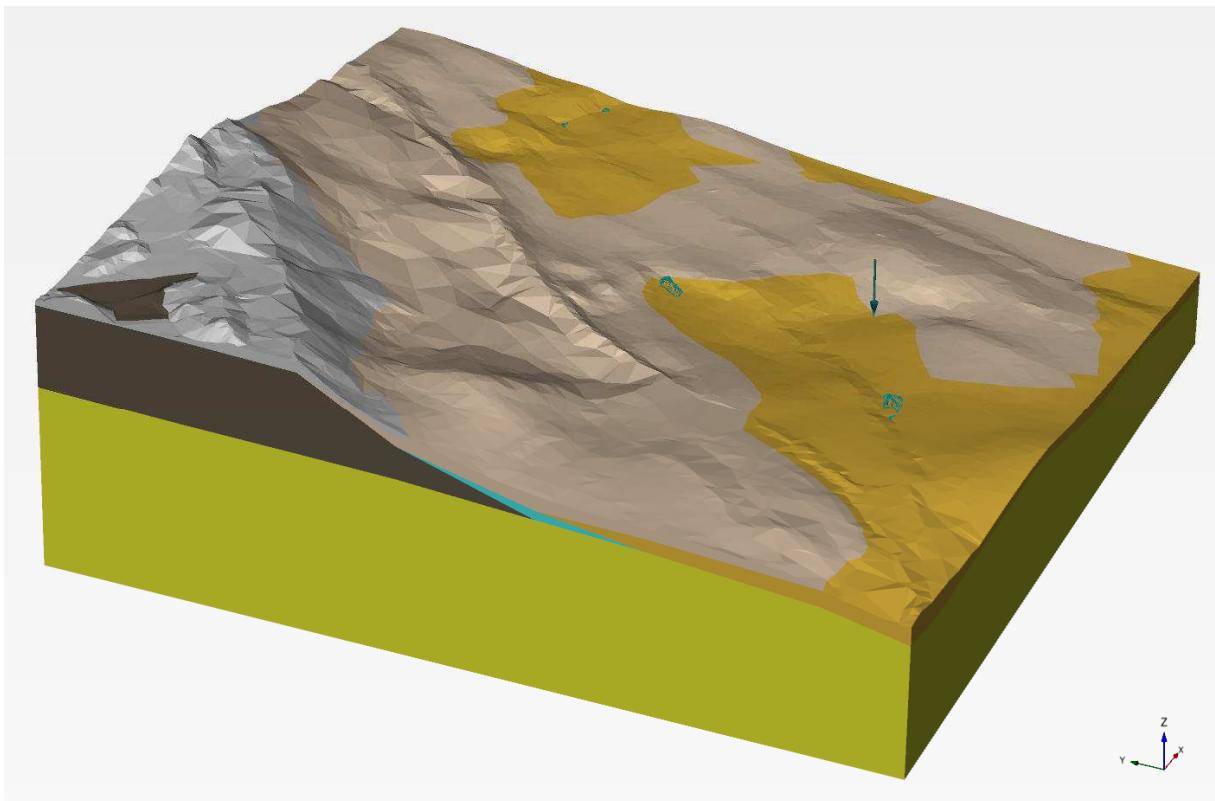
Obrázek 9.71: Model D, geologický řez 2 (řez B).

#### 9.7.5 Analýza E (bez zářezu dálnice)

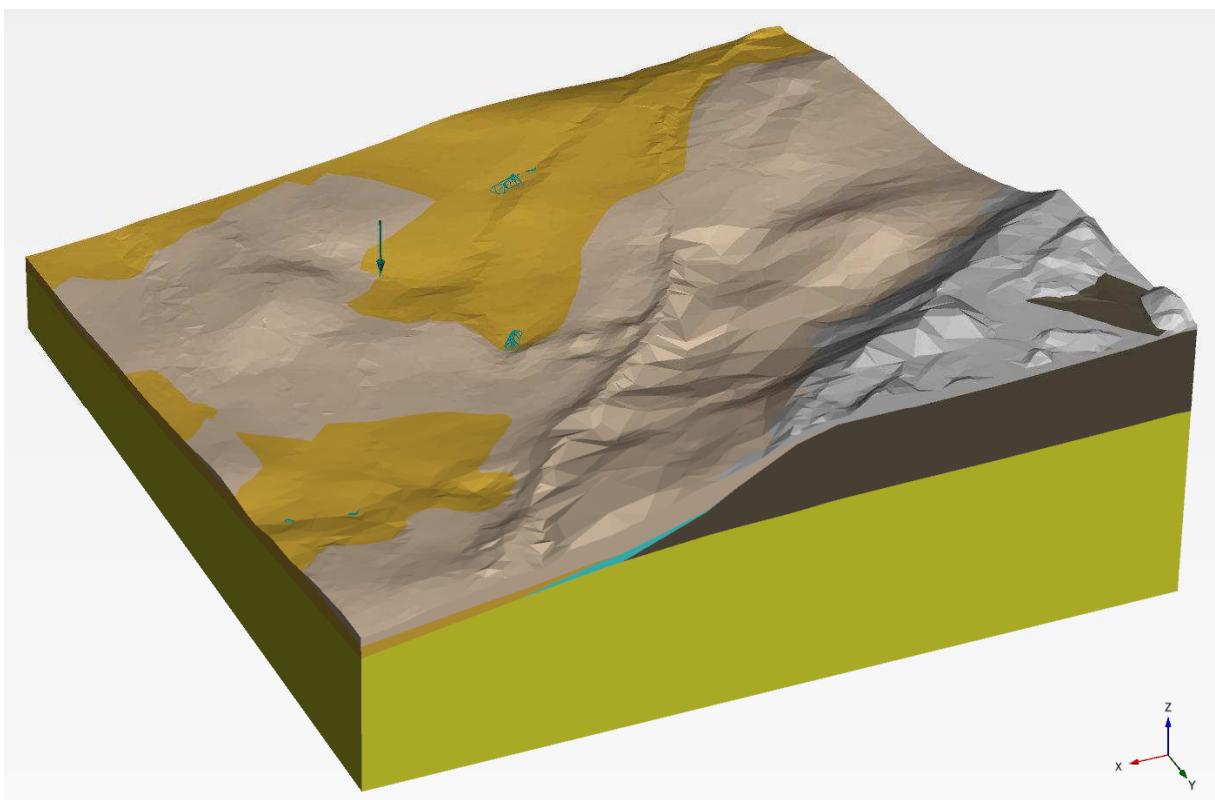
Analýza E využívá model terénu č. 2. Jedná se o model terénu, který má v sobě zanesen tvar výsypky kamenolomu z června roku 2013, ovšem v oblasti zářezu dálnice je zkombinován se starším modelem terénu z roku 2006, na němž ještě dálnice není vystavěna. Model analýzy E je zobrazen na obrázcích 9.72 až 9.77.



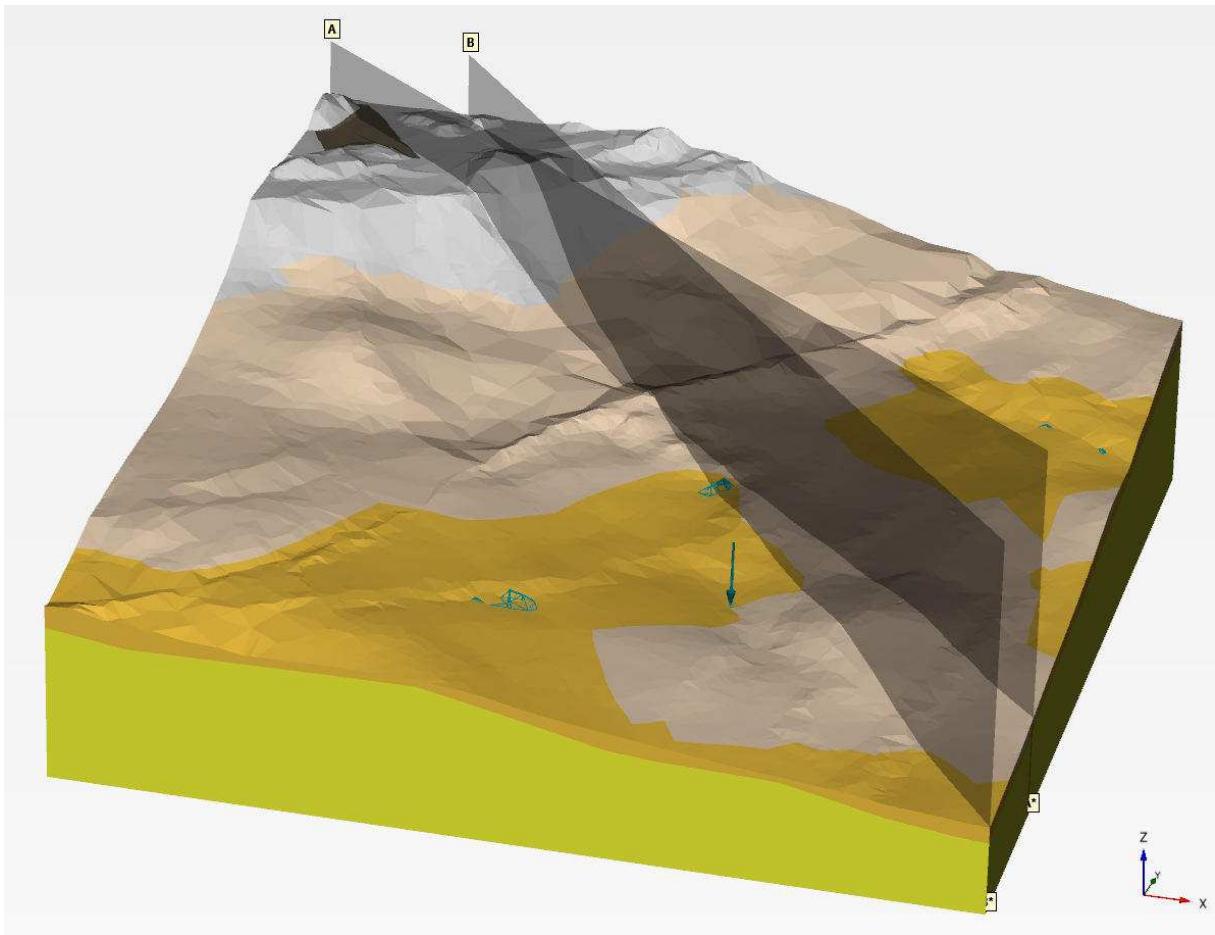
Obrázek 9.72: Geometrie modelu E, pohled 1.



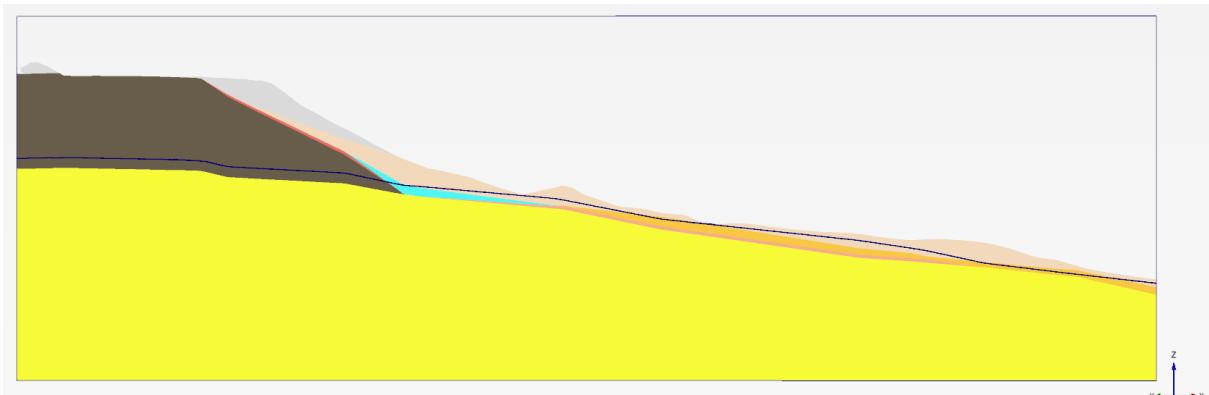
Obrázek 9.73: Geometrie modelu E, pohled 2.



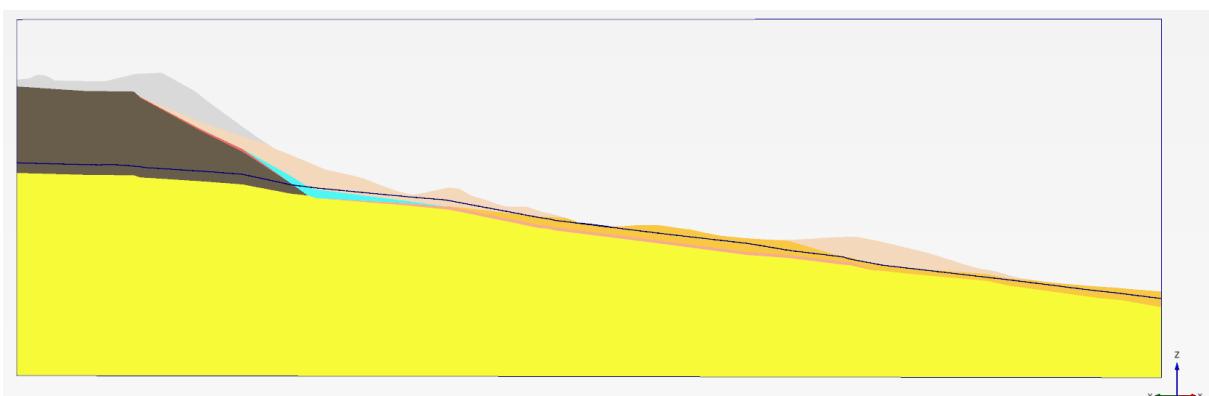
Obrázek 9.74: Geometrie modelu E, pohled 3.



Obrázek 9.75: Geometrie modelu E, pohled 1, vedení geologických řezů.



Obrázek 9.76: Model E, geologický řez 1 (řez A).



Obrázek 9.77: Model E, geologický řez 2 (řez B).

#### 9.7.5 Analýza F (smyková plocha kritické parametry)

Geometrie a průběh hladiny podzemní vody analýzy F je identický s analýzou A. Rozdílem je, že smykové parametry kvazihomogenních celků IV až V neodpovídají reziduálním hodnotám, ale jsou uvažovány parametry kritické. V relaci k tabulkám 9.3 až 9.5 jsou parametry kvazihomogenního celku V zaměněny za parametry celku Va a parametry celku IV jsou zaměněny za parametry celku I.

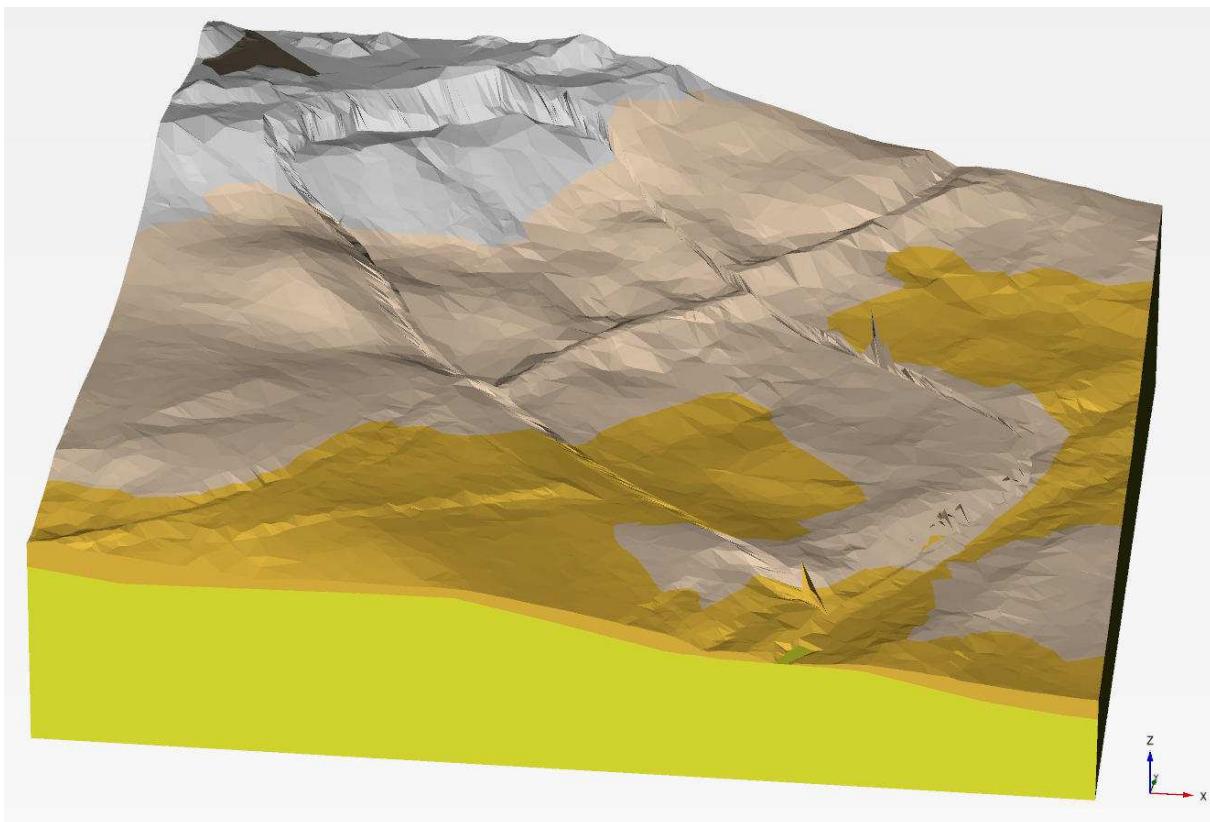
Protože kritické parametry jsou relevantní pro případ, kdy v historii nedošlo k výraznému posunu zeminy, analýza F odpovídá situaci, kdy je sesuvem porušovaný svah, který v historii sesuvem postižený nebyl. Oproti tomu ostatní analýzy (A až E) reprezentují svah, u kterého došlo k oživení v minulosti proběhlých sesuvních pohybů. Je tomu tak proto, že reziduální parametry užívané v analýzách A až E mohou být dosaženy jen při pohybu na smykové ploše, ke kterému v historii došlo.

## 9.8 3D modely – Mechanizmus porušení

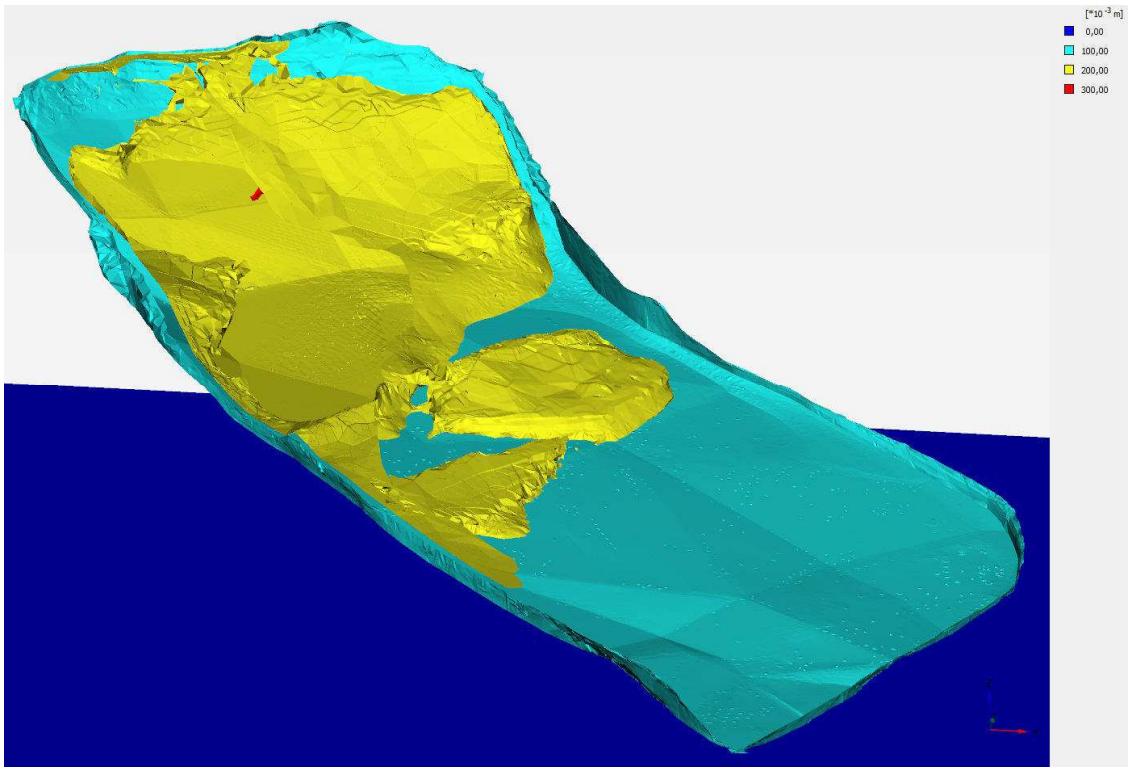
V této kapitole je shrnut mechanismus porušení svahu pro jednotlivé případy, přičemž jsou využita data z výpočtu metodou redukce smykové pevnosti po 30. výpočtovém kroku. Mechanismus porušení je tedy u všech simulací v obdobné fázi, i když se celkové velikosti deformací mohou u jednotlivých analýz mírně lišit v závislosti na rychlosti konvergence automatického iteračního algoritmu implementovaného v software Plaxis. Velikost deformací se pohybuje v řádu centimetrů a je tak identifikován mechanismus porušení v počátečních fázích sesuvu.

### 9.8.1 Analýza A (stav v době sesuvu)

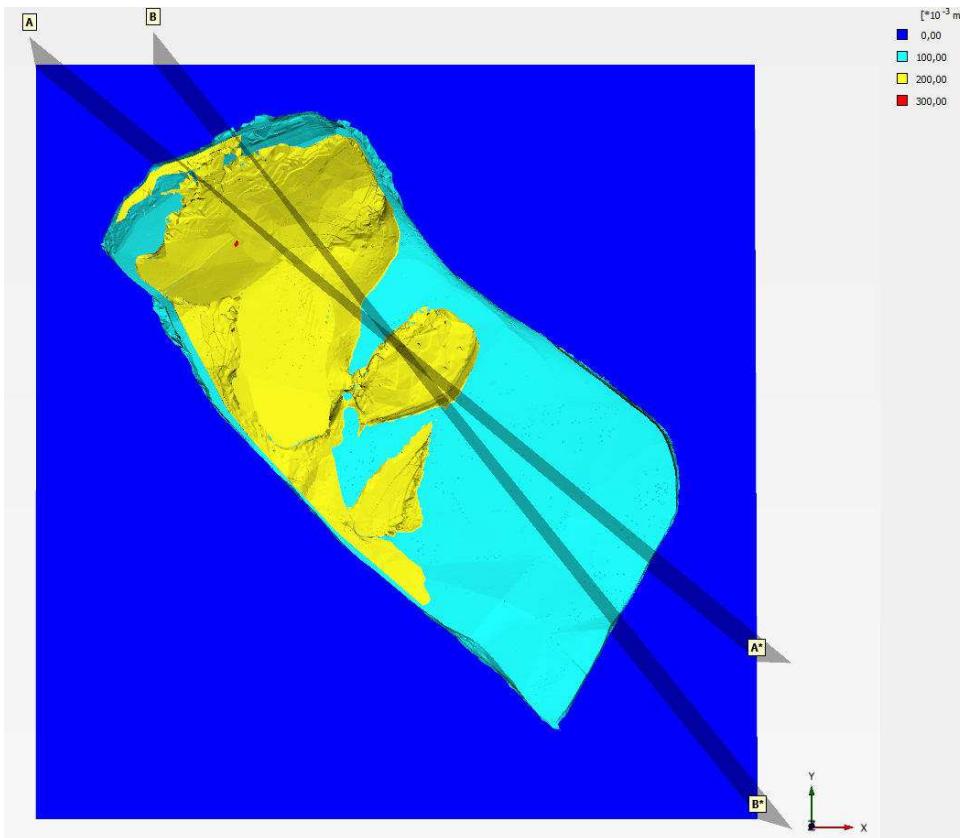
V následujících obrázcích 9.78 až 9.82 je prezentován mechanismus porušení pro analýzu A se základními parametry. Pohledy ve směrech  $-8^\circ$  -  $-22^\circ$  (vůči ose z a rovině xy) pro základní pohled a  $0^\circ$  -  $-88^\circ$  pro demonstrování průběhu řezů.



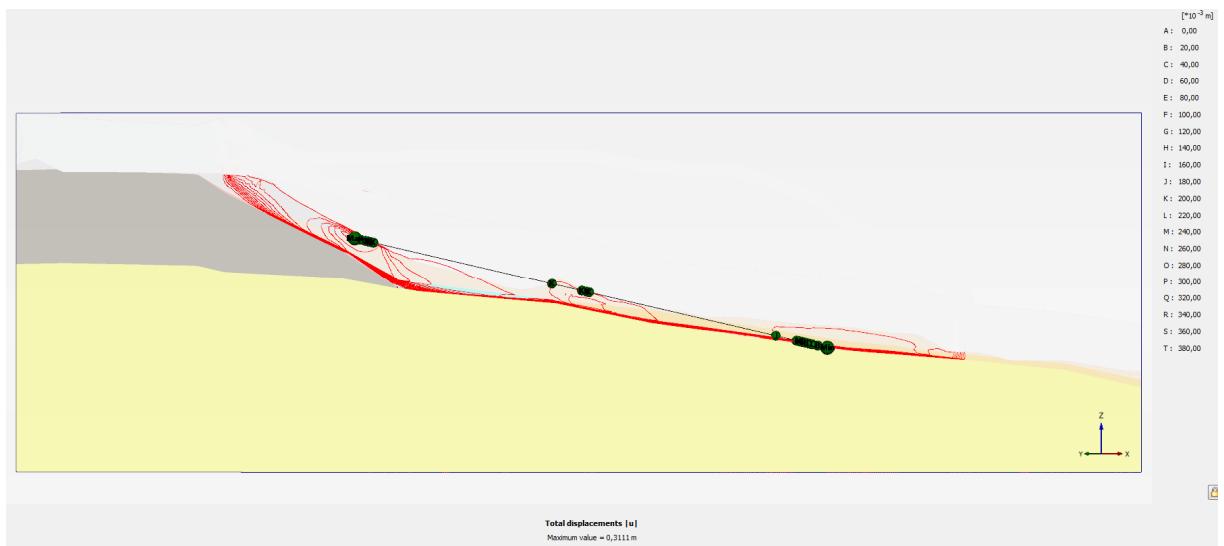
Obrázek 9.78: Model A (základní analýza), deformace povrchu (přibližně 100x zvětšená).



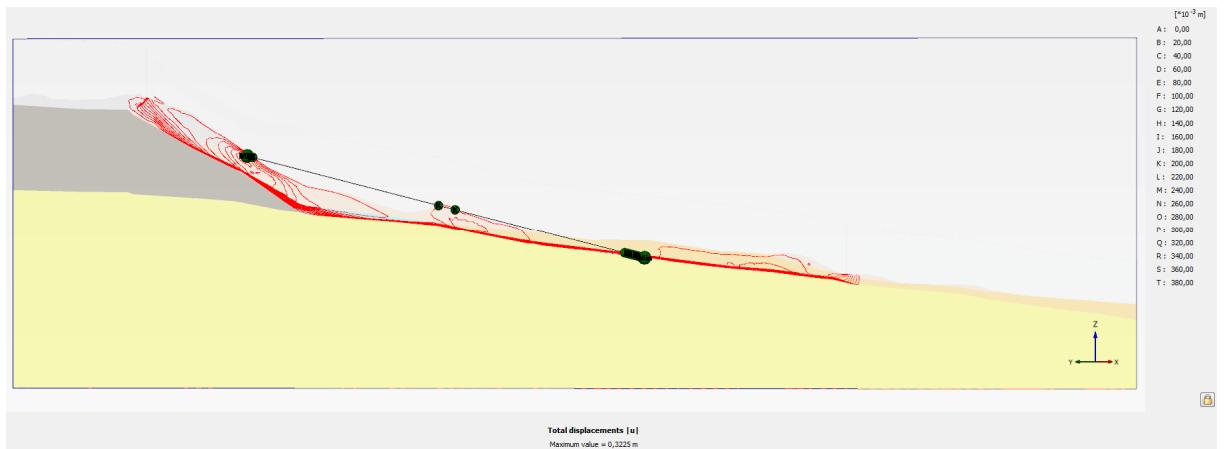
Obrázek 9.79: Model A (základní analýza), izopovrchy deformací. Je zřejmé, že v mechanismu porušení je zapojena celá smyková plocha, deluviální sutě v prudší části svahu ovšem vykazují vyšší deformace a tedy mírně nižší lokální stupeň stability.



Obrázek 9.80: Model A (základní analýza), izopovrchy deformací a vedení řezů.



Obrázek 9.81: Model A (základní analýza), řez 1 (řez A), izolinie deformací. Zřejmá je aktivace celé smykové plochy a maximum deformací v oblasti deluviálních sutí na prudké části svahu.

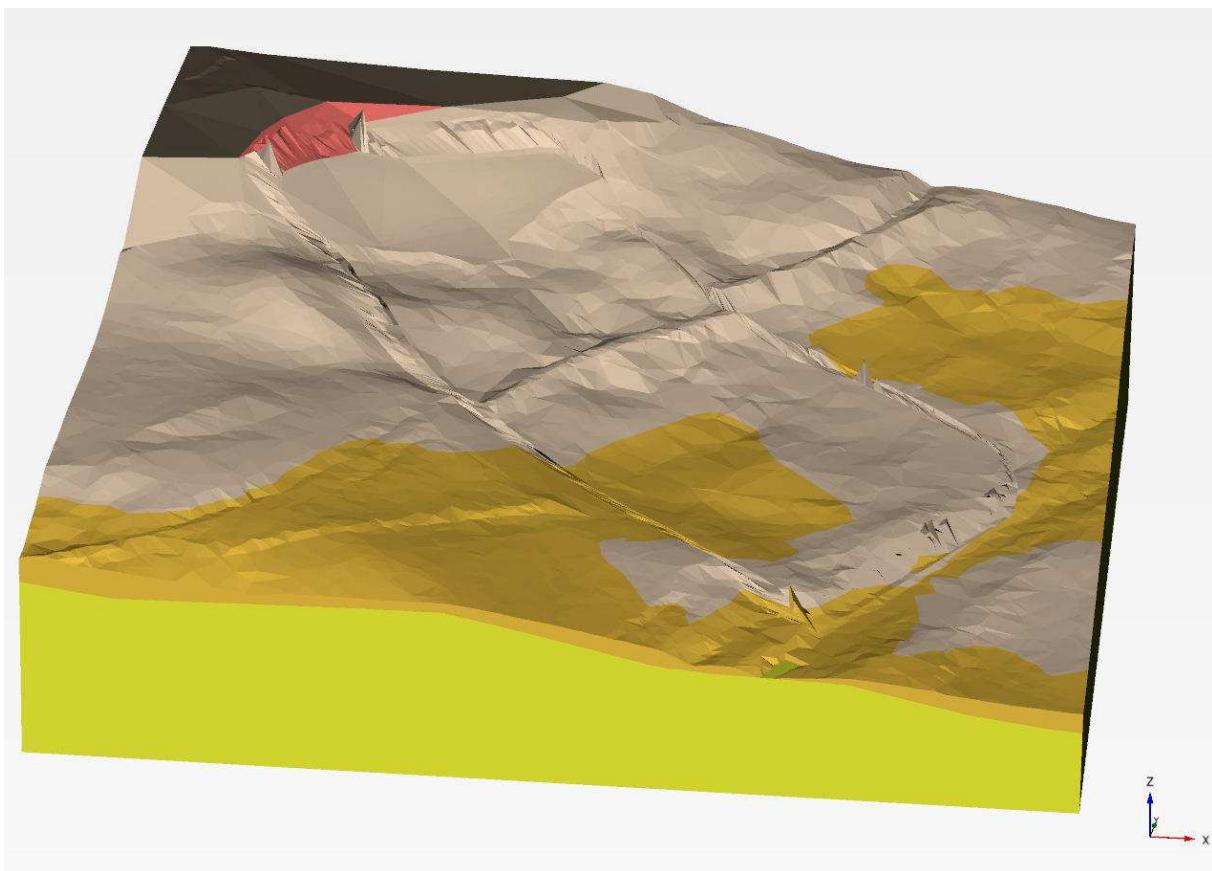


Obrázek 9.82: Model A (základní analýza), řez 2 (řez B), izolinie deformací. Zřejmá je aktivace celé smykové plochy a maximum deformací v oblasti deluviálních sutí na prudké části svahu.

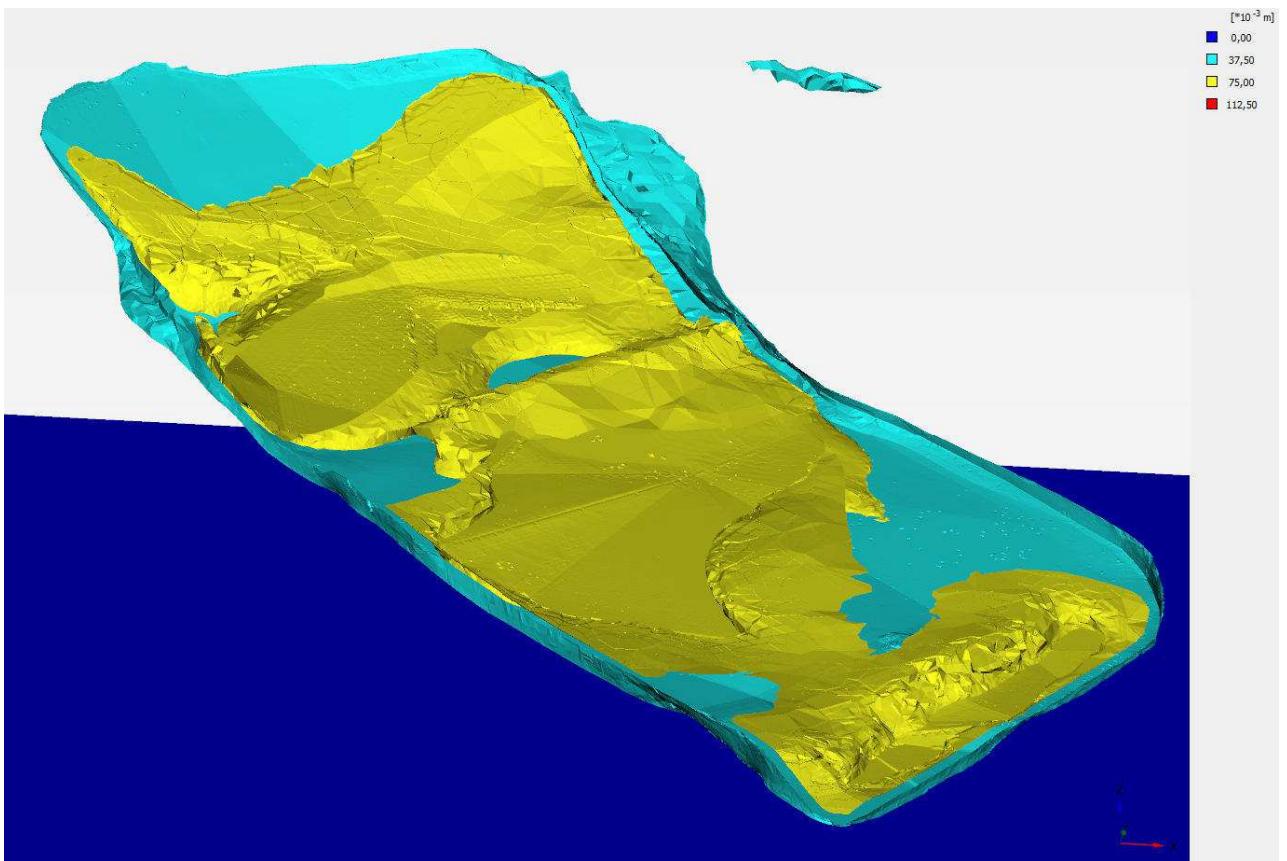
### 9.8.2 Analýza B (bez výsypky kamenolomu)

V této kapitole je demonstrován mechanismus porušení pro analýzu B (bez výsypky kamenolomu) při základních výpočtových parametrech. Způsob vyhodnocení je shodný s vyhodnocením deformačního mechanismu analýzy A.

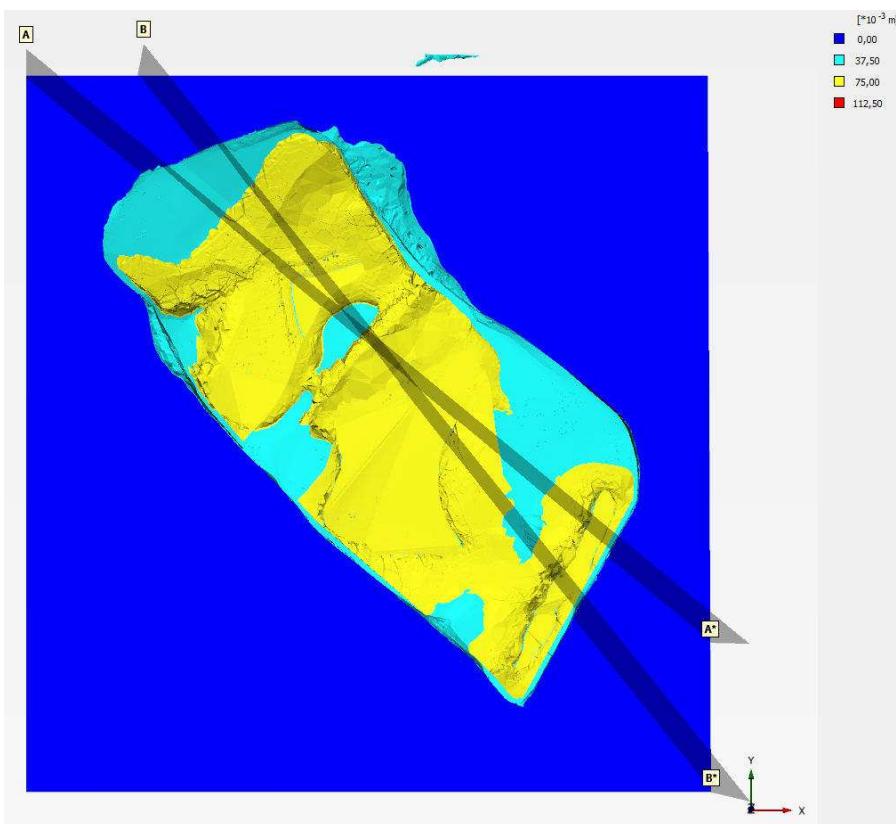
Smyková plocha je v tomto případě rovnoměrně aktivována, dochází k posunu materiálu sesuvu jako celku a lokální stupeň stability je přibližně shodný ve všech částech sesuvu. Porušení bylo ovšem spuštěno metodou redukce smykové tuhosti, při reálných parametrech je svah stabilní (více viz kapitola 9.9).



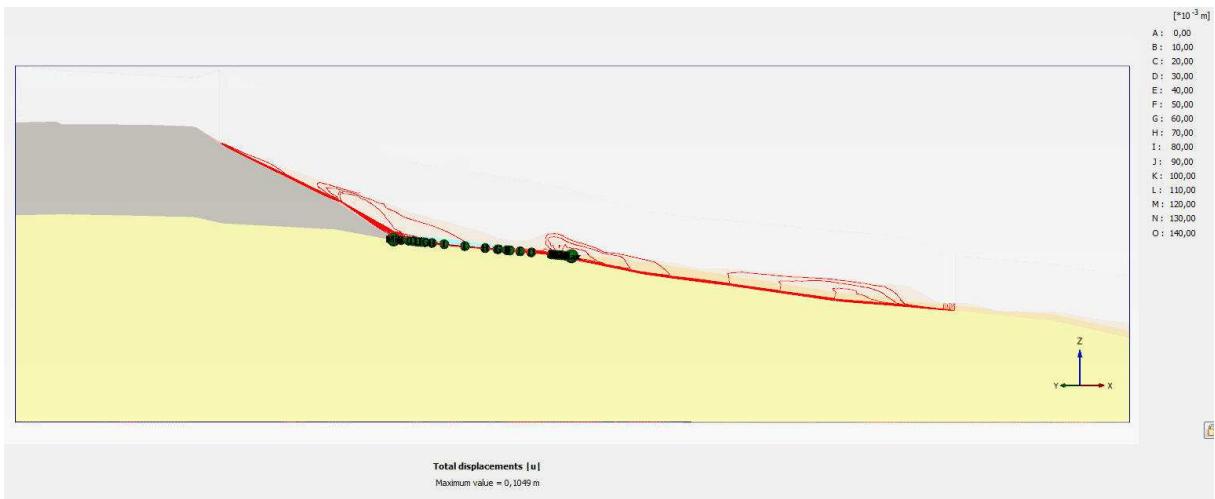
Obrázek 9.83: Model B (bez výsypky kamenolomu), deformace povrchu (přibližně 100x zvětšená).



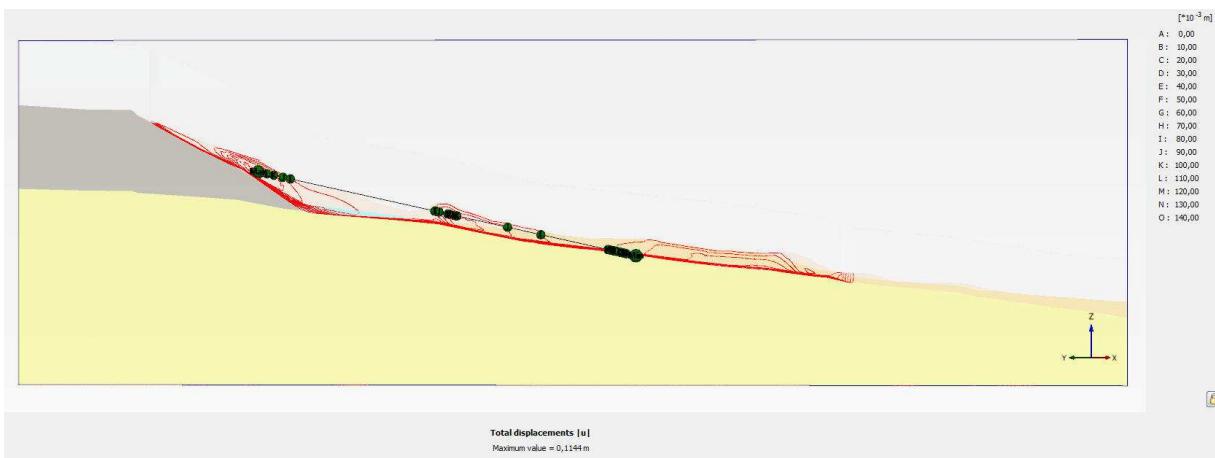
Obrázek 9.84: Model B (bez výsypky kamenolomu), izopovrchy deformací. Obrázek demonstruje rovnomořnou aktivaci smykové plochy.



Obrázek 9.85: Model B (bez výsypky kamenolomu), izopovrchy deformací a vedení řezu.



Obrázek 9.86: Model B (bez výsypky kamenolomu), řez 1 (řez A), izolinie deformací. Zřejmá je aktivace celé smykové plochy a přibližně rovnoměrné rozložení deformací.

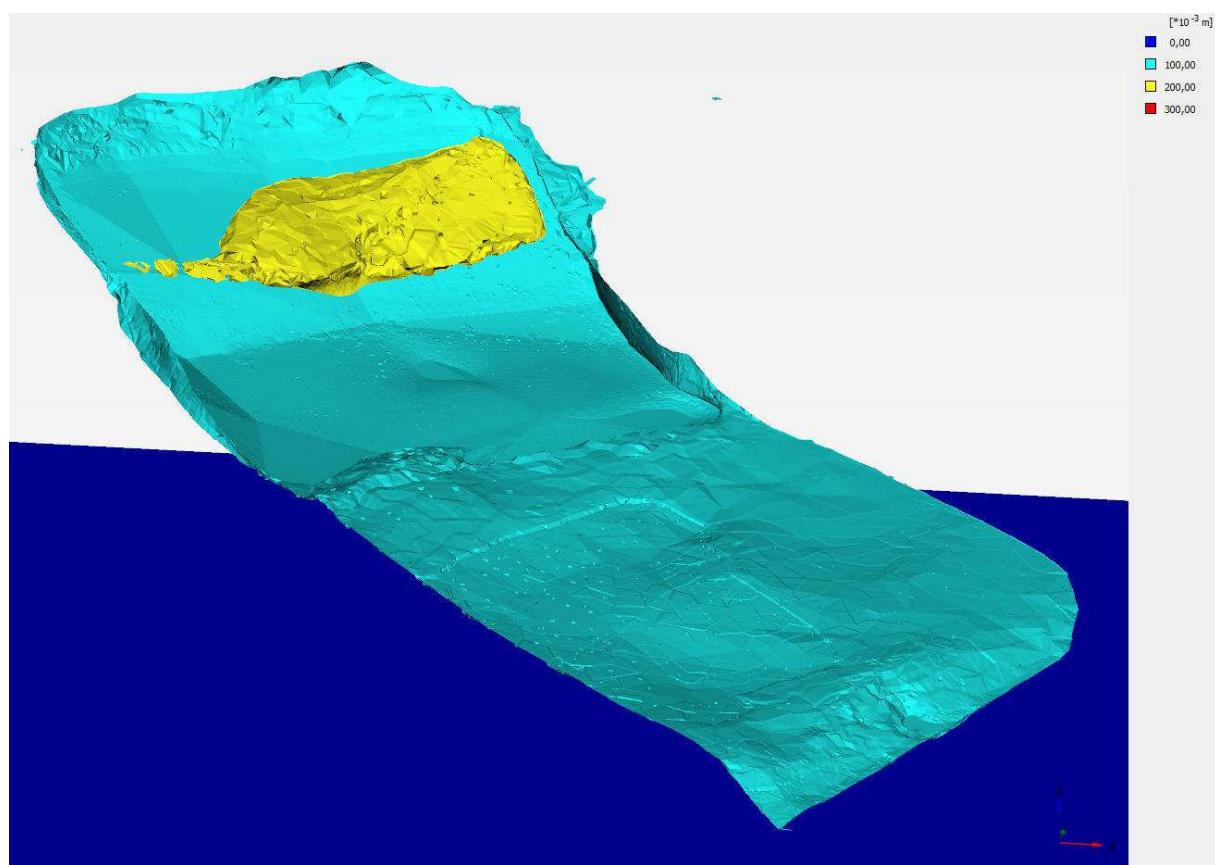


Obrázek 9.87: Model B (bez výsypky kamenolomu), řez 2 (řez B), izolinie deformací. Zřejmá je aktivace celé smykové plochy a přibližně rovnoměrné rozložení deformací.

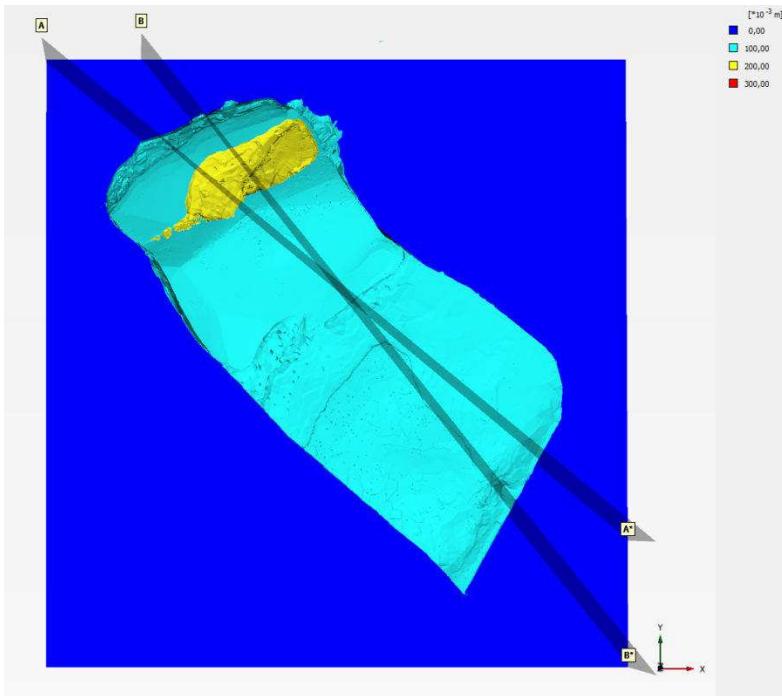
### 9.8.3 Analýza C (HPV na úrovni slínovce)

V této kapitole je demonstrován mechanismus porušení pro analýzu C (hladina podzemní vody na úrovni slínovce) při základních výpočtových parametrech. Způsob vyhodnocení je shodný s vyhodnocením deformačního mechanismu analýzy A.

Obrázek 9.88 indikuje, že spodní část smykové plochy (světle modrá barva) kopíruje povrch terénu. Výstup smykové plochy k povrchu terénu znamená, že se sesuv v tomto místě nenachází a její průběh při povrchu je vedlejším efektem využití metody povrchové vrstvy. Zemina má při povrchu terénu nulovou smykovou pevnost (díky nulové soudržnosti materiálu a nulové tíze povrchové vrstvy), proto část smykové plochy probíhající při povrchu neovlivňuje vypočtený stupeň stability. Spodní část svahu je tedy v tomto případě stabilní a vypočtený stupeň stability odpovídá porušení horní prudké části svahu pokryté deluviálními sutěmi a sutěmi výsypek kamenolomu.



Obrázek 9.88: Model C (hladina podzemní vody na úrovni slínovce), izopovrchy deformací. Je zřejmé, že v tomto případě je aktivována pouze horní část smykové plochy a vypočtený stupeň stability reprezentuje sesuv v deluviálních sutích a lomovém kamenivu v horní části svahu.



Obrázek 9.89: Model C (HPV na úrovni slínovce), izopovrchy deformací a vedení řezů.



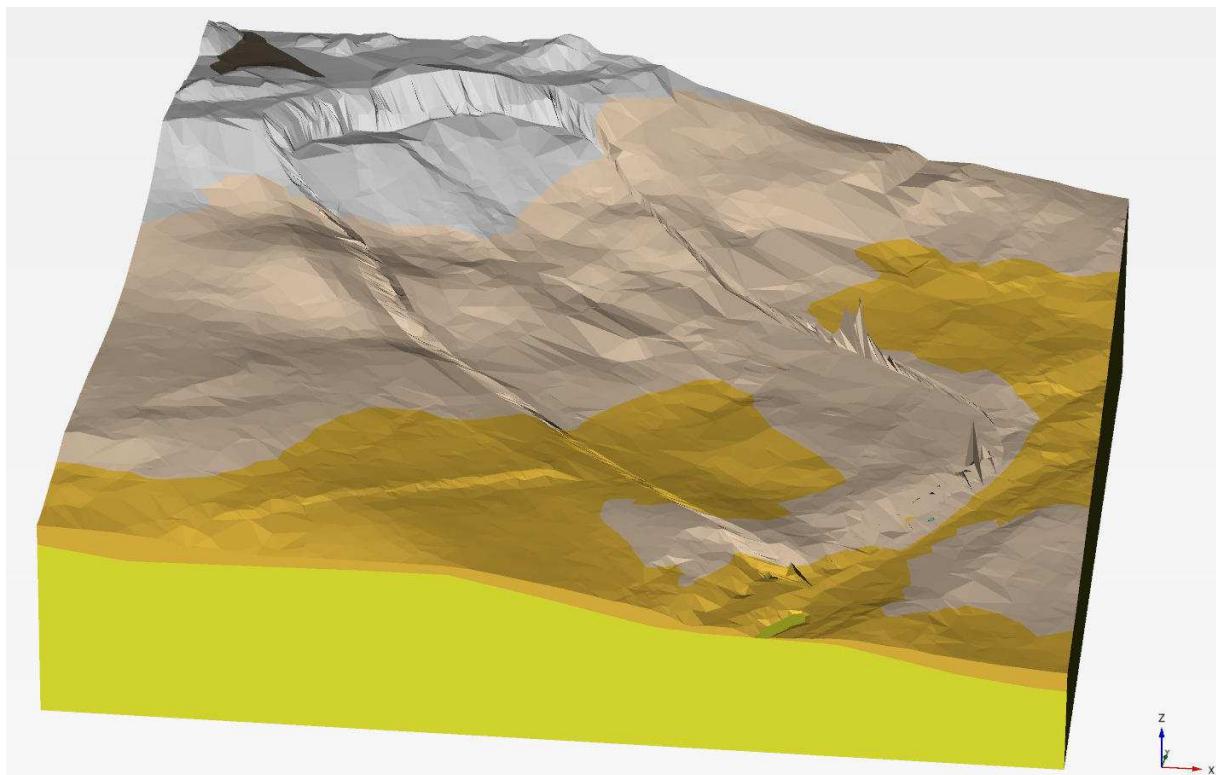
Obrázek 9.90: Model C (HPV na úrovni slínovce), řez 1 (řez A), izolinie deformací. Zřejmý sesuv pouze horní části svahu.



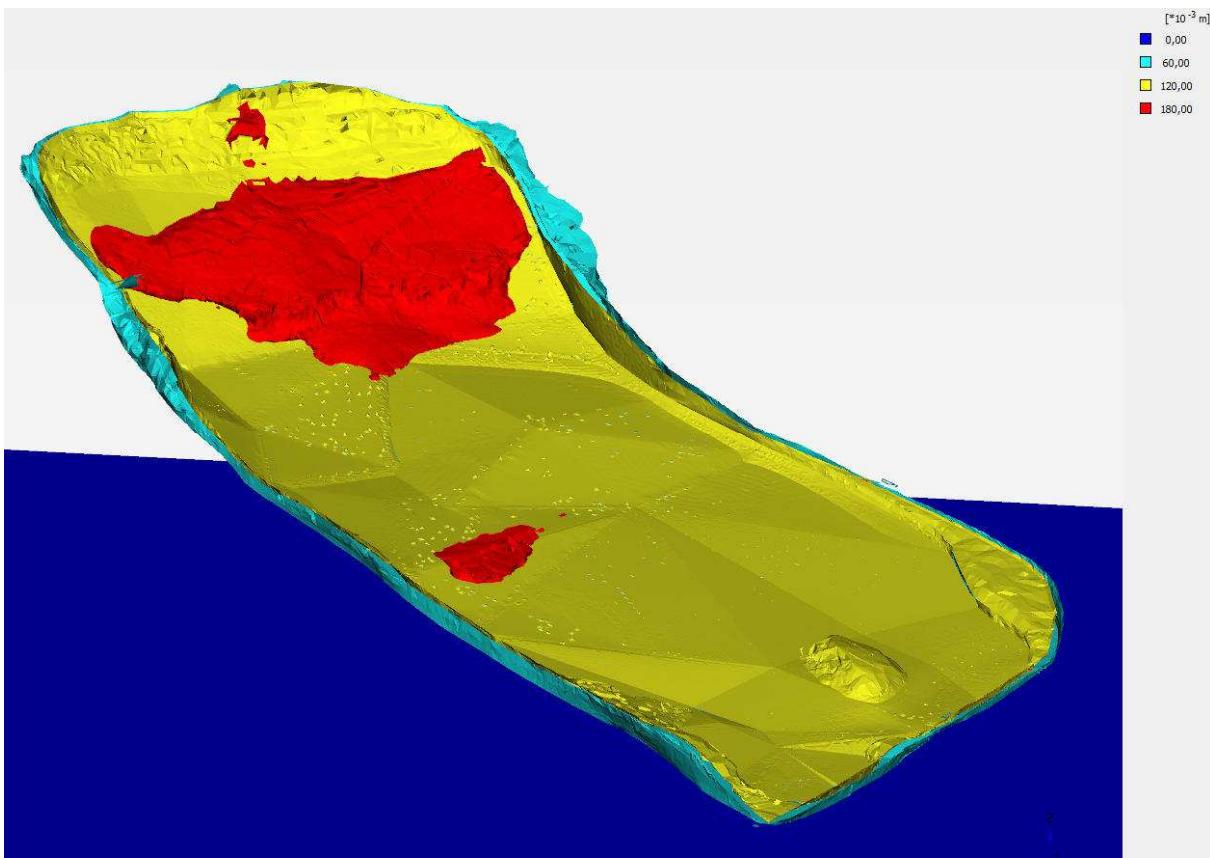
Obrázek 9.91: Model C (HPV na úrovni slínovce), řez 1 (řez A), izolinie deformací. Zřejmý sesuv pouze horní části svahu.

#### 9.8.4 Analýza D (bez náspu železnice)

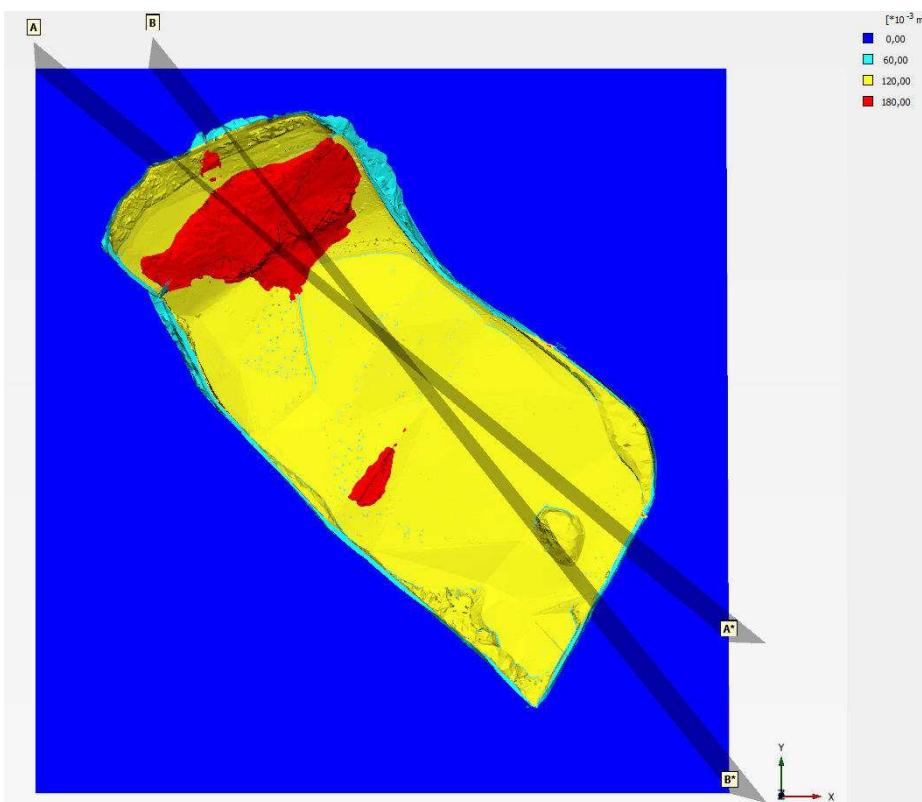
Analýza D reprezentuje situaci bez železničního náspu při základních výpočtových parametrech. Obrázek 9.92 reprezentuje deformovaný model terénu. Obrázky 9.93 až 9.96 pak indikují, že v tomto případě je celá smyková plocha mobilizovaná, vypočtený stupeň stability tedy reprezentuje stupeň stability sesuvu v celém rozsahu sesuvu vzniklého na D8.



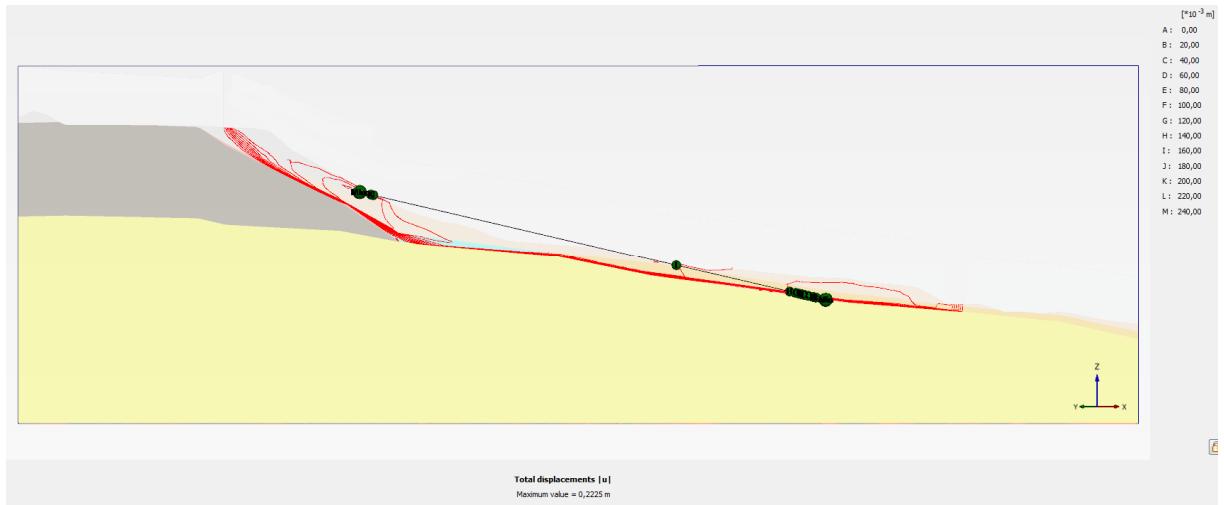
Obrázek 9.92: Model D (bez náspu železnice), deformace povrchu (přibližně 100x zvětšená).



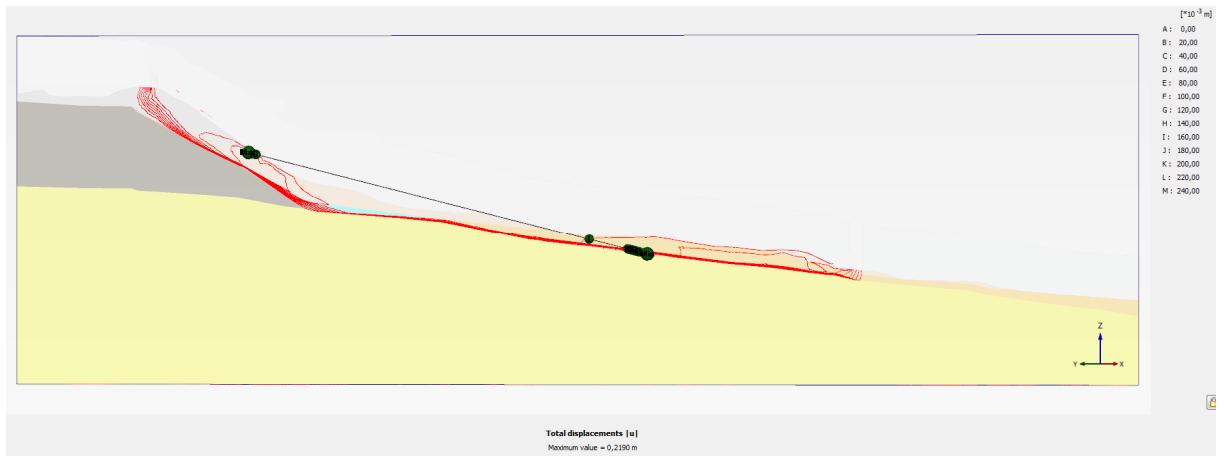
Obrázek 9.93: Model D (bez náspu železnice), izopovrchy deformací. V tomto případě je celá smyková plocha mobilizovaná.



Obrázek 9.94: Model D (bez náspu železnice), izopovrchy deformací a vedení řezů.



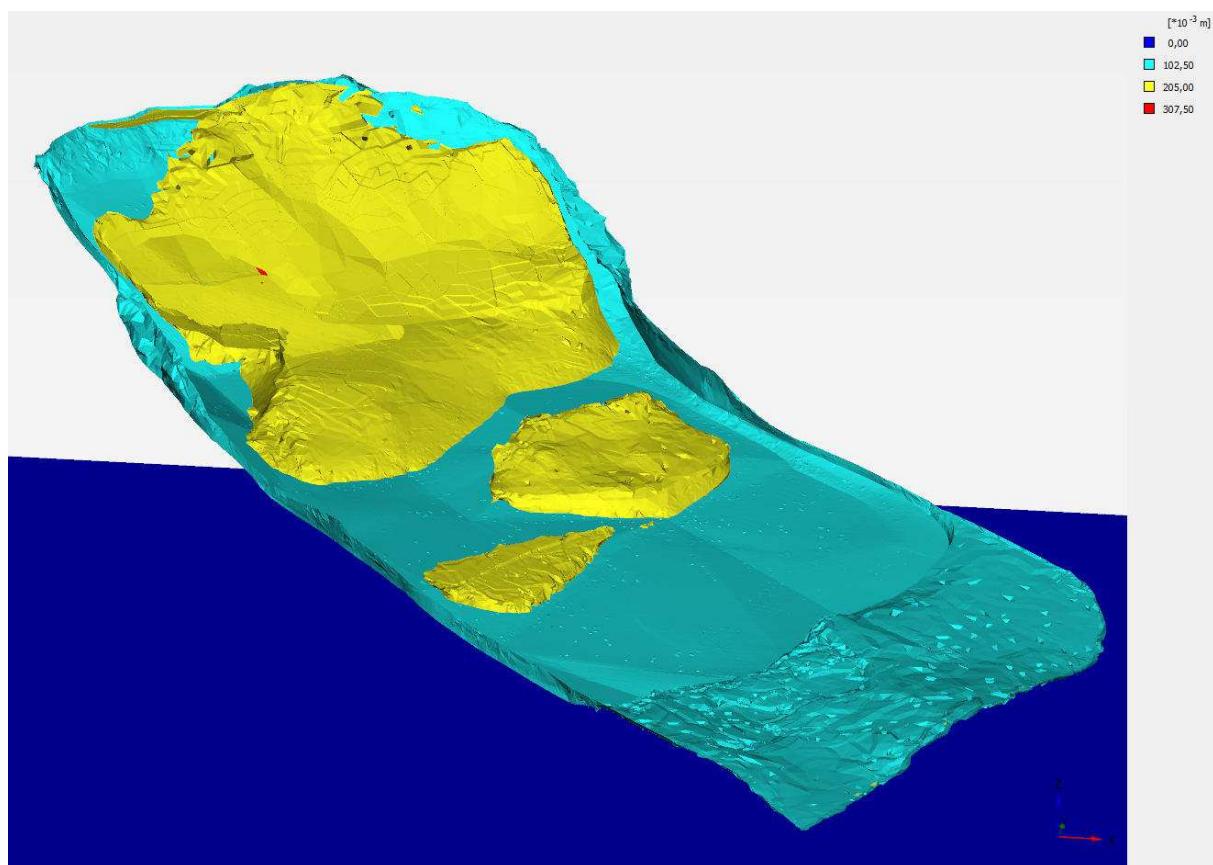
Obrázek 9.95: Model D (bez náspu železnice), řez 1 (řez A), izolinie deformací demonstrující rovnoměrnou aktivaci smykové plochy.



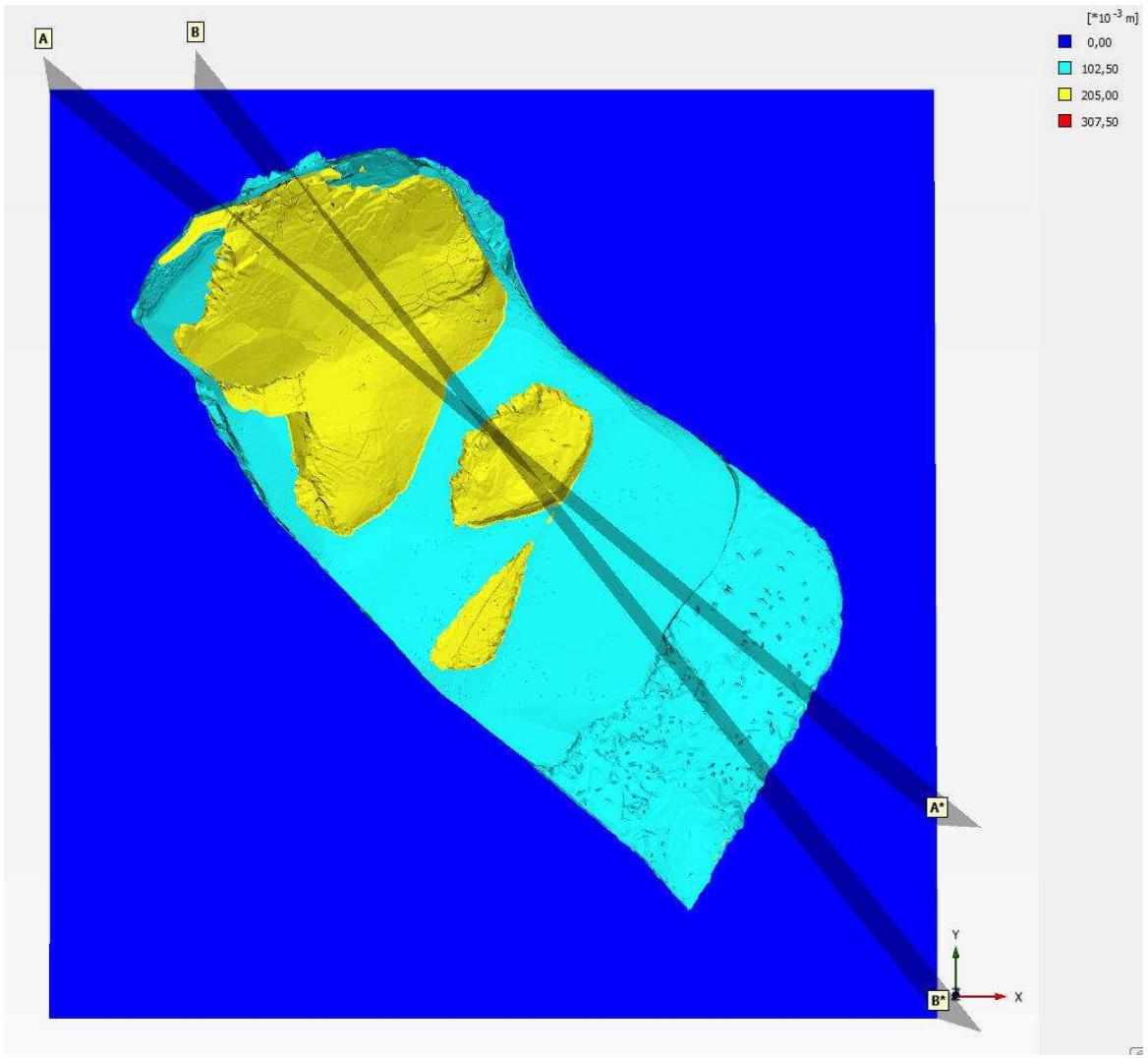
Obrázek 9.96: Model D (bez náspu železnice), řez 2 (řez B), izolinie deformací demonstrující rovnoměrnou aktivaci smykové plochy.

### 9.8.5 Analýza E (bez zářezu dálnice), základní parametry

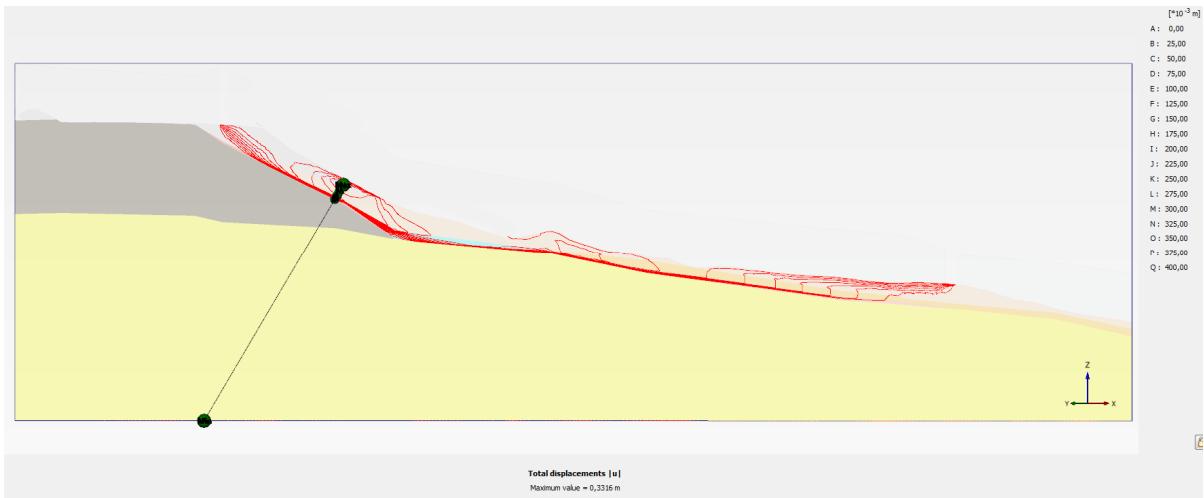
Výsledky analýzy E (bez zářezu dálnice) jsou na obrázcích 9.97 až 9.100. Z izolinii deformací na obrázku 9.97 je zřejmé, že charakter deformace je obdobný analýze A s tím rozdílem, že sesuv je přibližně o 70 m kratší (přesná hodnota je ovšem zatíženou nejistotou pramenící ze zjednodušení modelů oproti realitě).



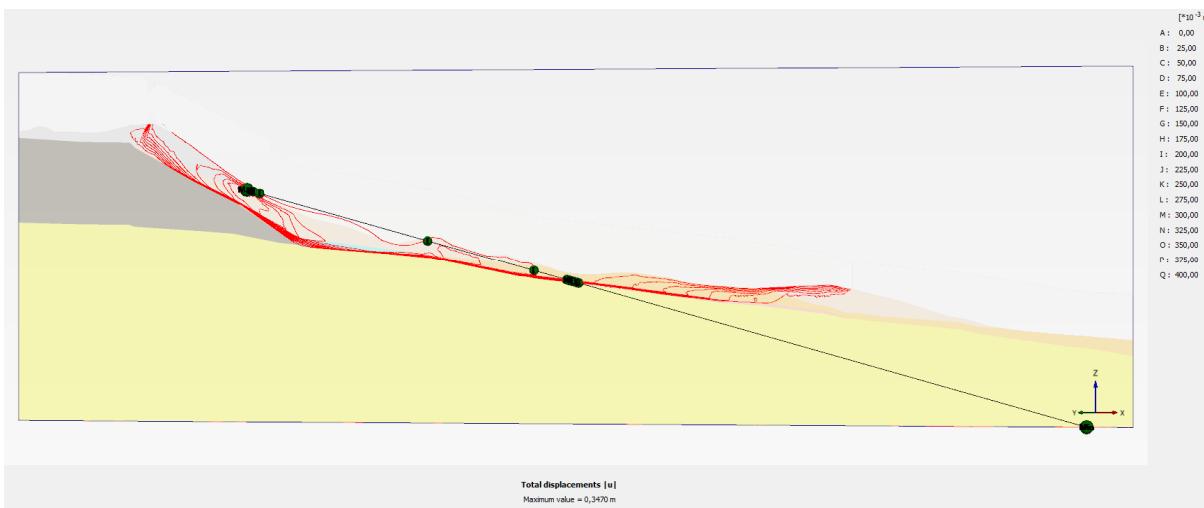
Obrázek 9.97: Model E (bez zářezu dálnice), izopovrchy deformací. Obrázek ukazuje sesuv, který je přibližně o 70 m kratší oproti analýze A.



Obrázek 9.98: Model E (bez zářezu dálnice), izopovrchy deformací a vedení řezů.



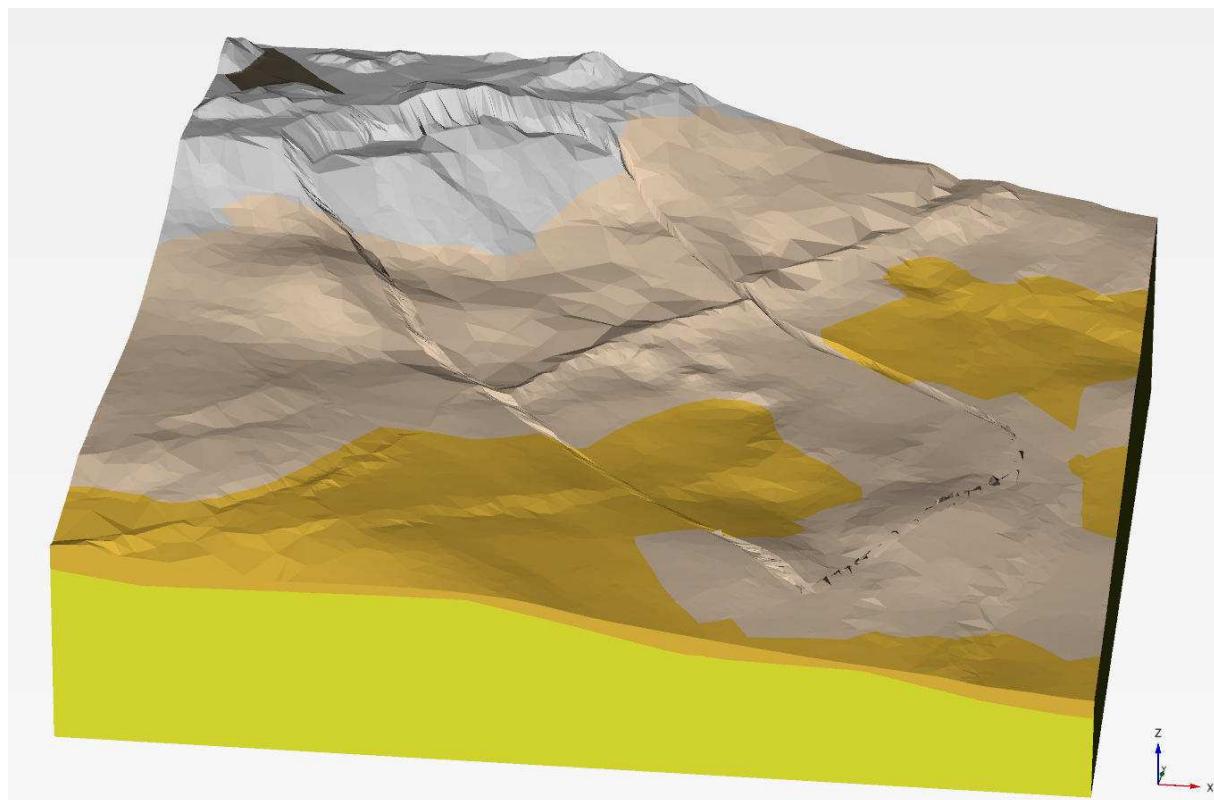
Obrázek 9.99: Model E (bez zářezu dálnice), řez 1 (řez A), izolinie deformací demonstrující zkrácení sesuvu v případě absence zářezu dálnice.



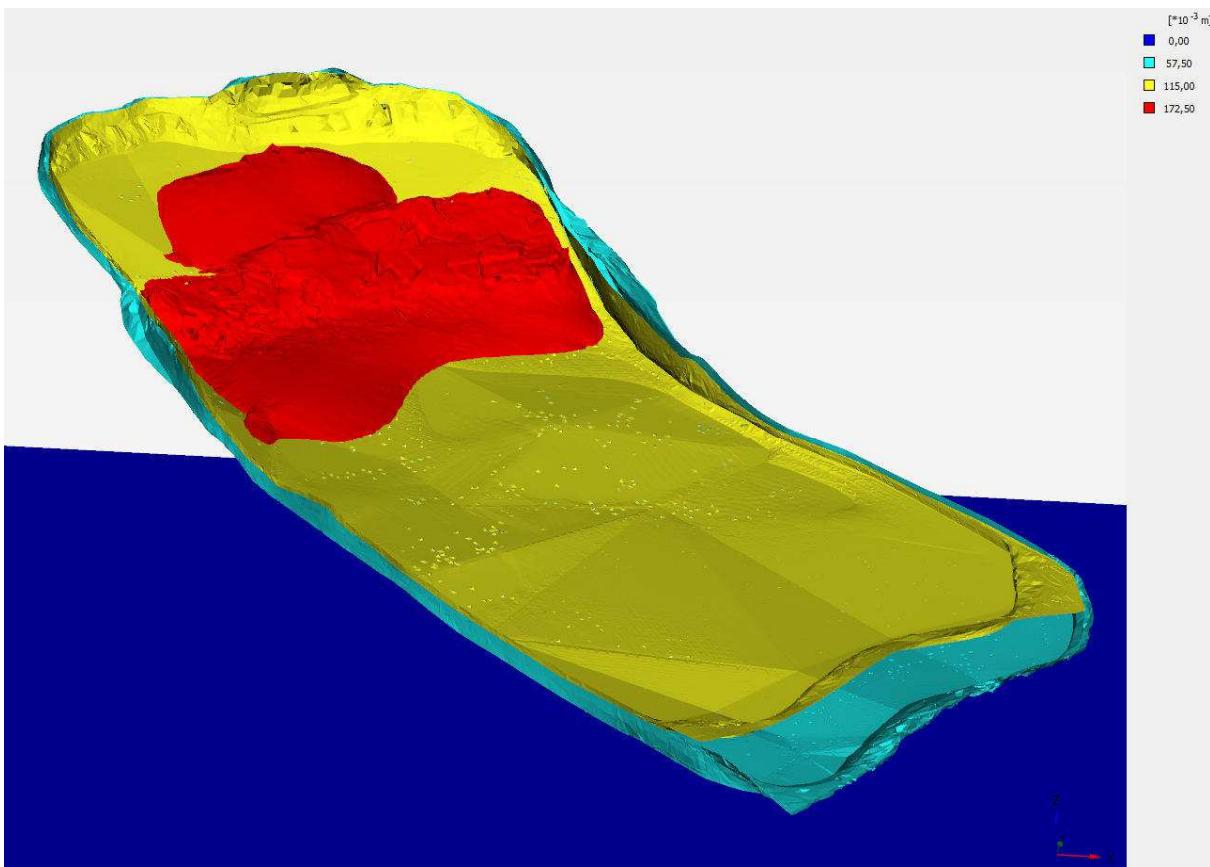
Obrázek 9.100: Model E (bez zářezu dálnice), řez 2 (řez B), izolinie deformací demonstrující zkrácení sesuvu v případě absence zářezu dálnice.

#### 9.8.5 Analýza E (bez zářezu dálnice), deluviální sedimenty $c=30$ kPa

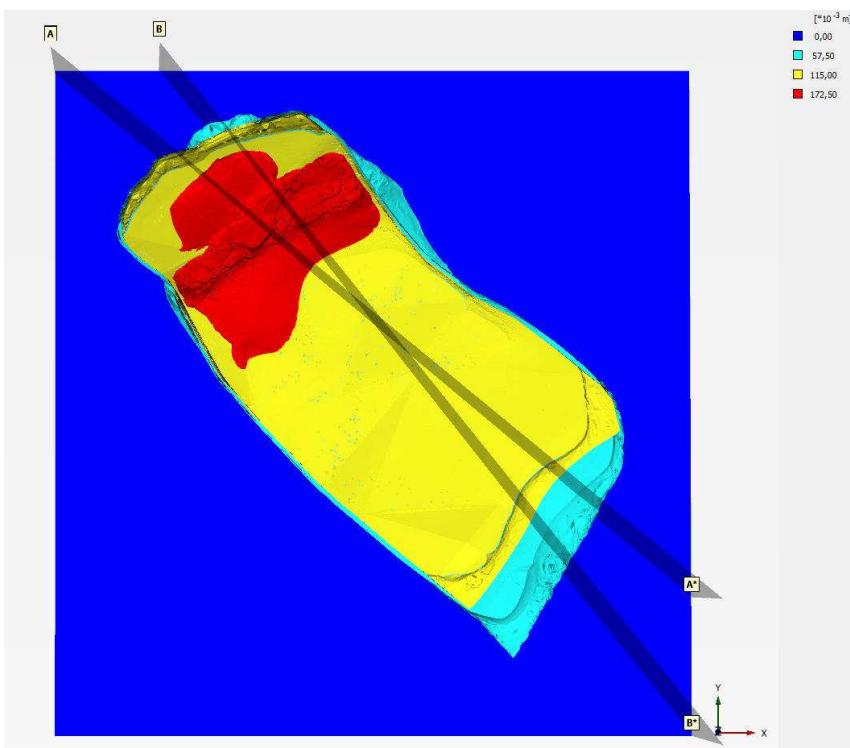
Analýza E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30$  kPa) je obdobou základní analýzy E, s tím rozdílem, že zvýšená (nerealistická) soudržnost kvazihomogenních celků I, II a II zamezí výstupu smykové plochy ve spodní části k povrchu a je tak studován stupeň stability odpovídající současnému rozsahu sesuvu. Aktivace celé smykové plochy je zřejmá z obrázků 9.101 až 9.105.



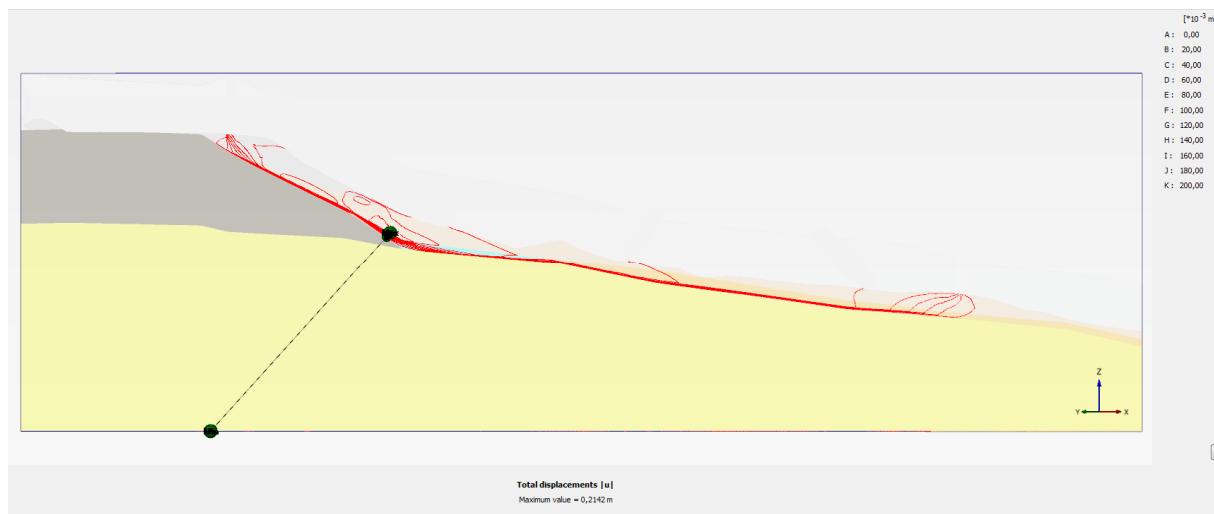
Obrázek 9.101: Model E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30$  kPa), deformace povrchu (přibližně 100x zvětšená).



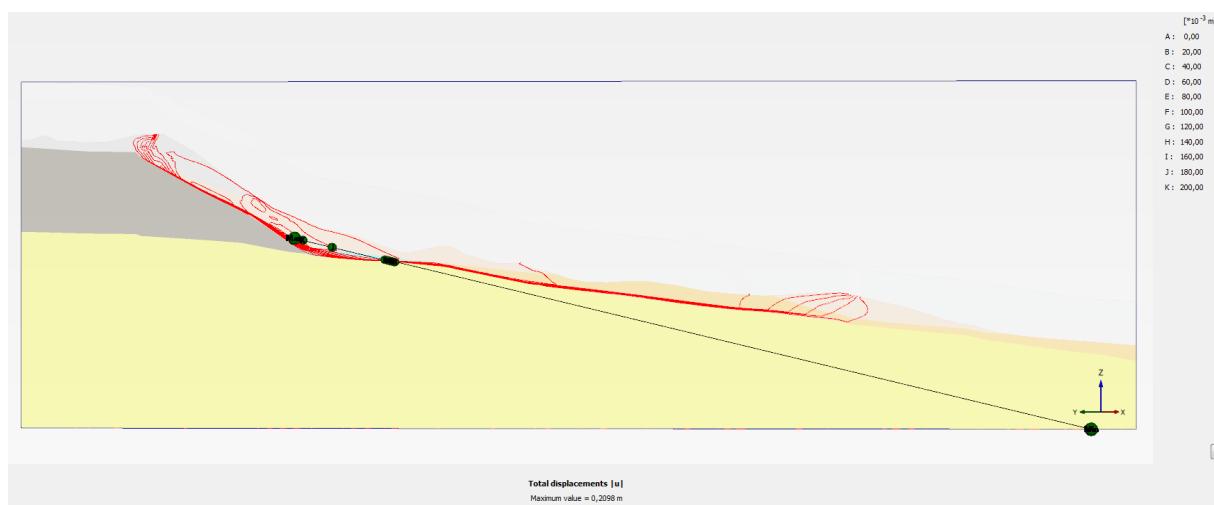
Obrázek 9.102: Model E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ ), izopovrchy deformací. Zobrazení demonstruje aktivaci smykové plochy v celém rozsahu.



Obrázek 9.103: Model E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ ), izopovrchy deformací a vedení řezů.



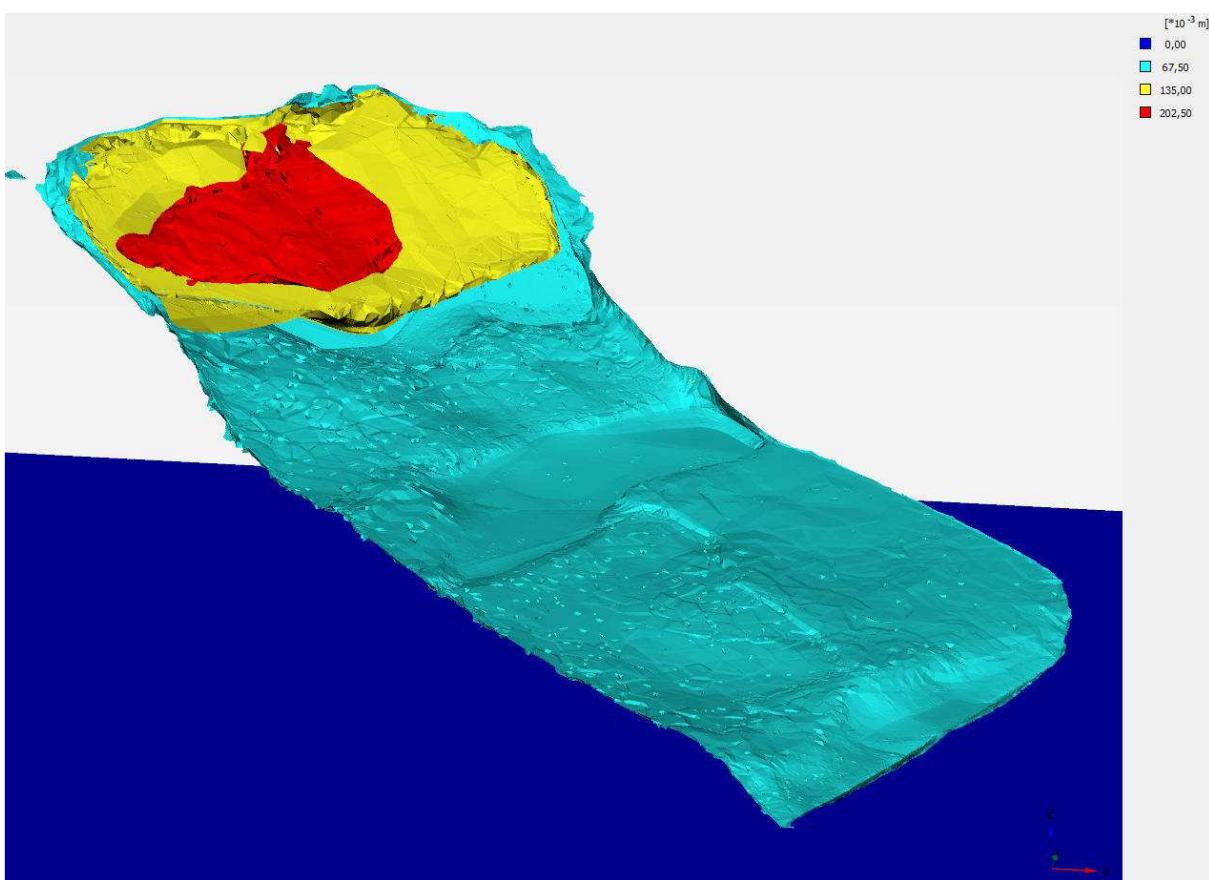
Obrázek 9.104: Model E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ ), řez 1 (řez A), izolinie deformací demonstrující aktivaci celé smykové plochy.



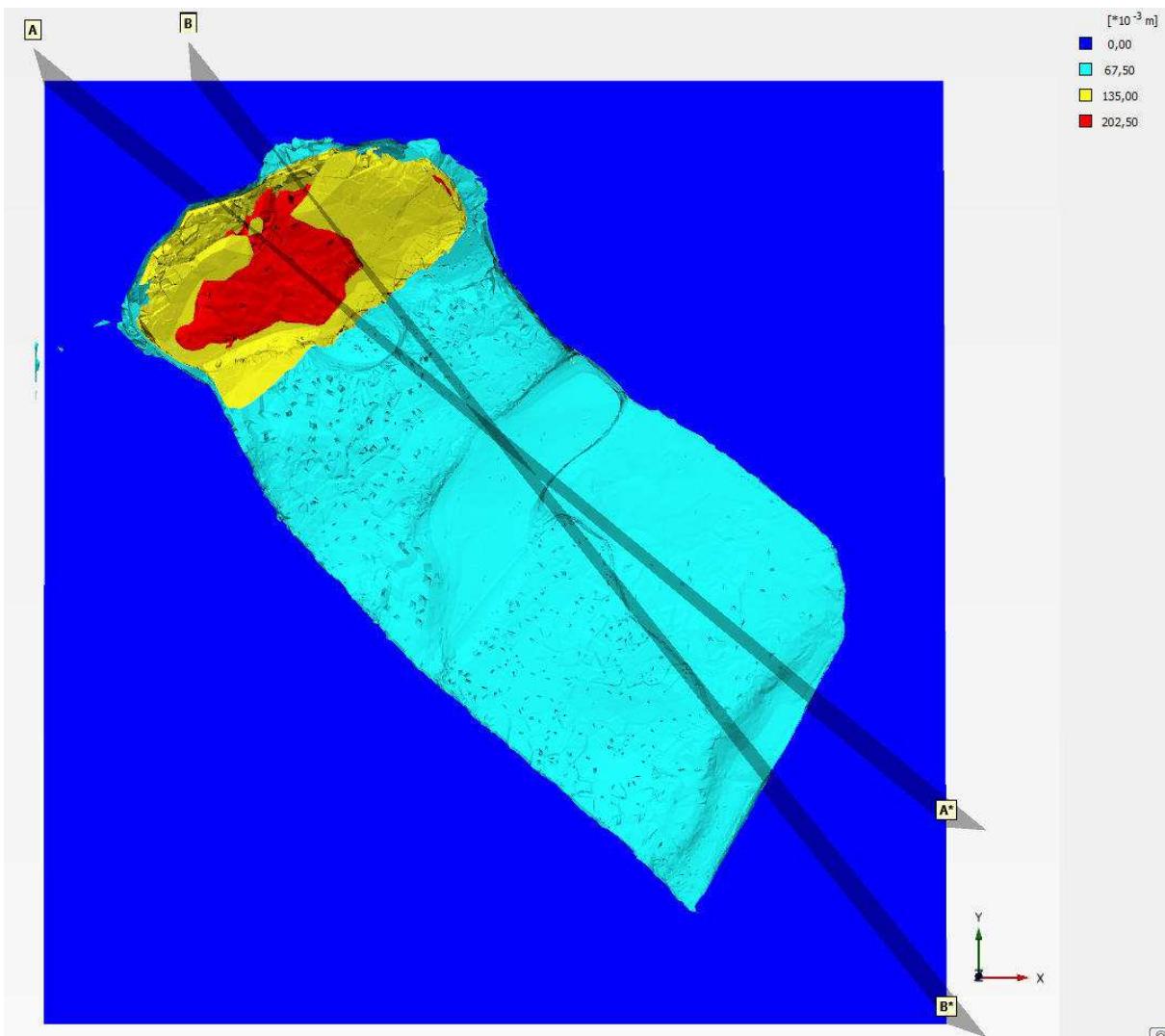
Obrázek 9.105: Model E (bez zářezu dálnice, deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ ), řez 2 (řez B), izolinie deformací demonstrující aktivaci celé smykové plochy.

#### 9.8.6 Analýza F (smyková plocha kritické parametry)

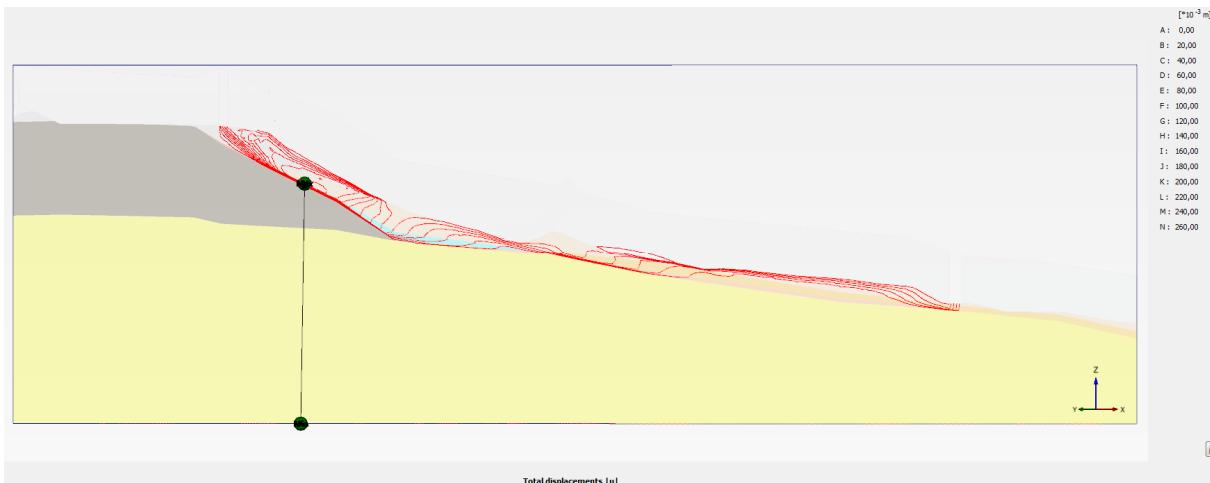
Výsledky pro analýzu F, ve které jsou na smykové ploše uvažovány kritické parametry místo reziduálních, jsou na obrázcích 9.106 až 9.109. V tomto případě je svah stabilní. Pokud dojde k inicializaci sesuvu redukcí smykové pevnosti, sesuv dle očekávání nesleduje konkrétní smykovou plochu, ale dochází ke komplexnímu přetváření celého tělesa sesuvu. V určitých úsecích ve spodní plošší části svahu nevzniká (tzn. v modelu smyková plocha probíhá při povrchu terénu). Obrázky také ukazují na nižší lokální stupeň stability horní prudší části, která má tendenci ke kolapsu, jemuž je zabráněno jen díky aplikaci metody povrchové vrstvy. Tato zjištění jsou zřejmá z obrázků 9.106 až 9.109.



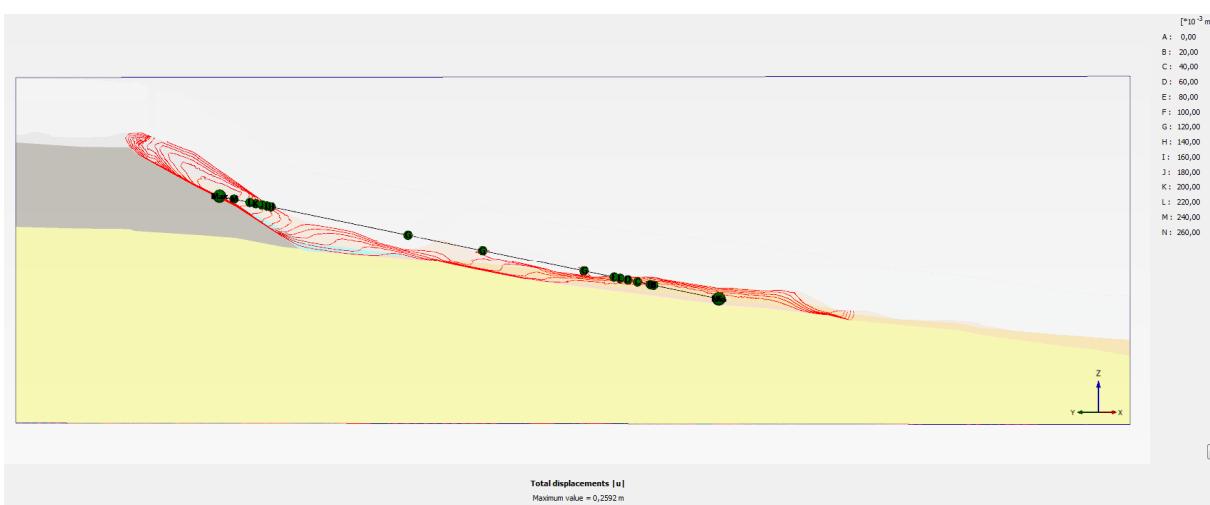
Obrázek 9.106: Model F (smyková plocha kritické parametry), izopovrchy deformací. Zobrazení demonstruje komplexní přetváření celého svahu bez vzniku jasně vymezeného sesuvu a smykové plochy.



Obrázek 9.107: Model F (smyková plocha kritické parametry), izopovrchy deformací a vedení řezů.



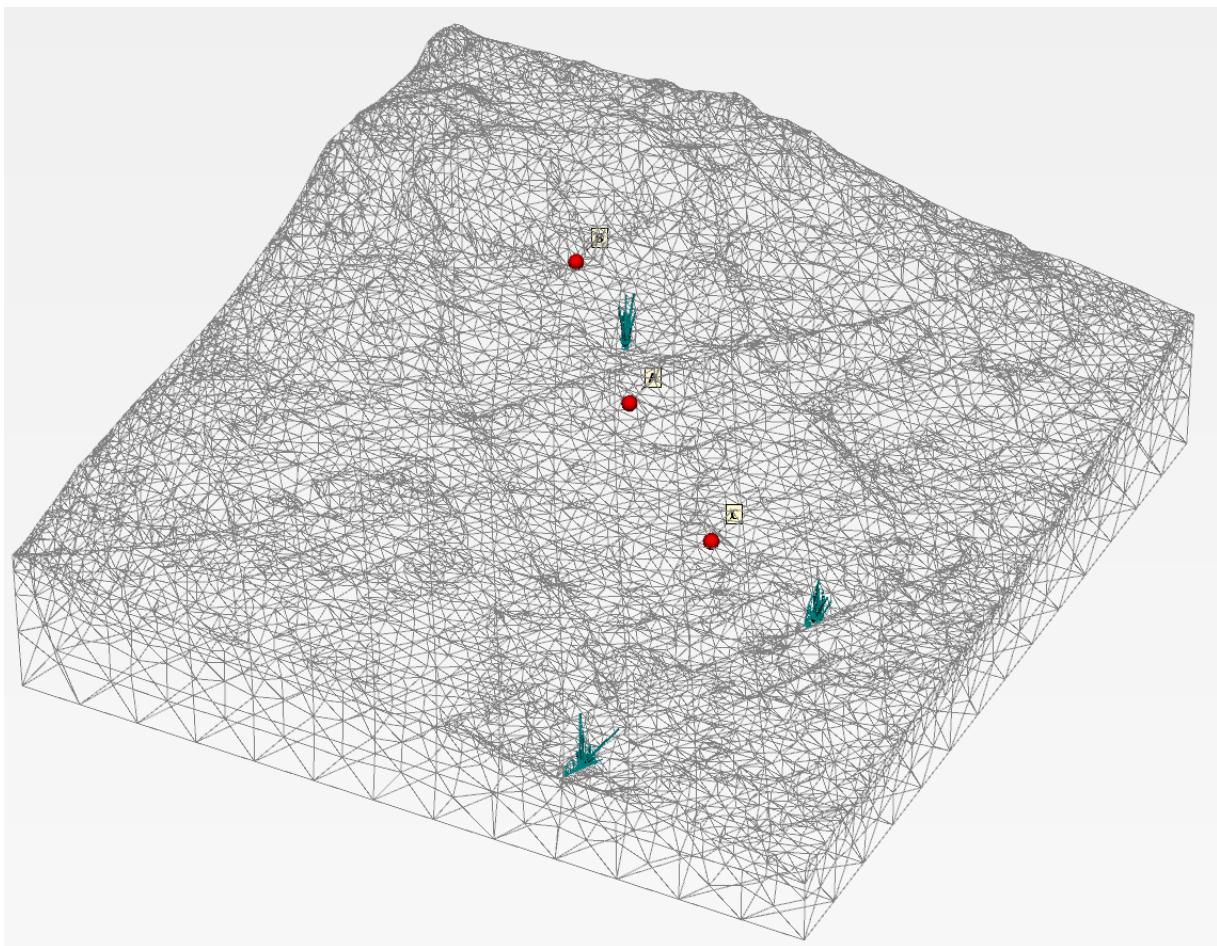
Obrázek 9.108: Model F (smyková plocha kritické parametry), řez 1 (řez A), izolinie deformací demonstrující komplexní přetváření svahu bez vzniku jasně vymezené smykové plochy.



Obrázek 9.109: Model F (smyková plocha kritické parametry), řez 2 (řez B), izolinie deformací demonstrující komplexní přetváření svahu bez vzniku jasně vymezené smykové plochy.

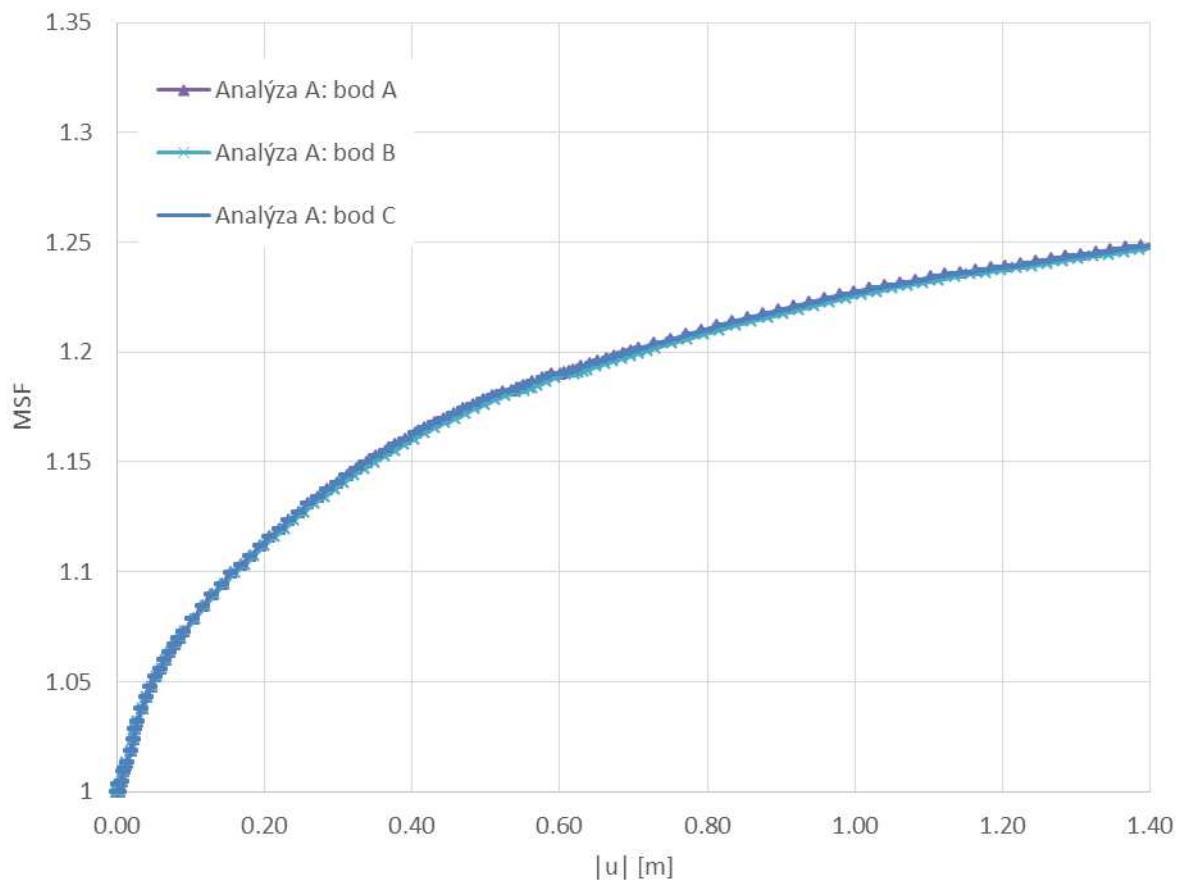
## 9.9 3D modely – Vyhodnocení stability

Při využití metody redukce smykové pevnosti (kapitola 9.4.1) dochází k postupnému snižování pevnostních charakteristik  $c$  a  $\tan(\phi)$  během předem definovaného počtu kroků. V každém kroku dochází k inkrementálnímu snížení  $c$  a  $\tan(\phi)$ , což vede k tomu, že v některých integračních bodech na smykové ploše dojde k dosažení podmínky porušení a tedy zvýšení deformace materiálu. Výsledkem této metody je křivka závislosti posunu určitého bodu v sesuvné oblasti na hodnotě redukčního součinitele MSF. Pro postprocessing byly zvoleny tři body: A (lokální souřadnice -175,8; -62,8; 325,8), B (lokální souřadnice -246,1; 15,2; 348,7) a C (lokální souřadnice -96,4; -130,5; 310,9). Jejich pozice je zřejmá z obrázku 9.110.



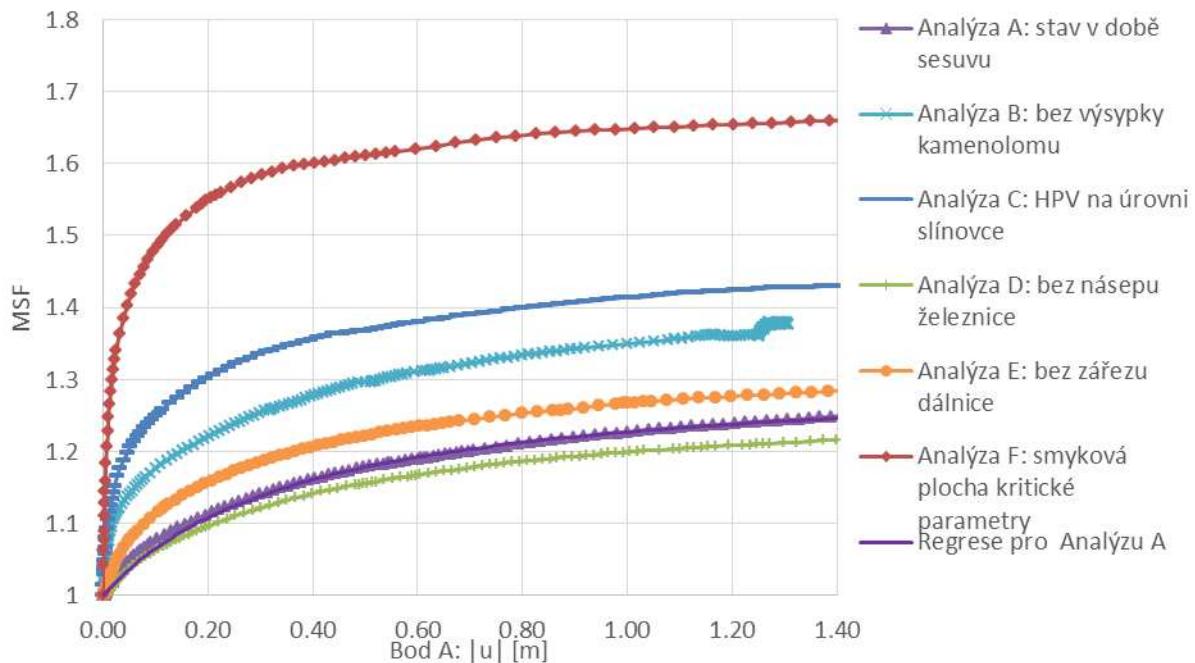
Obrázek 9.110: Pozice bodů A, B a C využitých pro postprocessing.

Při využití metody povrchové vrstvy dochází k rovnoměrnému pohybu bodů na povrchu sesuvu, pouze s malými rozdíly mezi jednotlivými místy způsobenými konečnou elastickou tuhostí povrchové vrstvy. Tento fakt je demonstrován v grafu na obrázku 9.111, který zobrazuje výsledky analýzy A pro body A, B a C. Protože výsledné hodnoty faktoru MSF nejsou volbou bodu pro postprocessing ovlivněny, budou dále výsledky studovány pouze pro centrální bod A.



Obrázek 9.111: Křivky závislosti celkových posunů v bodech A, B a C na MSF pro analýzu A.

Křivky závislosti celkového posunu v bodě A na hodnotě MSF jsou v grafu na obrázku 9.112. Je zřejmé, že se křivka závislosti hodnoty MSF na posunu v bodě A postupně ustaluje, nedochází ale k úplnému ustálení hodnoty MSF. Tento jev je pravděpodobně způsoben 3D efekty, které vedou ke kinematickému omezení pohybu na jednotlivých částech smykové plochy a neumožní tak volný skluz pohyb sesuvu ani při nižších pevnostních parametrech. Hodnoty FSc byly vyhodnoceny pro hodnotu deformací  $|u|=1$  m, při nichž dochází k ustálení normalizovaného stupně stability (viz dále). Vypočtené hodnoty FSc jsou shrnuty v tabulce 9.11.

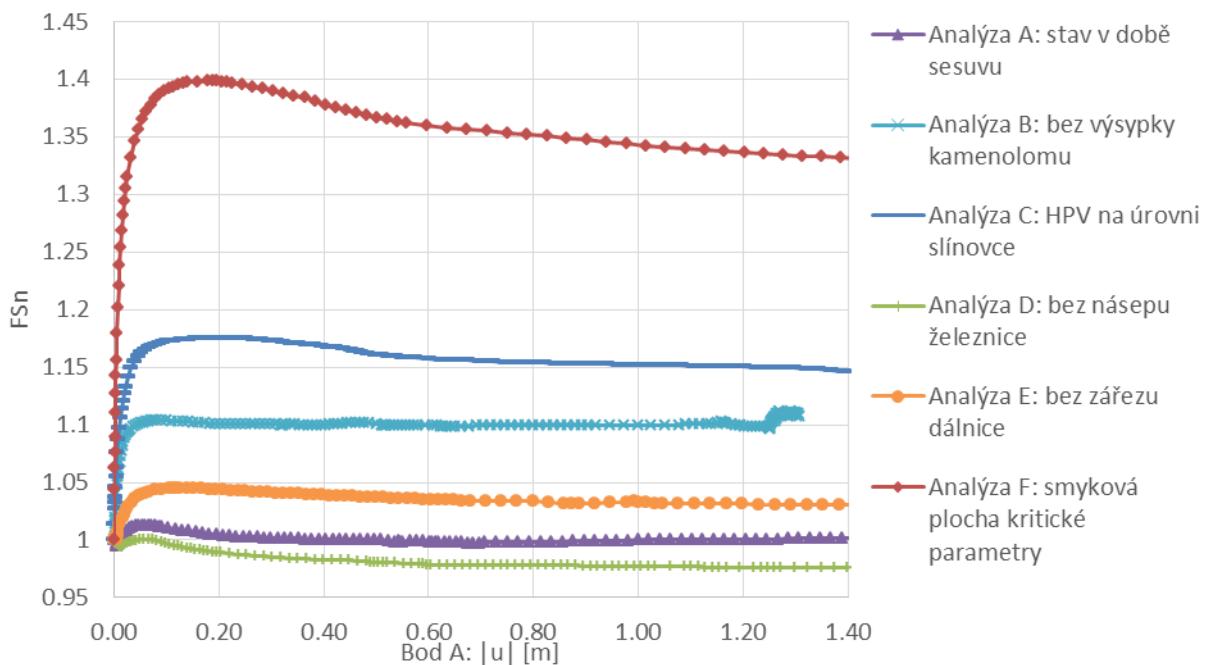


Obrázek 9.112: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na MSF pro všechny základní analýzy.

Graf na obrázku 9.112 indikuje rozdílné stupně stability pro jednotlivé analýzy. Pro kvantifikaci tohoto rozdílu je využit tzv. normalizovaný stupeň stability FSn. Při jeho výpočtu je využíváno faktu, že skutečný stupeň stability analýzy A je roven jedné (více viz kapitola 9.4.5). Pokud se vypočtená hodnota FSc liší od 1 je to způsobeno nevyhnutelnými nepřesnostmi v modelu. Pro výpočet normalizovaného stupně stability FSc byla křivka analýzy A v obrázku 9.112 approximována rovnicí hyperboly

$$MSF = 1 + \frac{|u|}{\alpha + b|u|}$$

s koeficienty  $a$  a  $b$ , které pro analýzu A měly hodnoty  $a=1,2$  a  $b=3,2$ . Tato křivka je v obrázku 9.112 označena jako „Regresce pro analýzu A“. V následujícím obrázku 9.113 jsou prezentovány hodnoty MSF pro jednotlivé analýzy normalizované hodnotou MSF vypočtenou regresí analýzy A.



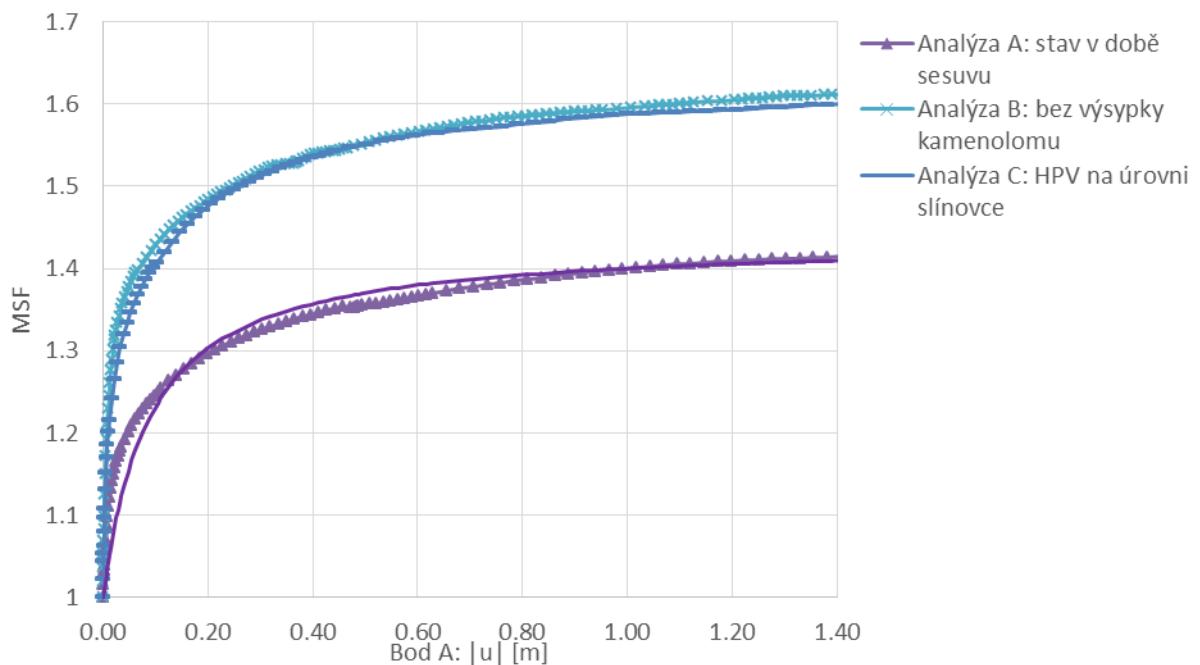
Obrázek 9.113: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na FSn pro všechny základní analýzy.

Obrázek 9.113 ukazuje, že po počáteční fázi posunu dochází k ustálení hodnot FSn. Jako výsledek analýz se využila hodnota FSn odpovídající posunům  $|u|=1$  m (shrnutí výsledků uvedené tabulka 9.12 dále v textu).

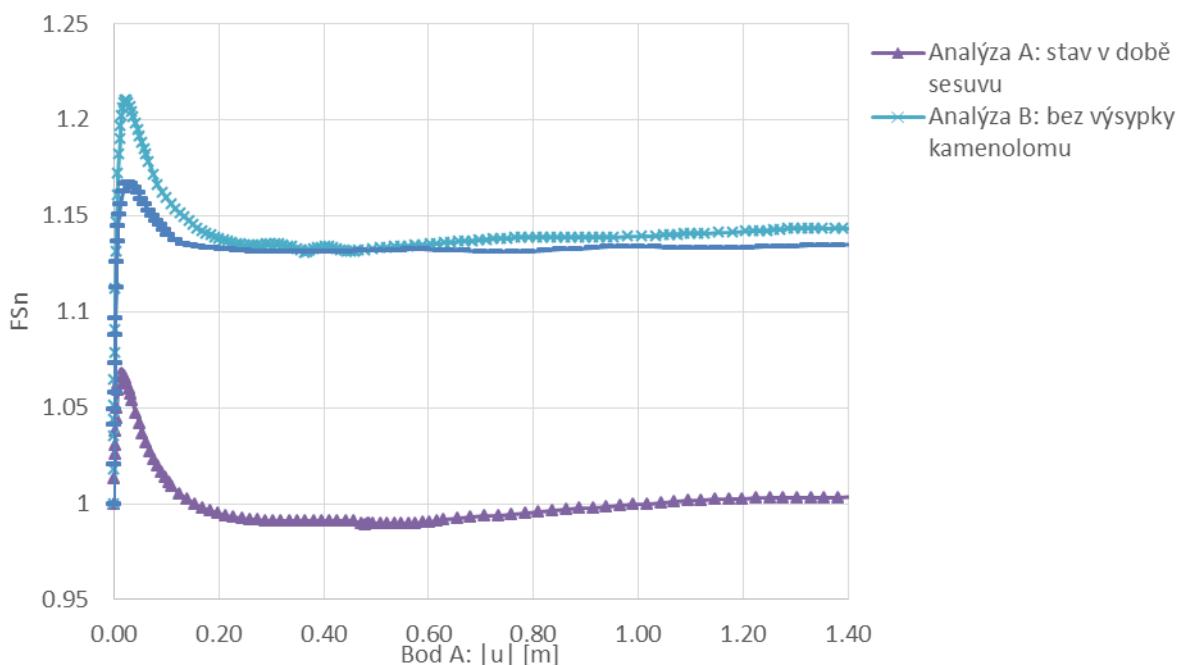
Jak bylo diskutováno v kapitole 9.3, ohledně parametrů smykové plochy existuje nejistota: mohou totiž dosahovat hodnot v rozmezí mezi kritickými a reziduálními, v závislosti na velikosti pohybu na smykové ploše v historii, který není možné kvantifikovat. Proto se přistoupilo k parametrickým studiím vlivu nejistoty těchto parametrů na výsledky výpočtů. Parametrické studie jsou shrnuty v tabulce 9.10. Parametrické studie se provedly pouze pro zvolené analýzy, jak je popsáno dále v textu.

Tabulka 9.10: Shrnutí parametrických studií.

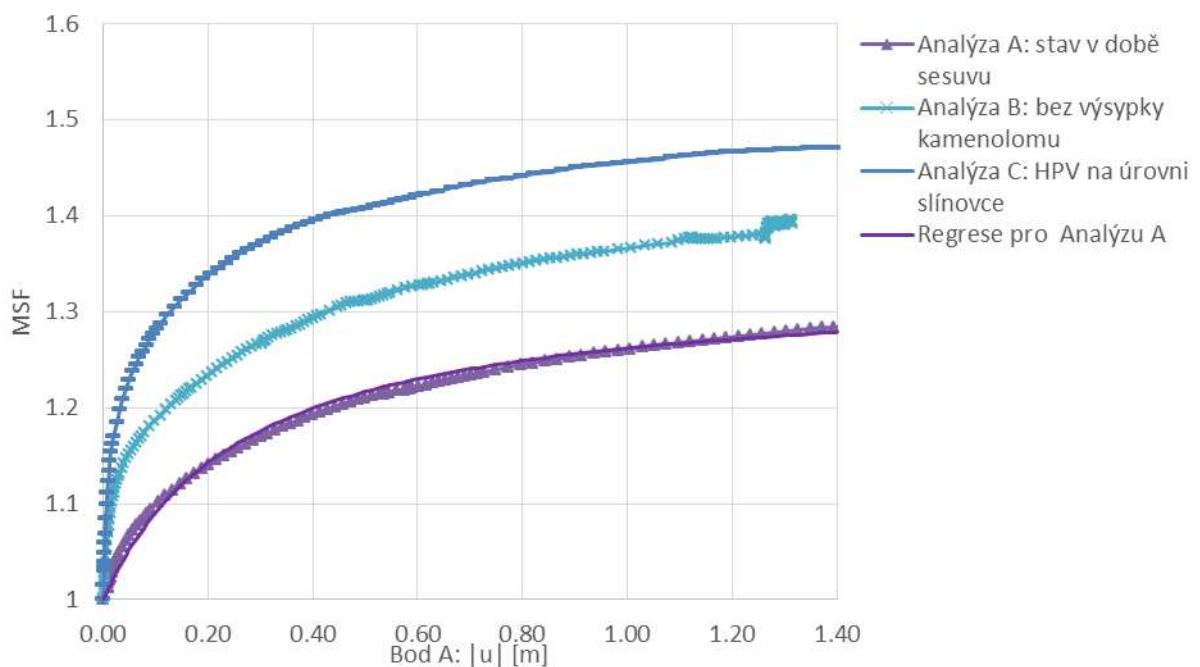
Označení analýzy	Popis analýzy
smyková plocha $\varphi=19^\circ$	Kvazihomogenní celky IV a V jsou charakterizovány zvýšeným úhlem vnitřního tření $\varphi=19^\circ$ oproti standardně uvažovanému $\varphi=15^\circ$ .
kontakt bazalt - kamenivo $\varphi=28^\circ$	Kvazihomogenní celek VIII má uvažován úhel vnitřního tření $\varphi=28^\circ$ oproti standardně uvažovanému $\varphi=24^\circ$ .
deluviální sedimenty $c=30$ kPa	Kvazihomogenní celky I, II a III (deluviální sedimenty a výsypka kamenolomu) mají uvažovanou zvýšenou soudržnost $c=30$ kPa oproti standardně uvažované soudržnosti 0 kPa.



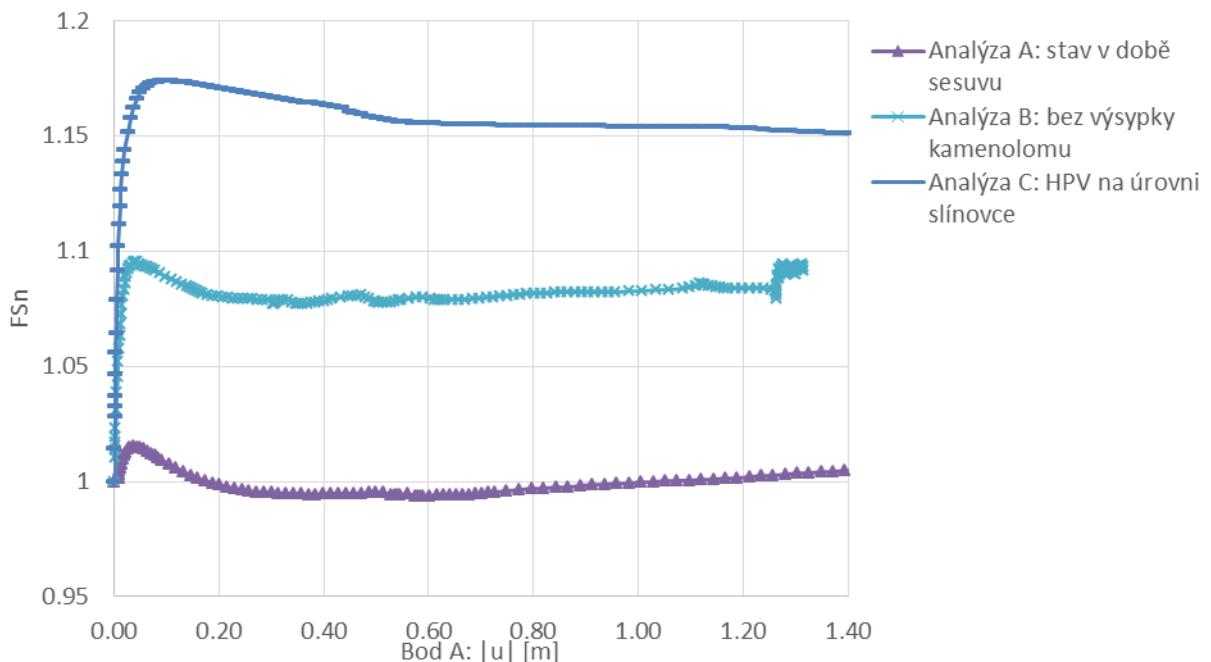
Obrázek 9.114: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na MSF pro parametrickou studii „smyková plocha  $\varphi=19^\circ$ “. Regresní křivka má parametry  $a=0,2$  a  $b=2,3$ .



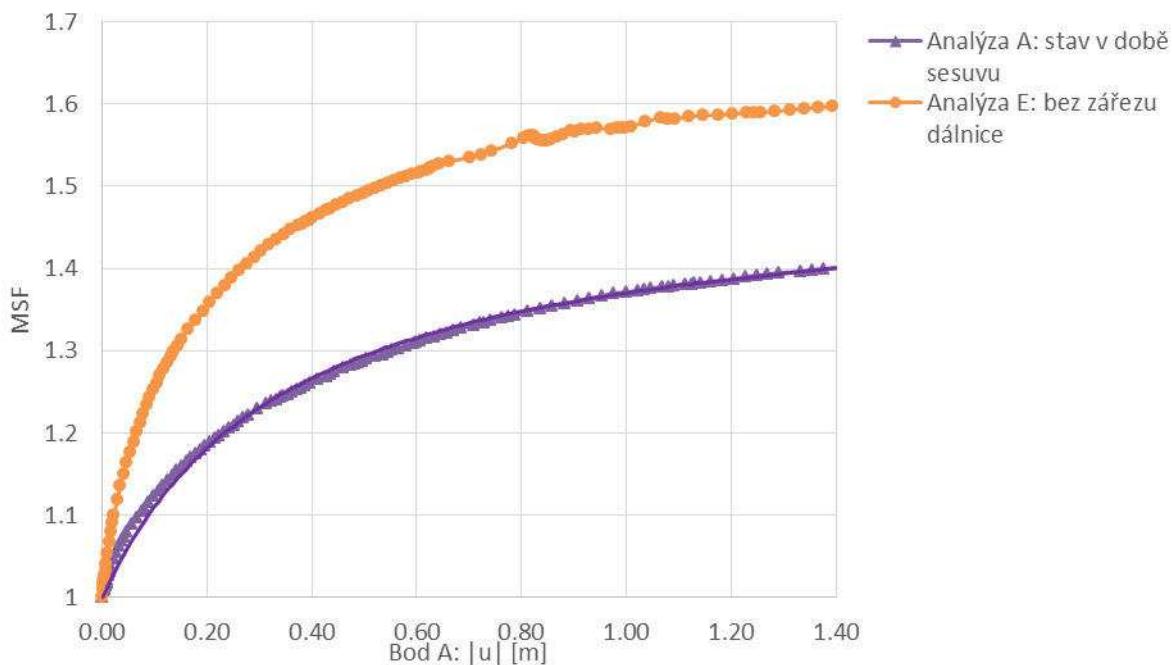
Obrázek 9.115: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na FSn pro parametrickou studii „smyková plocha  $\varphi=19^\circ$ “.



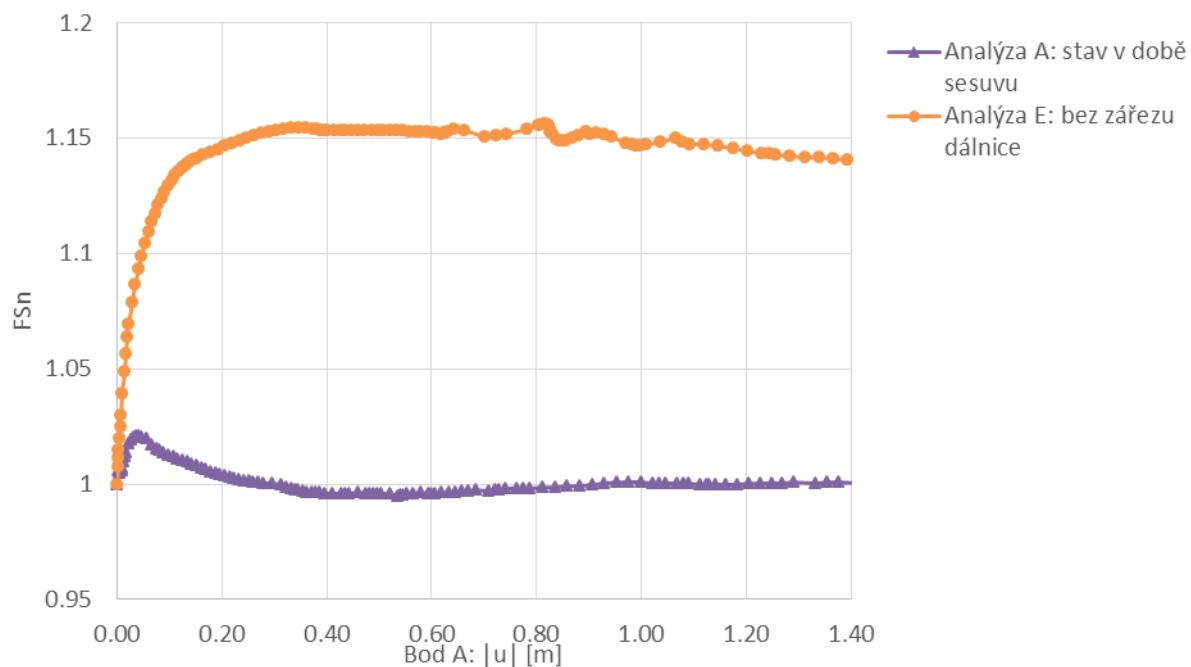
Obrázek 9.116: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na MSF pro parametrickou studii „kontakt bazalt - kamenivo  $\varphi=28^\circ$ “. Regresní křivka má parametry  $a=0,8$  a  $b=3,02$ .



Obrázek 9.117: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na FS<sub>n</sub> pro parametrickou studii „kontakt bazalt - kamenivo  $\varphi=28^\circ$ “.



Obrázek 9.118: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na MSF pro parametrickou studii „deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ “. Regresní křivka má parametry  $a=0,7$  a  $b=2$ .



Obrázek 9.119: Křivky závislosti celkových posunů v bodě A na FSn pro parametrickou studii „deluviální sedimenty  $c=30 \text{ kPa}$ “.

Výsledky výpočtů shrnují tabulky 9.11 a 9.12. Jednotlivé hodnoty budou diskutovány dále v textu.

*Tabulka 9.11: Výpočtové stupně stability FSc pro všechny analýzy odečtené pro  $|u|=1m$  v bodě A.*

Výpočtové stupně stability FSc	3D - základní parametry	3D - smyková plocha $\phi=19^\circ$	3D - kontakt bazalt - kamenivo $\phi=28^\circ$	3D - deluviální sedimenty $c=30 \text{ kPa}$
Analýza A: stav v době sesuvu	1,227	1,400	1,262	1,370
Analýza B: bez výsypky kamenolomu	1,349	1,595	1,367	-
Analýza C: HPV na úrovni slínovce	1,413	1,587	1,456	-
Analýza D: bez náspu železnice	1,200	-	-	-
Analýza E: bez zářezu dálnice	1,268	-	-	1,578
Analýza F: smyková plocha kritické parametry	1,649	-	-	-

*Tabulka 9.12: Normalizované stupně stability FSn pro všechny analýzy odečtené pro  $|u|=1m$  v bodě A.*

Normalizované stupně stability FSn	3D - základní parametry	3D - smyková plocha $\phi=19^\circ$	3D - kontakt bazalt - kamenivo $\phi=28^\circ$	3D - deluviální sedimenty $c=30 \text{ kPa}$
Analýza A: stav v době sesuvu	1,000	1,000	1,000	1,000
Analýza B: bez výsypky kamenolomu	1,099	1,140	1,083	-
Analýza C: HPV na úrovni slínovce	1,151	1,134	1,154	-
Analýza D: bez náspu železnice	0,978	-	-	-
Analýza E: bez zářezu dálnice	1,033	-	-	1,151
Analýza F: smyková plocha kritické parametry	n/r	-	-	-

## 9.10 3D modely – Diskuse výsledků

V této kapitole jsou diskutovány výsledky 3D modelů. Vypočtené stupně stability z kapitoly 9.9 jsou analyzovány v relaci k vypočtenému deformačnímu mechanizmu popsánu v kapitole 9.8.

- Výpočtový stupeň stability základní analýzy A  $FSc=1,23$  indikuje, že pevnost materiálu na smykové ploše, která kontroluje stabilitu svahu, odpovídá hodnotě  $\text{arctg}(\text{tg}(15^\circ)/1,23)=12,3^\circ$ . Tato hodnota je realistickou hodnotou reziduální pevnosti zemin na smykové ploše, což dokládají i laboratorní experimenty na zeminách smykové zóny, jejichž výsledky indikovaly hodnotu reziduální pevnosti v rozmezí  $7,5^\circ$  až  $16^\circ$ . Fakt, že je svah kontrolován reziduálními a ne kritickými parametry dále dokládá analýza F, která vedla na vysoký výpočtový stupeň stability  $FSc=1,65$ .
- Zjištění, že je svah kontrolován reziduální pevností implikuje, že byl svah v minulosti postižen sesuvem a že významná část smykové plochy současného sesuvu využívá smykovou plochu sesuvu historického. Je tomu tak proto, že vývoj reziduální smykové pevnosti vyžaduje relativně dlouhý pohyb na smykové ploše, ke kterému může dojít pouze v případě historické svahové deformace. Existenci historického sesuvu potvrzují inženýrskogeologické mapy zpracované před vznikem současného sesuvu (Suchý, 2000).
- Analýza B, reprezentující stav bez výsypky kamenolomu, vede k normalizovanému stupni stability  $FSn=1,1$  pro základní parametry a  $FSn=1,08$  pro analýzu se zvýšeným úhlem vnitřního tření na kontaktu deluviálních sutí a bazaltu. Hodnotu  $FSn=1,14$  pro analýzu s  $\phi=19^\circ$  je možno vzít v potaz jako indikaci vlivu nejistoty ve vstupních parametrech, tato hodnota ale není považována za reálnou vzhledem k vysoké pevnosti smykové plochy uvažované v této analýze a tomu odpovídajícímu vysokému výpočtovému stupni stability. Vzhledem k tomu, že normalizace odfiltruje většinu nejistot panujících ohledně modelu a materiálových vlastností, lze svah s hodnotou  $FSn$  jen mírně vyšší než 1 uvažovat za stabilní. To je i případ analýzy B.
- Analýza s hladinou podzemní vody zaklesnutou na úroveň slínovce (C) indikuje vysoký normalizovaný stupeň stability 1,15. Tento stupeň stability navíc odpovídá deformaci pouze horní části svahu, blok těla sesuvu ve spodní části svahu a při zářezu dálnice zůstává stabilní (viz obrázek 9.88). Tento výsledek ilustruje evidentní fakt, že by k sesuvu nedošlo bez nastoupání hladiny podzemní vody.
- Analýza bez náspu (D) železniční trati indikuje, že násep neměl z mechanického hlediska negativní vliv na stabilitu svahu. Naopak, vzhledem k jeho lokaci v plošší části sesuvu měl dokonce mírně pozitivní vliv na stabilitu (stupeň stability svahu bez náspu železnice byl 0,98). Eventuální negativní vliv náspu na stabilitu z důvodu změny hydrologického režimu analýza nestudovala, protože jej nelze dostatečně přesně kvantifikovat.
- Analýza varianty bez zářezu dálnice (E) indikuje relativně nízký normalizovaný stupeň stability ( $FSn=1,03$ ), který znamená, že by svah byl pravděpodobně náchylný ke kolapsu i v případě absence dálničního tělesa. Jak je ovšem zřejmé z obrázku 9.97,

normalizovaný stupeň stability  $FSn=1,03$  odpovídá sesuvu, jehož čelo končí mezi železničním náspem a dnešním dálničním zárezem. Lze tedy očekávat, že kdyby nebyla dálnice vedena v zárezu, ale překlenovala by sesuvné území jiným vhodnějším způsobem, k jejímu poškození v důsledku této sesuvné události by pravděpodobně nedošlo (sesuv by ovšem poškodil těleso náspu železnice). Tento závěr je podpořen analýzou E modifikovanou tak, že je uvažována (nereálná) hodnota soudržnosti deluviálních celků  $c=30$  kPa. Tímto způsobem je model „přinucen“ aktivovat celou smykovou plochu až do oblasti současného zárezu dálnice. Tato varianta vykazuje vysoký normalizovaný stupeň stability  $FSn=1,15$ .

## 9.11 2D modely – popis a výstavba modelů

### 9.11.1 Úvod

Ověřovací 2D analýza byla provedena ve dvou podélných řezech sesuvem. Řez 1 je veden rovnoběžně s podélnou osou tělesa sesuvu, řez 2 vede šikmo přibližně severním směrem (viz obrázek 9.55). Z hlediska lokální soustavy souřadnic (viz kapitola 9.5.2) probíhají řezy následovně:

Řez 1:  $x_1=380$  m,  $y_1=132,1$  m,  $x_2=40$  m,  $y_2=-213,7$  m

Řez 2:  $x_1=311,5$  m,  $y_1=135$  m,  $x_2=40$  m,  $y_2=-305$  m

Řez 1 kopíroval geofyzikální profil S5 popsáný v kapitole 3 (obrázek 3.1). Řez 2 byl veden mírně šikmo svahem proto, aby zasahoval hmoty štěrkové deponie v kamenolomu a zároveň nevedl těsně při okraji sesuvu. Při okrajích jsou stabilitní poměry ovlivňovány 3D efektem tření na bocích zemního proudu, smyková plocha zde v příčném řezu počíná vycházet na povrch a v neposlední řadě může být půdorysný rozsah sesuté zeminy ovlivněn vytlačováním do stran. Řez 1 umístěný velmi blízko okraji sesuvu by proto nemusel být věrohodný z hlediska posouzení stupně stability.

### 9.11.2 Použitý software

Pro analýzu stability byl použit program GEOSTUDIO® od společnosti GEO-SLOPE® sídlící v Albertě, Kanada. Jeden z 8 dílčích modulů SLOPE/W je vytvořen pro účely analýz stability zemních těles a případných konstrukčních prvků a opatření s nimi spojených. Umožnuje použití široké škály proužkových metod včetně pokročilejších, stabilitu řeší metodou mezní rovnováhy sil, popřípadě využívá pole napětí z modulu SIGMA/W (umožnuje sdruženou analýzu). V případě vlivu proudění na polohu hladiny podzemní vody, nebo nutnosti zohlednění pole neutrálních napětí při časově závislých analýzách, je s modulem SLOPE/W provázán poslední ze základní modulové sady, SEEP/W. Smykové plochy je možné zadat mnoha způsoby, přičemž modul volitelně umožnuje další optimalizaci konkrétní smykové plochy. Ve smyslu variability materiálových modelů a hodnot charakteristik zemin je možné provést senzitivní analýzu nebo využít metodu Monte-Carlo.

### 9.11.3 Zadání a označení v pracovní struktuře výpočtu

Zadávací dokumentace ukládala provedení stabilitních výpočtů metodou mezní rovnováhy ve 2D s určením stupně stability svahu a vizualizací průběhu hlavních smykových ploch ve dvou podélných řezech sesuvem v několika konfiguracích svahu (základní analýza při okrajových podmírkách v den vzniku sesuvu zjištěných ze zpětné analýzy). Na základě zadání bylo posuzování stability svahu strukturováno do následujících bodů:

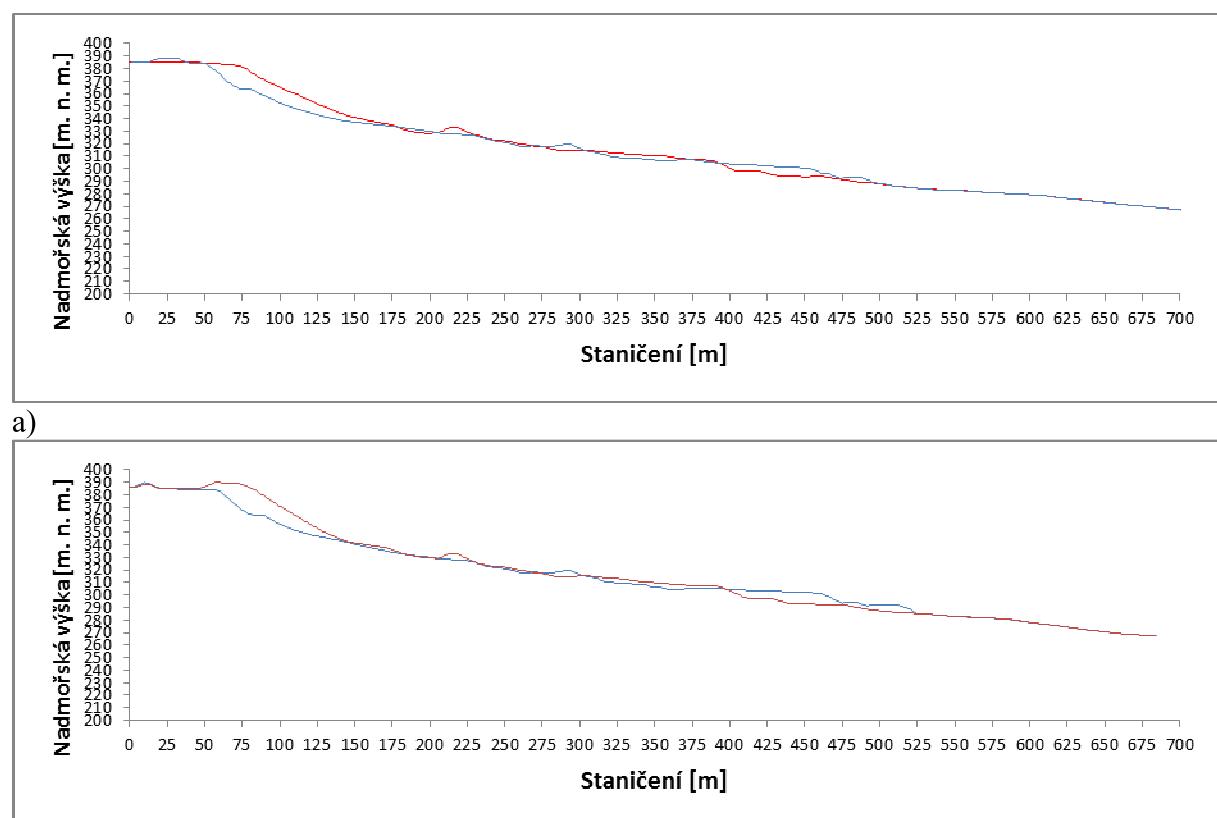
- před zahájením stavby D0805 s deponiemi v kamenolomu a železničním náspem (pracovní označení 0-V-Ž, tj. „0“ značí absenci struktury, „D“ značí provedení dálničního zářezu, „V“ označuje přítomnost výsypky - deponie, „Ž“ značí přítomnost železničního násepu)
- po vyhloubení zárezů dálnice s deponiemi v kamenolomu a železničním náspem (D-V-Ž)

- po vyhloubení zářezů dálnice s deponiemi v kamenolomu bez železničního náspu (D-V-0)
- po vyhloubení zářezů dálnice bez deponíí v kamenolomu s železničním náspem (D-0-Ž)
- po vyhloubení zářezů dálnice bez deponíí v kamenolomu a bez železničního náspu (D-0-0)
- po I. etapě sanace sesuvu (D-V-Ž\_ sanace)

Tyto analýzy byly doplněny o výpočet stupně stability při poklesu hladiny podzemní vody na úroveň povrchu slínovců pro variantu D-V-Ž (upřesněno v komentáři v tabulkách výsledků), výpočet stupně stability smykové plochy se spodním výchozem blízko pod železničním náspem, a dále (alternativně k posouzení s parametry ze zpětné analýzy) o výpočet stupně stability při zadání reziduálních parametrů zjištěných na základě laboratorních zkoušek provedených na pracovišti Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze. Mimo tento soubor výpočtů byla pro každý řez provedena 1 ověřovací analýza varianty D-V-Ž s kritickými parametry smykové pevnosti zemin v kluzné zóně.

#### 9.11.4 Vstupní data a podklady o geometrii povrchu a podloží

Povrch terénu byl do numerického modelu pro všechna zadání implementován na základě souřadnic bodů v JSTK systému zjištěných pomocí LiDARového snímání, a to v intervalu přibližně 1 m. Kontura povrchu lokality před a po sesuvu pro 2 vybrané řezy je na obrázcích 9.120(a) a 9.120(b).



Obrázek 9.120a, b: Povrch terénu v řezu 1 (a) a v řezu 2 (b) vždy před sesuvem (červená) a po 1. etapě sanace (modrá). Data z LiDARového snímání s přesností 1 m.

Následně byla implementována geologie, a to v podobě výstupu podélných řezů ze 3D modelu. Bylo nutné upravit měřítko a surové řezy vztáhnout k souřadnému systému modelu tvořenému staničením vůči nadmořské výšce. Součástí vstupních řezů byla rovněž hladina podzemní vody (HPV), reprodukována na základě přímého zadání lomenou čarou. Okrajová podmínka vysoko položené HPV platí pro extrémní situaci při sesuvu, pro řešení stability po první etapě sanace byla zadána HPV dle měření ustálené hladiny podzemní vody na vrtech, viz kapitola 5.

#### 9.11.5 Vstupní data a podklady o geologii podloží

V modelu se vyskytuje celkem 8 základních kvazihomogenních formací hornin různobarevně označených:

1) Pevná hornina typu čediče, olivnického nefelinitu	tmavě šedá
2) Sutě tvořené odvalem z lomu, hrubozrnné přírodní svahové sutě	světle šedá
3) Sutě s významným podílem jemnozrnné složky a staré násypy	růžová
4) Vulkanické tufy a tufity	tyrkysová
5) Deluviální hlíny	hnědo-oranžová
6) Kontakt sutí 3) a pevné horniny 1)	červená
7) Smyková zóna na kontaktu diluviálních hlín 5) a slínovců 8)	zelená
8) Podložní slínovce	žlutá

V jednotlivých regionech modelu je povaha zeminy stejná, v podmírkách *in-situ* dochází k lokálním modifikacím zeminy vlivem rozdílného chemismu, působení vody, historie pohybu, zatěžování zeminy a podobně. Tyto změny jsou často velmi náhlé, ani podrobným průzkumem je není možné zcela věrně interpretovat a jejich zohlednění představuje zvýšení počtu konečných prvků nebo proužků smykové plochy, která jimi prochází – modelová lokalita je proto tvořena 8 základními typy, které jsou klíčové pro rozsah sesuvu.

Deluviální hlíny, vulkanické tufy a podložní slínovce byly podrobeny laboratorním zkouškám kritické a reziduální smykové pevnosti v rotačně trojosém a krabicovém přístroji. Na základě porovnání výsledků a archivních dat z dřívějších průzkumů či posudků byly stanoveny reziduální parametry v tufech a na kluzné zóně hodnotou  $\varphi_{res} = 15^\circ$ . Hodnoty kritické smykové pevnosti deluviálních hlín vychází hodnotou  $\varphi_{crit} = 24^\circ$  pro svahové sedimenty a  $\varphi_{crit} = 30^\circ$  pro tufy. Kompletní sada materiálových parametrů je uvedena v tabulkách 9.2 až 9.4.

#### 9.11.6 Metodika prací při zadávání průběhu smykové plochy a proces výpočtu

Průběh smykové plochy byl částečně interpretován na základě inženýrskogeologického průzkumu z roku 2014. Předpokládalo se, že smyková plocha nezasahuje pod zemní těleso zářezu a že její výchoz není v bezprostřední blízkosti kontaktu předního okraje sesutých hmot a původního terénu. Důvodem domněnky je skutečnost, že posun hmot v horní části svahu, který v případě železniční trati činí přibližně 70 m, by neměl adekvátní odezvu posunu ve spodní části svahu. Také kinematika naznačená v řezu by byla problematická, neboť by pravděpodobně došlo spíše k výchozu v patě zářezu dálnice. Proto základní verze výpočtem ověřovaného scénáře porušení svahu pro numerické modely je uvolnění hmot v klíčových partiích a jejich následný posun níže. Průběh smykové plochy byl zadán na základě přímého definování poloh bodů smykové plochy. V horních partiích svahu prochází smyková plocha sutěmi a odvalem z lomů, případně deponií. Místo horního výchozu bylo odhadnuto ve

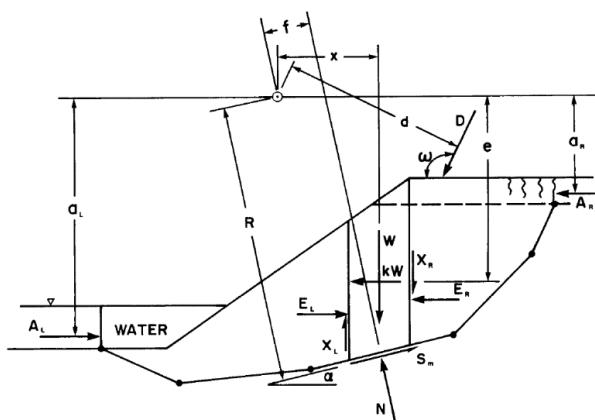
vzdálenosti cca 20 m od hrany sutí (deponie), a to porovnáním LiDARových dat před sesuvem a po první etapě sanace. Smyková plocha dále sleduje polohu tufů a je situována uprostřed kluzné zóny mezi deluviálními hlínami a podložními slínovci. V modelu je přibližně 1 – 1,5 m široká. Protože nelze zadat naprosto přesně průběh smykové plochy, byla programu SLOPE/W umožněna určitá volnost, tj. smyková plocha byla podrobena optimalizaci. Procesem optimalizace je průběh smykové plochy vyhlazen a upraven tak, aby dosáhl minimální hodnoty stupně stability. Konkrétní postup při optimalizaci je následující: Smyková plocha je rozdělena na jednotlivé body, přičemž krajními body jsou průsečíky smykové plochy a povrchu terénu. S body smykové plochy modul SLOPE/W postupně manipuluje vlevo nebo vpravo do té doby, než je stupeň stability pro určitou polohu daného bodu minimální – začíná se od bodu vstupu smykové plochy do masivu. Nejdelší segment smykové plochy je následně rozdělen na  $\frac{1}{2}$ , tj. doprostřed segmentu je vložen bod a opět podroben změně polohy. Proces dělení segmentů a pohybu s body se opakuje do dosažení zadaného počtu opakování nebo dosažení tolerance hodnoty změny stupně stability.

Pro analýzu stability s absencí zářezu pro dálnici byla smyková zóna prodloužena v souladu s průběhem rozhraní slínovce/deluvia. Spodní výchoz smykové plochy byl situován pod zářezem, avšak tak, aby bylo maximálně eliminováno množství zemních hmot na pasivní části smykové plochy. Hladina podzemní vody byla pro tyto účely modifikována pouze vyhlazením v místech náhlé lokální změny sklonu reliéfu terénu.

Pro variantu výpočtu stability po první etapě sanace byl přijat předpoklad neznámého charakteru střížné zóny v oblasti sesuvu. Důvodem je možnost částečného promíchání sesutých hmot a nestejnoměrná deformace sesouvajícího se masivu. Vycházeli jsme proto ze známé polohy smykové plochy a hmoty nad ní jsme modelovali kvazihomogenním blokem jednoho druhu zeminy s relativně vysokými pevnostními parametry. Uvedený blok je vyznačen tmavě zelenou barvou. Hladina podzemní vody byla zadána v souladu s dostupnými informacemi o měření výšky hladiny v období ukončení 1. etapy sanace sesuvu.

### Metodologie výpočtu stupně stability

Použita byla proužková metoda mezní rovnováhy sil Morgenstern-Price. Tato metoda je velmi komplexní, neboť umožňuje stanovit stupeň stability jak ze silové, tak momentové výminky rovnováhy a zároveň umožňuje zohlednit volitelnou funkci meziproužkových sil (pro porovnání – základní metoda Felleniova je založena pouze na momentové výmince rovnováhy, metoda Bishopova zohledňuje normálové síly mezi proužky pouze v momentové výmince rovnováhy). Jedná se tedy o poměr sumy sil pasivních (bránících sesuvu) a aktivních (sesuv vyvolávajících). Konkrétně pro libovolné polygonální smykové plochy platí schéma vyobrazené na obrázku 9.121.

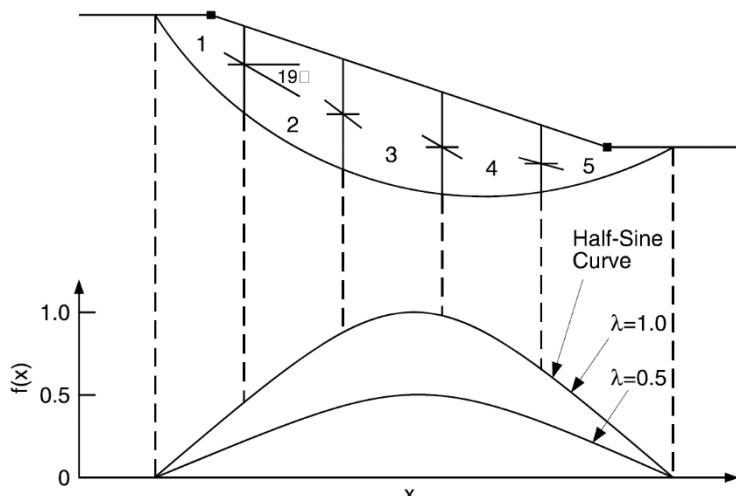


Obrázek 9.121: Výpočtové schéma pro stanovení silové a momentové výminky rovnováhy (GEO-SLOPE, 2007)

Momentová výminka (*moment = síla \* vzdálenost průvodiče síly od bodu otáčení*) je řešena k bodu otáčení vzdálenému od báze daného proužku. Síly mezi proužky jsou normálové ( $E_i$ ) a smykové ( $X_i$ ) a jsou ve vzájemném vztahu daném tzv. funkcí meziproužkových sil  $f_x$ . Tato funkce je pro metodu Morgenstern-Price volitelná, nejčastěji se používá funkce tvaru sinusové půlvlny, kde proměnná „ $x$ “ je staničení smykové plochy. Z tvaru funkce  $\sin(x)$  lze snadno vyvodit, že uprostřed úseku, přes který smyková plocha prochází, je hodnota  $f(x) = 1$ . Uvedené lze proto shrnout do vztahu

$$X_i = E_i \lambda f(x) \quad (9.1)$$

Rovnice zohledňuje vzájemné tření mezi proužky dané pohybem zemních hmot po smykové ploše. Součinitel  $\lambda$  vyjadřuje citlivost smykových sil na síly normálové. Grafická interpretace je na následujícím obrázku:



Obrázek 9.122: Grafická interpretace funkce normálových a smykových sil mezi proužky (GEO-SLOPE, 2007).

Výminka rovnováhy je splněna, pokud stupeň stability z hlediska momentové výminky rovnováhy je roven stupni stability výminky silové – program sám vypočítá v tomto smyslu vyhovující hodnotu součinitele  $\lambda$ . Konkrétně spočívá váha na iterativním procesu výpočtu normálové síly na bázi proužku – ta vstupuje do momentové nebo silové výminky rovnováhy přes všechny proužky (v souladu se značením na obrázku 9.121) a hledá se hodnota, která vyhovuje kritériu  $F_m = F_f$ , tj. rovnosti stupňů stability při momentové a silové výmince rovnováhy (viz níže):

$$F_m = \frac{\sum (N - u\beta) R \tan \phi}{\sum W \alpha - \sum N_f - \sum k W_s + \sum D_d + \sum A_a} \quad (9.2) \quad \{z momentové výminky, soudržnost c = 0\}$$

$$F_f = \frac{\sum (N - u\beta) \tan \phi \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha + \sum k W - \sum D \cos \omega + \sum A} \quad (9.3) \quad \{ze silové výminky, c = 0, \phi - úhel tření\}$$

Do rovnic (9.2) a (9.3) se dosadí

$$N = \frac{w + (X_R - X_L) - \frac{u \beta \sin \alpha (\tan \varphi)}{FS} + D \sin \alpha}{\frac{\cos \alpha + \sin \alpha (\tan \varphi)}{FS}} \quad (9.4) \quad \{ \text{normálová síla na bázi proužku, } c=0, \text{ iterační proces, } FS=\text{stupeň stability} \}$$

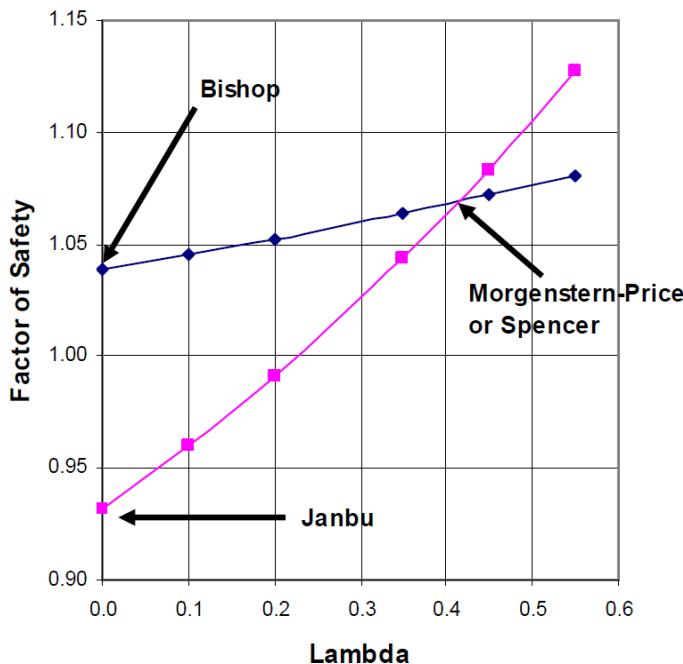
V rovnici (9.4) vystupují smykové síly na stěnách proužků vlevo ( $X_L$ ) a vpravo ( $X_R$ ), které se vypočtou na základě rovnice (9.1). Normálové síly na stěnách proužků  $E_L$  a  $E_R$  se vypočítají na základě výminky rovnováhy v horizontálním směru. Výsledný vztah má podobu

$$E_R = E_L + \frac{u \beta \tan \varphi (\cos \alpha)}{F} + N \left( \frac{\tan \varphi (\cos \alpha)}{F} - \sin \alpha \right) \quad (9.5) \quad \{ c=0, \text{krajní normálová síla } E_L \text{ nebo } E_P \text{ (dle orientace smykové plochy) je nulová, integrací se vypočítají síly pro všechny proužky} \}$$

Řešič postupuje iterativně od první hodnoty součinitele  $\lambda$ , který je nastaven jako  $2/3$  sklonu svahu. Podmínka  $F_m = F_f$  je závazná pro úspěšné ukončení výpočtu. V rovnících (9.2) až (9.5) je již dosazena smyková síla na bázi proužku, která se vypočítá z Coulombova zákona

$$S_m = \beta \left( \frac{N}{\beta} - u \right) \tan \varphi \quad (9.6) \quad \{ u - \text{pórový tlak na bázi proužku} \}$$

Výsledný stupeň stability včetně porovnání různých metod je možné interpretovat na následujícím obrázku 9.123.



Obrázek 9.123: Vzájemná relace momentové a silové výminky rovnováhy, stupně stability a součiniteli  $\lambda$  (GEO-SLOPE, 2007).

## 9.12 2D model – Výsledky stabilitních analýz a grafické výstupy

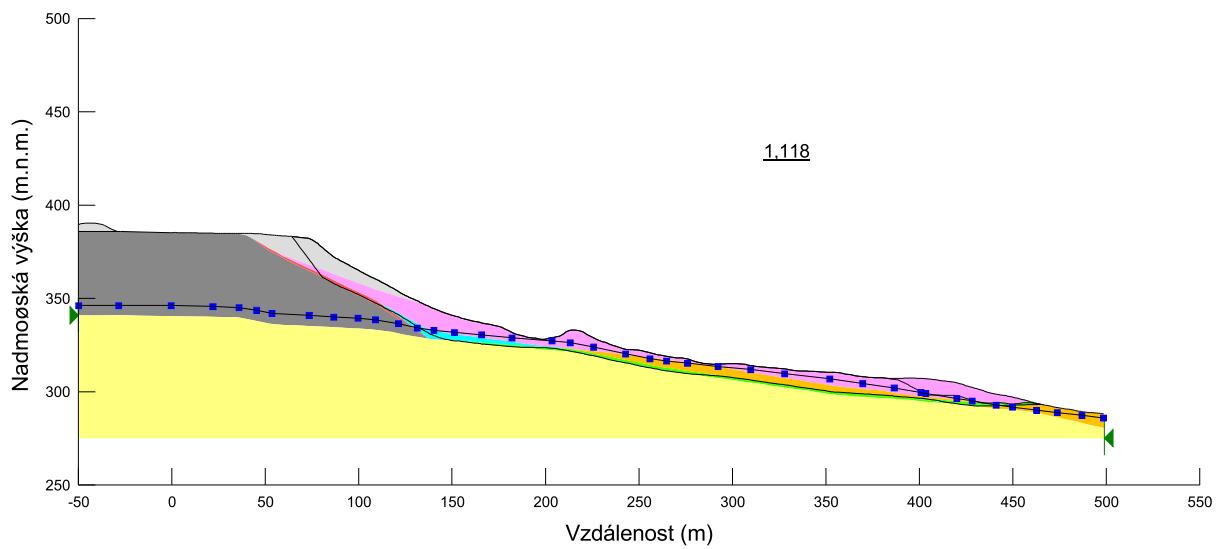
### 9.12.1 Řez 1

Stupeň stability (Factor of Safety) chápeme jako poměr pasivních (stabilizačních) a aktivních (sesuvných) sil. Tudíž hodnota stupně stability při kolapsu, ke které směřuje zpětná analýza smykové pevnosti zeminy při sesuvu, činí 1,00. Zpětně vypočítané hodnoty úhlu vnitřního tření pro smykovou zónu činí  $16^\circ$  pro řez 1 a  $17,2^\circ$  pro řez 2. Rozdíl plyně především z odlišných délek profilů, je nicméně relativně nízký vůči modelovým nejistotám v porovnání s neznámým přesným stavem *in-situ*. V tomto smyslu je nutné poznamenat, že mobilizace nemusí být ve všech místech stejná a zpětně analyzované hodnoty je možné považovat za střední. Výsledné hodnoty stupně stability pro jednotlivé analýzy pro řez 1 jsou uvedené v tabulce 9.13.

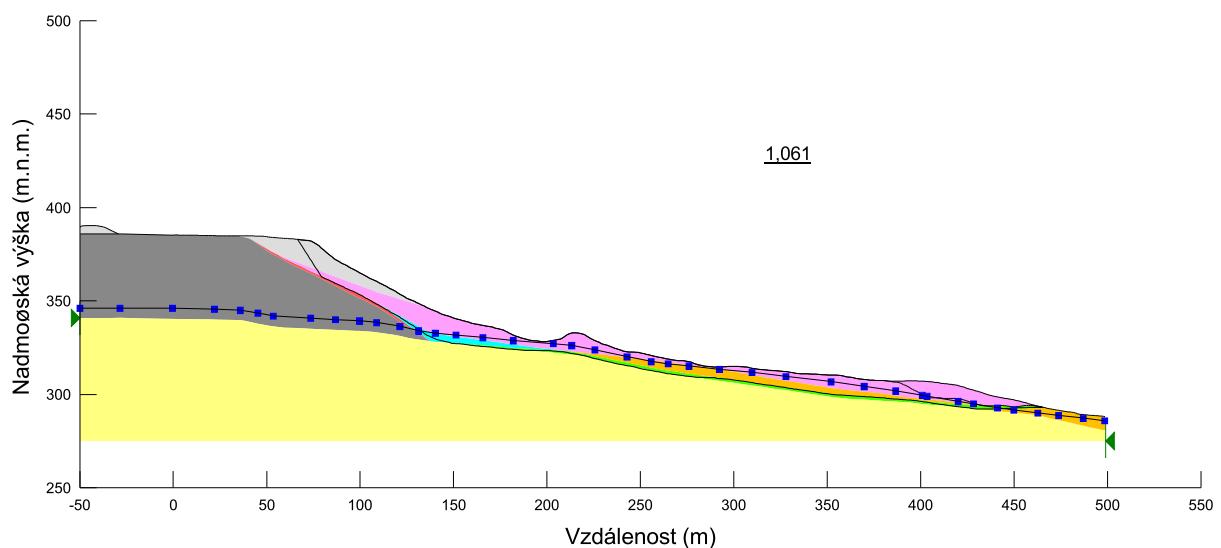
*Tabulka 9.13: Výsledky 2D analýz pro řez 1.*

Profil P1, odpovídající řezu 1				
Analýza	Doplňující informace	Parametry ze zpětné analýzy	Reziduální parametry	Kritické parametry
0-V-Ž		1,118	1,061	--
0-V-Ž_pž	Výchoz smykové plochy pod železničním náspem	0,968	--	--
D-V-Ž		1,003	0,959	1,405
D-V-Ž_hpv	Hladina podzemní vody na povrchu slínovců	1,235	1,177	--
D-V-0		0,987	0,946	--
D-0-Ž		1,124	1,059	--
D-0-0		1,107	1,042	--
D-V-Ž_sanace	Po 1. etapě sanace	--	1,734	--

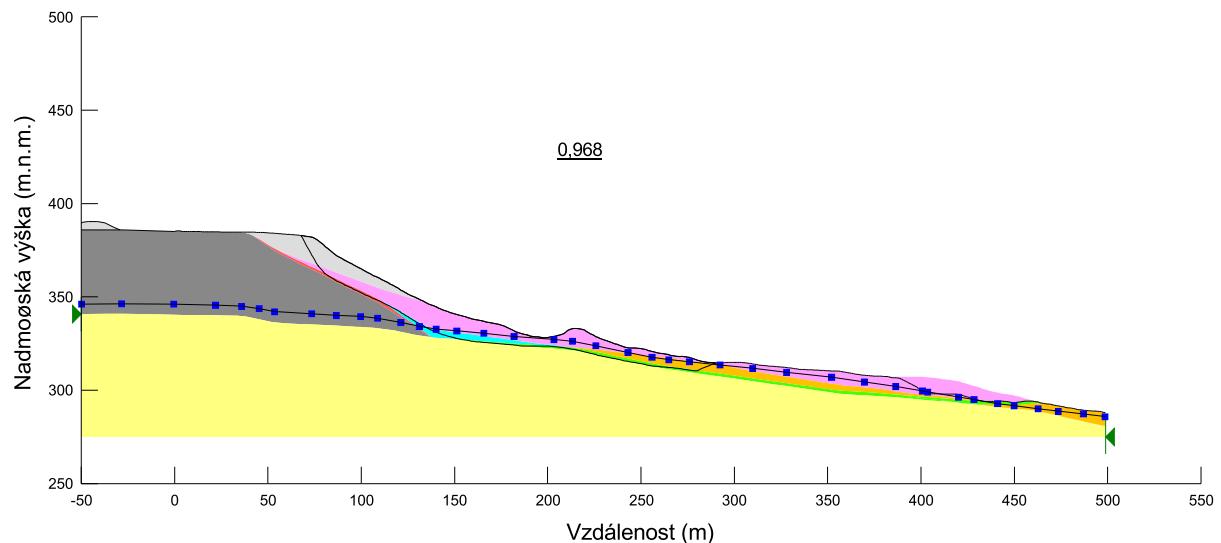
Z výsledků vyplývá, že zadané reziduální parametry pro klíčové materiály, tj. tufy a smykovou zónu mezi hlínami a slínovci jsou nižší, než hodnoty ze zpětné analýzy. Bez zárezu dálnice by pravděpodobně došlo k sesuvu, ale výchoz smykové plochy nezasahuje do prostoru dálnice, stupeň stability činí 0,968. Při smykové ploše, která zasahuje do prostoru dálnice, činí stupeň stability 1,118 (pro parametry ze zpětné analýzy) a 1,061 (pro reziduální parametry), což jsou hodnoty vyhovující kritériu stability. Pokles hladiny podzemní vody stupeň stability zvýší, hodnota se pohybuje kolem 1,24. Stejný pozitivní vliv má i absence deponie a odvalu, která zvýší stupeň stability zhruba ve stejných relacích jako absence zárezu. Výsledky ukazují, že nepřítomnost železničního náspu dokonce stabilitu sníží na hodnotu 0,987, respektive 0,946. To se projevuje i v analýze při absenci deponie i železničního náspu, kdy při uvažování reziduálních parametrů je výsledek dokonce nevyhovující kritériu a činí 1,042. Po 1. etapě sanace je svah stabilní, protože HPV je výrazně nižší, než u extrémní hladiny v období sesuvu, navíc sesutím došlo k transportu výrazného množství hmot do pasivních částí smykové plochy. Následující grafické výstupy jsou řazeny podle pořadí v tabulce 9.13 (po řádcích).



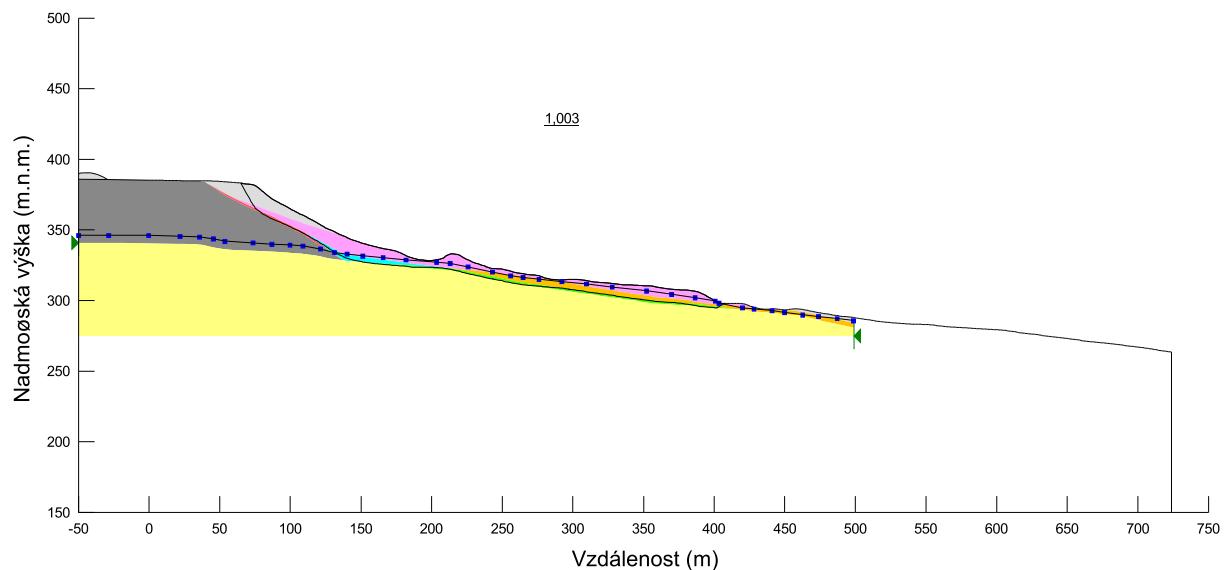
Obrázek 9.124: Stupeň stability pro řez 1 před provedením zářezu. HPV (lomená čára s modrými značkami) v extrémní poloze. Stupeň stability je vyhovující při zadání úhlu vnitřního tření kluzné zóně  $\varphi_{\text{zpet}} = 16^\circ$  ze zpětné analýzy za přítomnosti zářezu.



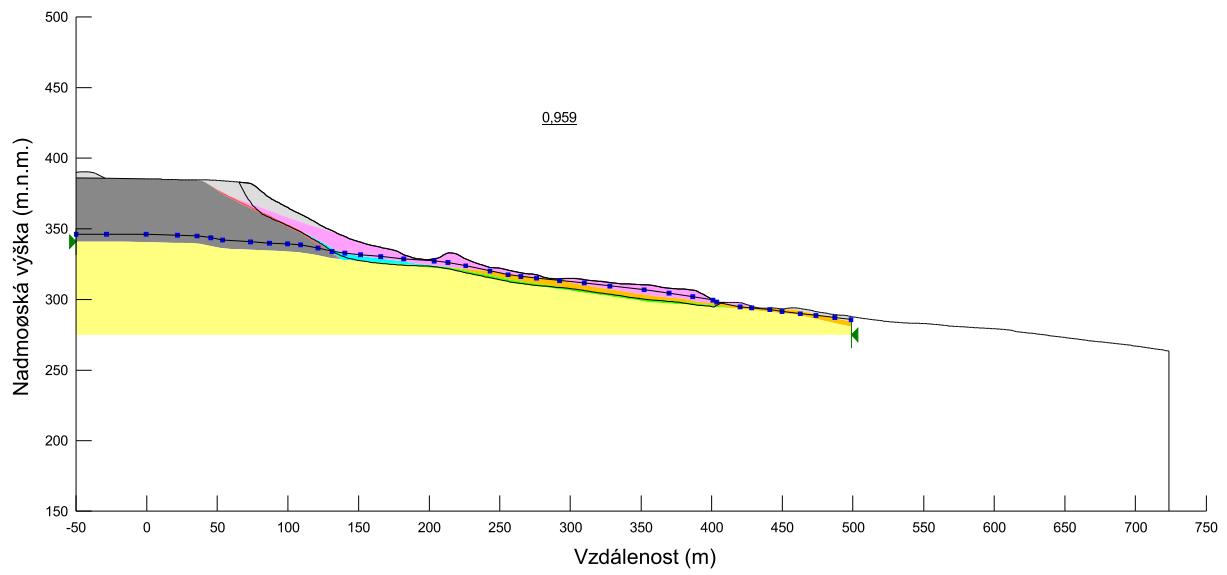
Obrázek 9.125: Stupeň stability pro řez 1 před provedením zářezu. HPV v extrémní poloze. Stupeň stability je vyhovující při zadání reziduálního úhlu vnitřního tření v kluzné zóně  $\varphi_{\text{rez}} = 15^\circ$ . Z výsledku vyplývá, že v místě zářezu dálnice a za daných okrajových podmínek výšky deponie a polohy HPV by nedošlo k poruchám svahu na kontaktu deluvia/slínovce pravděpodobně ani v dlouhodobém horizontu.



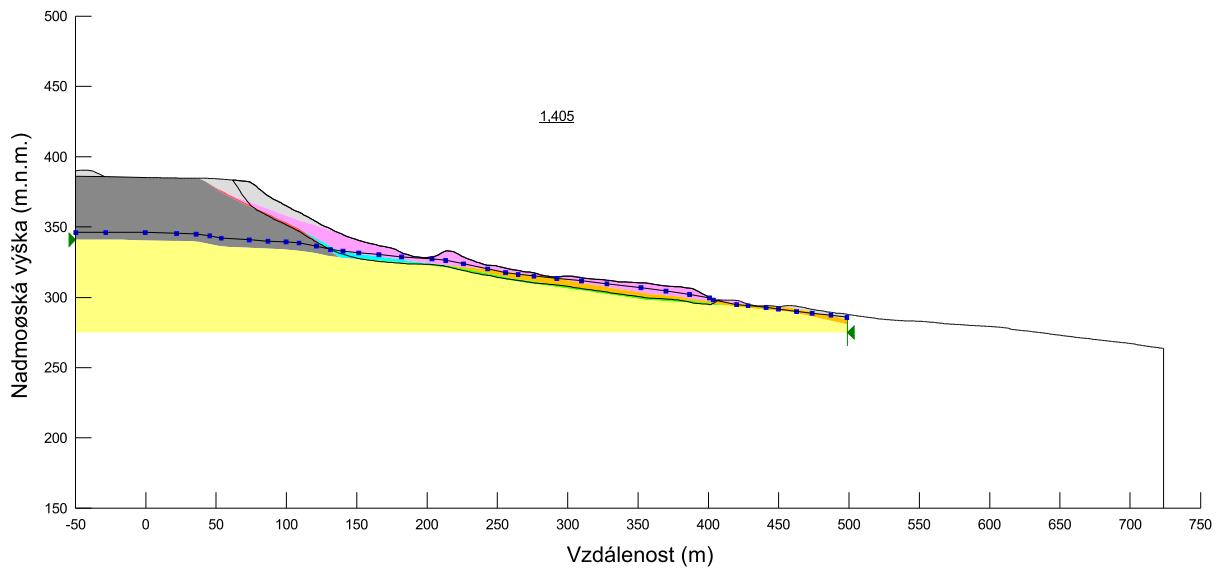
Obrázek 9.126: Stupeň stability na smykové ploše pro řez 1 s výchozem pod železničním násepem v nejtenčím místě nadloží smykové plochy. HPV v extrémní poloze. Stupeň stability je nevyhovující – bez provedení zářezu by pravděpodobně došlo k sesuvu, ale sesuv by nezavalil dálnici.



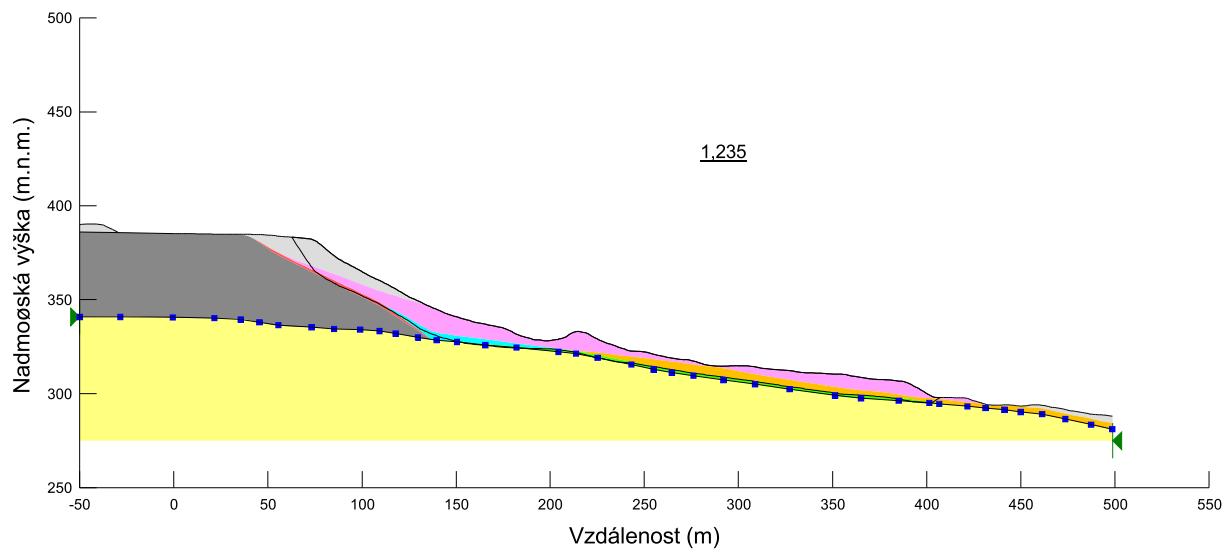
Obrázek 9.127: Zpětná analýza pro řez 1 – s dálničním zářezem. Zpětně vypočítané hodnoty úhlu vnitřního tření  $\varphi_{\text{vypočet}} = 16^\circ$ . Za pravým okrajem modelu je protažena kontura terénu z LiDARu, geologický podklad je do staničení cca 500 m.



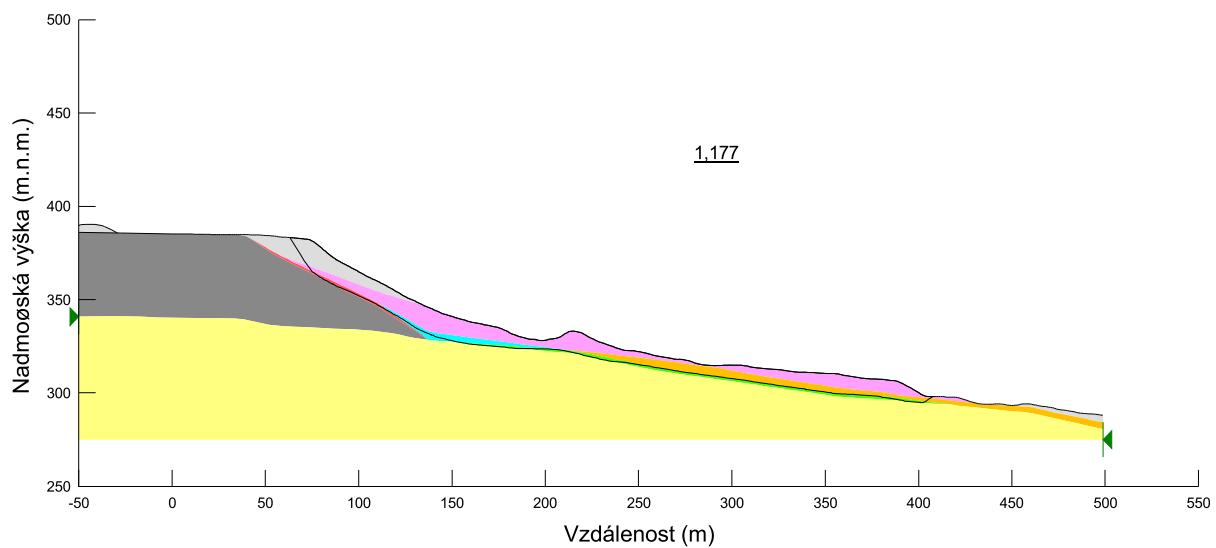
Obrázek 9.128: Nevyhovující stupeň stability pro řez 1 při zadání reziduálních parametrů smykové pevnosti na kluzné ploše  $\varphi_{rez} = 15^\circ$  (poloha tufů a kontaktu deluvia/slinovce), HPV v extrémní poloze. Pro řez 1 lze s přihlédnutím k nejistotám a předchozímu obrázku konstatovat, že sesuv využil ke svému průběhu starou predisponovanou smykovou plochu, na které v minulosti došlo ke smykovým pohybům.



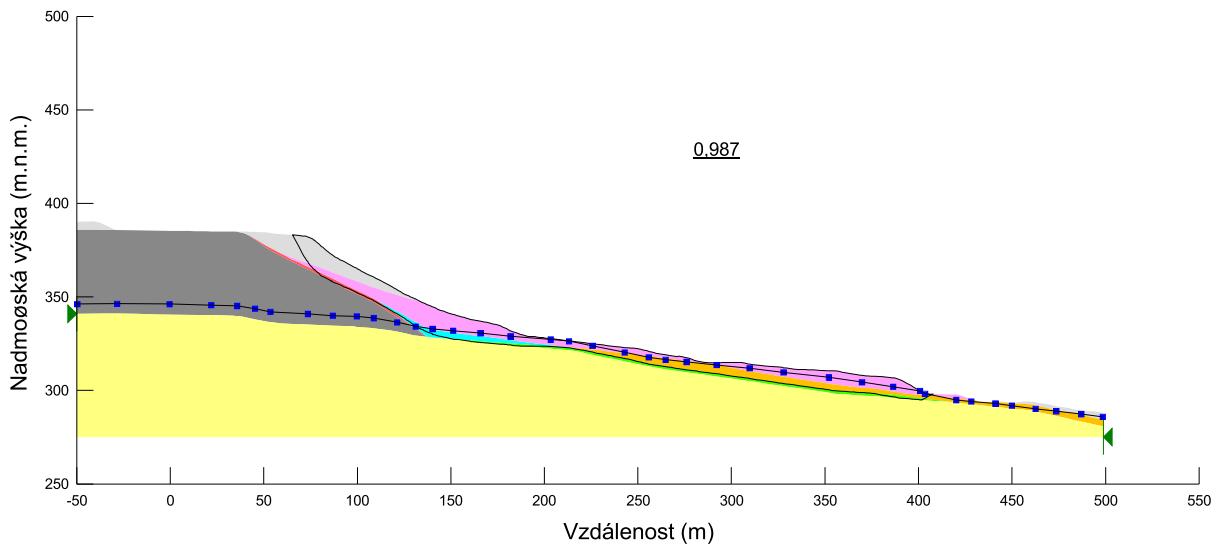
Obrázek 9.129: Stupeň stability pro řez 1, HPV v extrémní poloze. Při zadání kritických parametrů smykové pevnosti kluzným vrstvám (tufy  $\varphi_{cr} = 30^\circ$ , deluviální hlíny  $\varphi_{cr} = 24^\circ$ , rozhraní sutě/bazalt  $\varphi_{cr} = 24^\circ$ ) je svah stabilní.



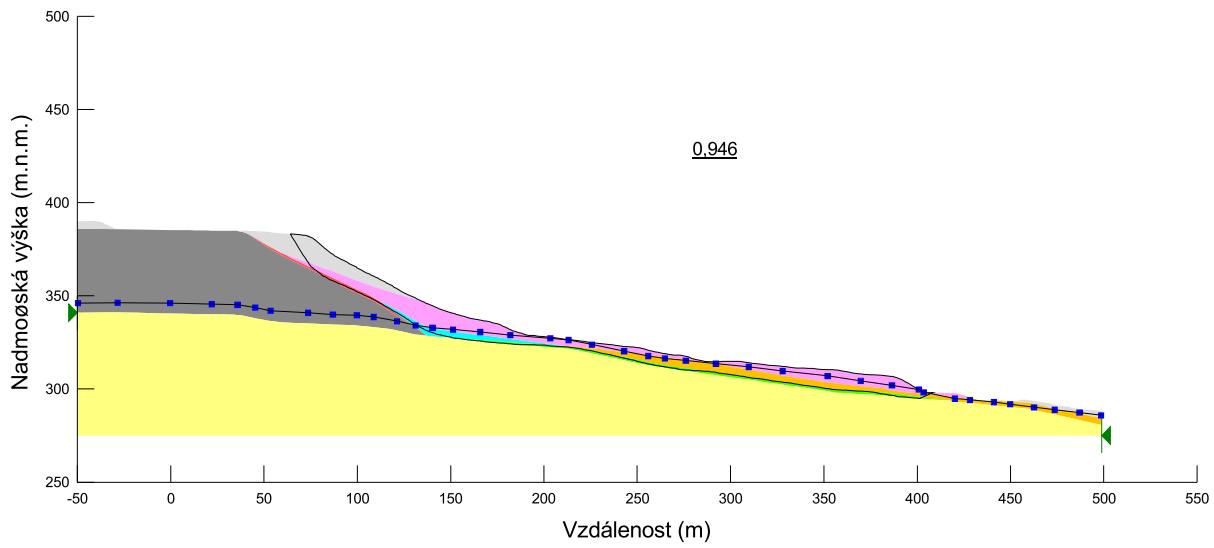
Obrázek 9.130: Vyhovující stupeň stability pro řez I – s dálničním zárezem, HPV na povrchu slínovců. Z výsledku pro zpětně stanovené parametry smykové pevnosti vyplývá, že hlavním spouštěcím mechanismem byla vysoko položená HPV.



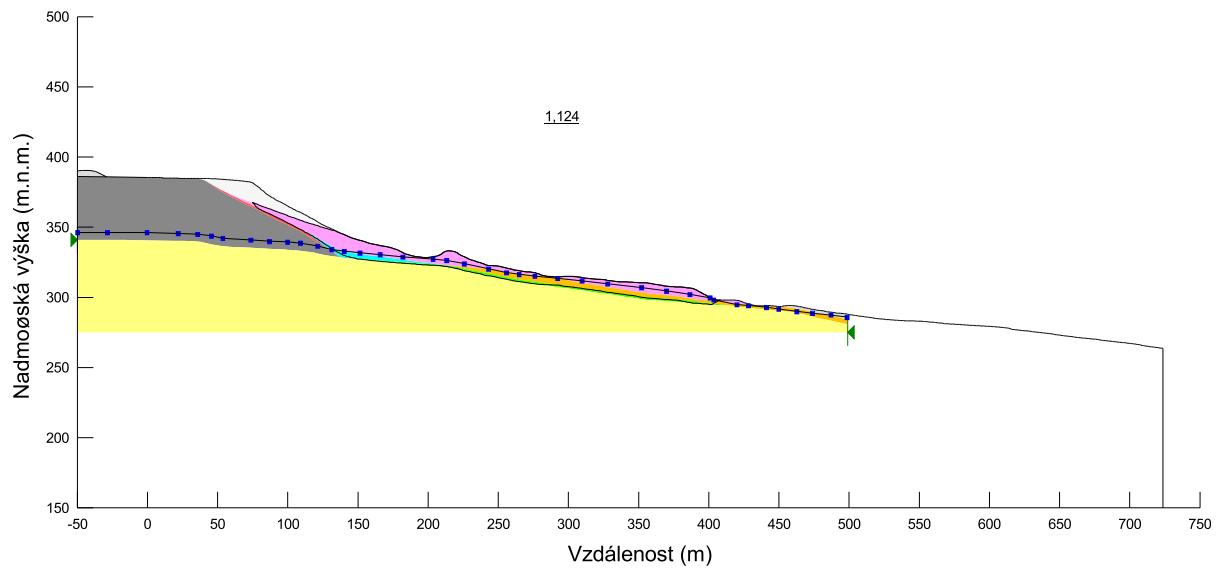
Obrázek 9.131: Stupeň stability ve stejné analýze jako v předchozím případě, avšak s reziduálními parametry smykové pevnosti. Hodnota je přesto výhovující a potvrzuje závěry v popisu obrázku 9.130.



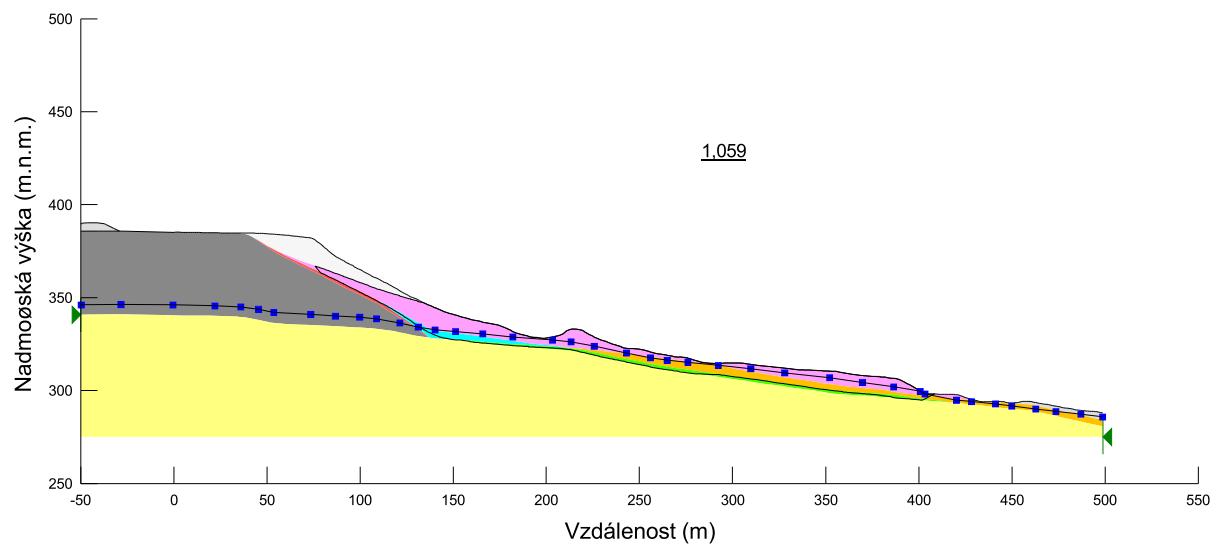
Obrázek 9.132. Nevyhovující hodnota stupně stability pro řez I s HPV v extrémní poloze, s dálnicí, avšak bez železničního náspu. Lze konstatovat, že přítomnost železničního náspu stabilitní poměry nezhoršuje, ale naopak zlepšuje.



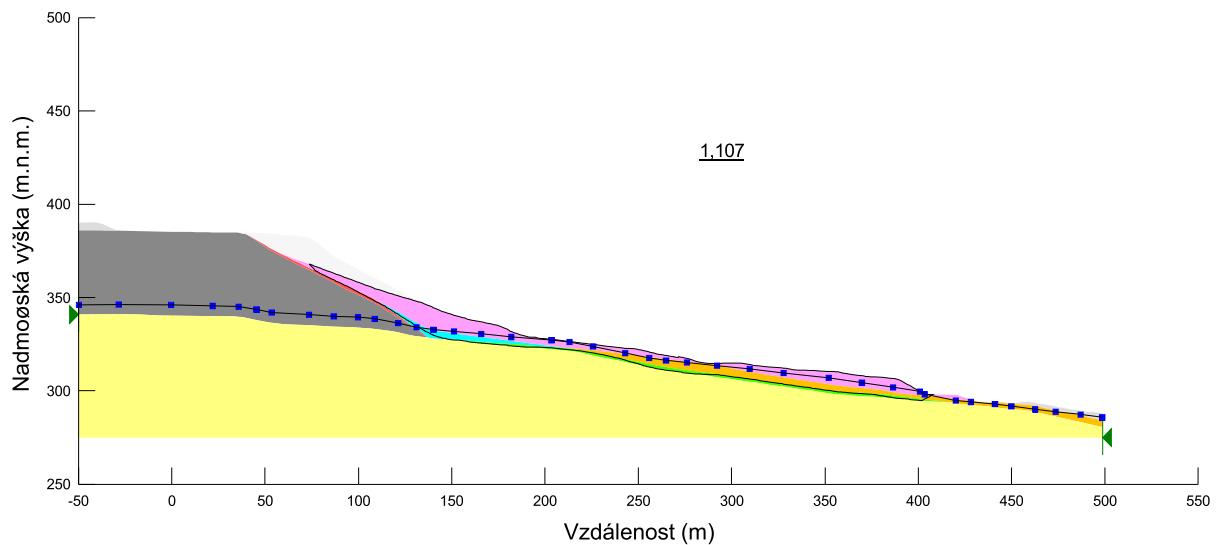
Obrázek 9.133: Tatáž analýza, z níž je výstup na obrázku 9.132, pouze s rozdílem použití reziduálních hodnot úhlu vnitřního tření místo zpětně získaných.



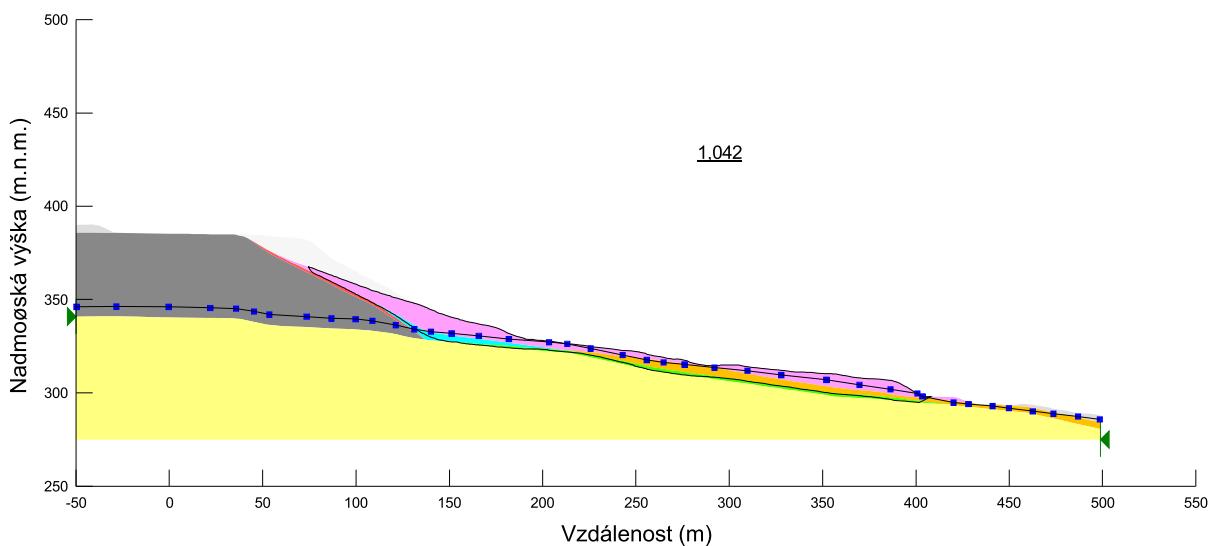
Obrázek 9.134: Vyhovující stupeň stability na smykové ploše pro řez 1, extrémní poloha HPV, se zárezem dálnice avšak bez hmot deponie (výsypky) nebo odvalu z lomu. Z výsledku jednoznačně vyplývá, že výsypka má na stabilitu značný vliv. To koresponduje s obrázkem 9.126 – pokud by nebyl proveden zárez dálnice, pravděpodobně by sloučením negativního efektu výsypky a HPV došlo k sesuvu, jehož výchoz by se pravděpodobně nacházel blízko pod železničním násepem.



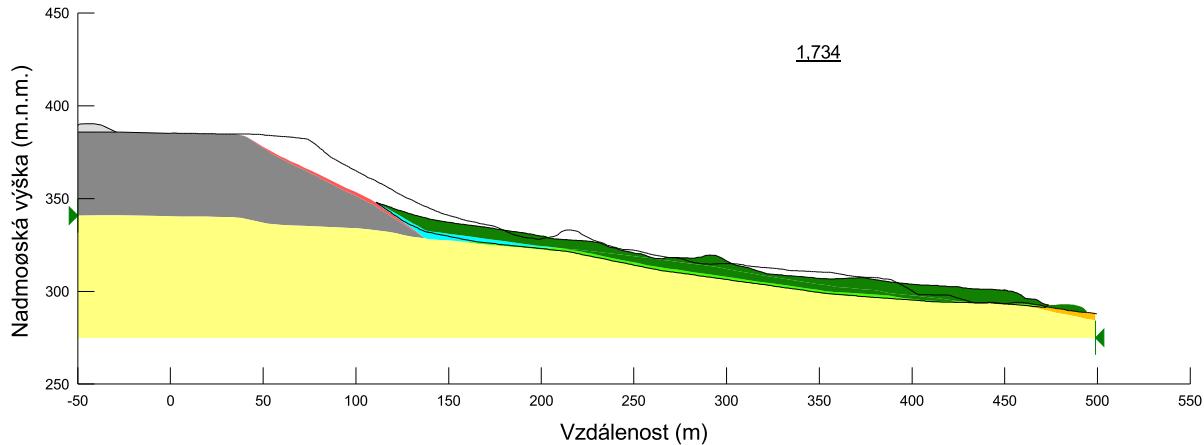
Obrázek 9.135: Pro stejnou analýzu avšak při reziduálních parametrech v kluzné zóně stupeň stability rovněž vyhovuje.



Obrázek 9.136: Vyhovující stupeň stability pro řez 1, extrémní poloha HPV, bez železničního náspu, se zárezem pro dálnici avšak bez výsypky kamenolomu.



Obrázek 9.137: Pro stejnou analýzu avšak při reziduálních parametrech v kluzné zóně je stupeň stability stále vyšší než 1.



Obrázek 9.138: Vyhovující stupeň stability pro řez 1, stav po 1. etapě sanace. Ve výpočtu byly zadány parametry reziduální, smyková zóna prodloužena těsně za hlavní těleso sesutých hmot, zeminy nad smykovou plochou simulovány jako jeden kvazihomogenní celek. HPV odpovídá stavu po 1. etapě sanace.

### 9.12.2 Řez 2

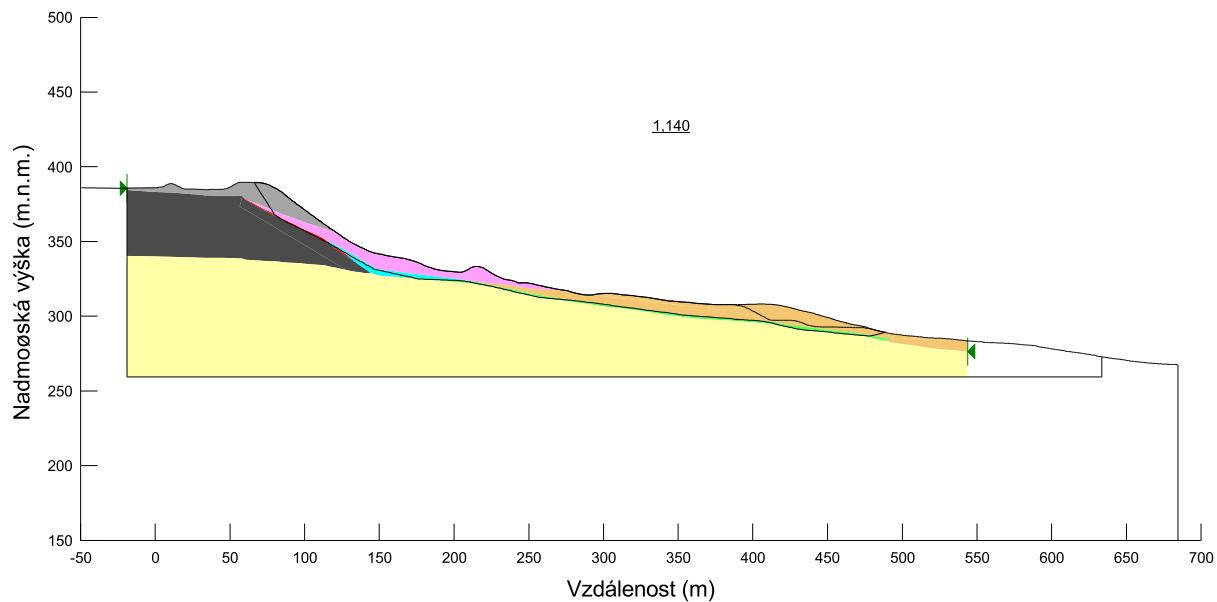
Výsledné hodnoty stupně stability pro jednotlivé analýzy pro řez 2 jsou uvedené v tabulce 9.14.

Tabulka 9.14: Výsledky 2D analýz pro řez 2.

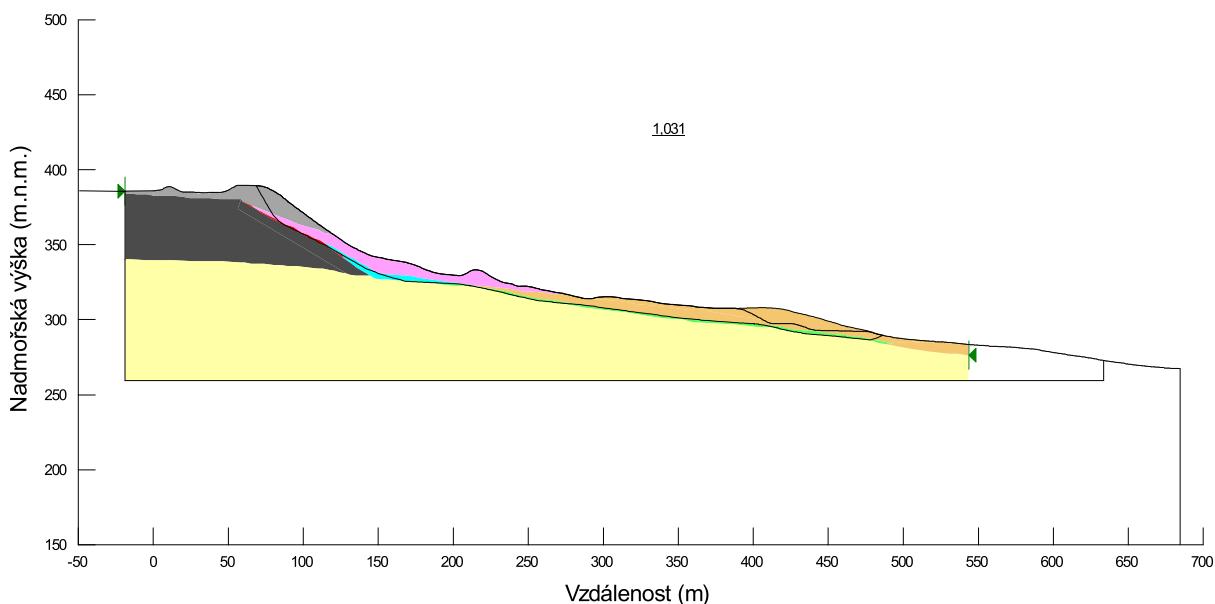
Profil P2, odpovídající řezu 2				
Analýza	Doplňující informace	Parametry ze zpětné analýzy	Reziduální parametry	Kritické parametry
0-V-Ž		1,140	1,031	--
D-V-Ž		0,999	0,904	1,340
D-V-Ž_hpv	Hladina podzemní vody na povrchu slínovců	1,242	1,125	--
D-V-0		0,987	0,895	--
D-0-Ž		1,137	0,983	--
D-0-0		1,118	0,970	--
D-V-Ž_sanace	Po 1. etapě sanace	--	1,517	--

Komentář k výsledkům analýzy stability pro řez 2 je v podstatě shodný s komentářem pro řez 1. Z výsledků vyplývá, že zadané reziduální parametry pro klíčové materiály, tj. tufy a smykovou zónu mezi hlínami a slínovci jsou nižší, než hodnoty ze zpětné analýzy. Na smykové ploše, která zasahuje do prostoru dálnice, je stav při absenci zářezu vyhovující kritériu a činí 1,140 pro parametry ze zpětné analýzy, ale hodnota FS pro reziduální parametry je blízká jedné (1,031). Pokles hladiny podzemní vody stupeň stability výrazně zvýší, hodnota se pohybuje rovněž kolem 1,23. Stejný pozitivní vliv má i absence deponie a odvalu, která zvýší stupeň stability zhruba ve stejných relacích jako absence zářezu. Výsledky ukazují, že

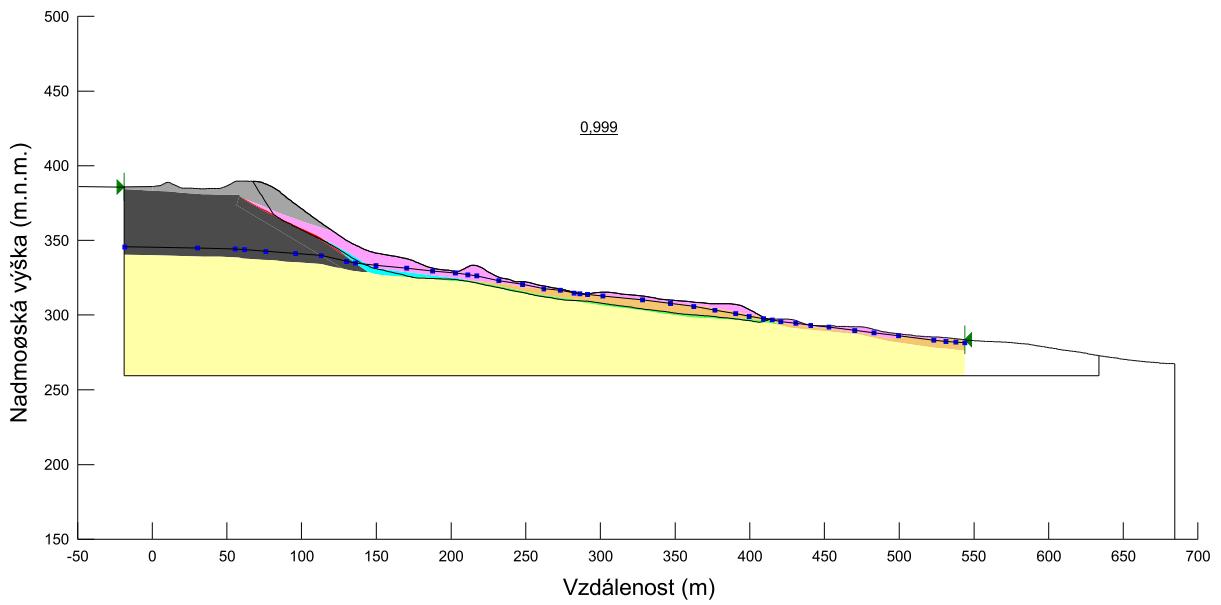
absence železničního náspu dokonce stabilitu sníží až na hodnotu 0,895 pro reziduální parametry. To se projevuje i v analýze při absenci deponie i železničního náspu, kdy při uvažování reziduálních parametrů je výsledek dokonce nižší, než 1,0. Po 1. etapě sanace je svah stabilní, protože HPV je výrazně níže, než u extrémní v období sesuvu, navíc došlo sesutím k transportu výrazného množství hmot do pasivních částí smykové plochy. Následující grafické výstupy jsou řazeny podle pořadí v tabulce 9.14 (po řadcích).



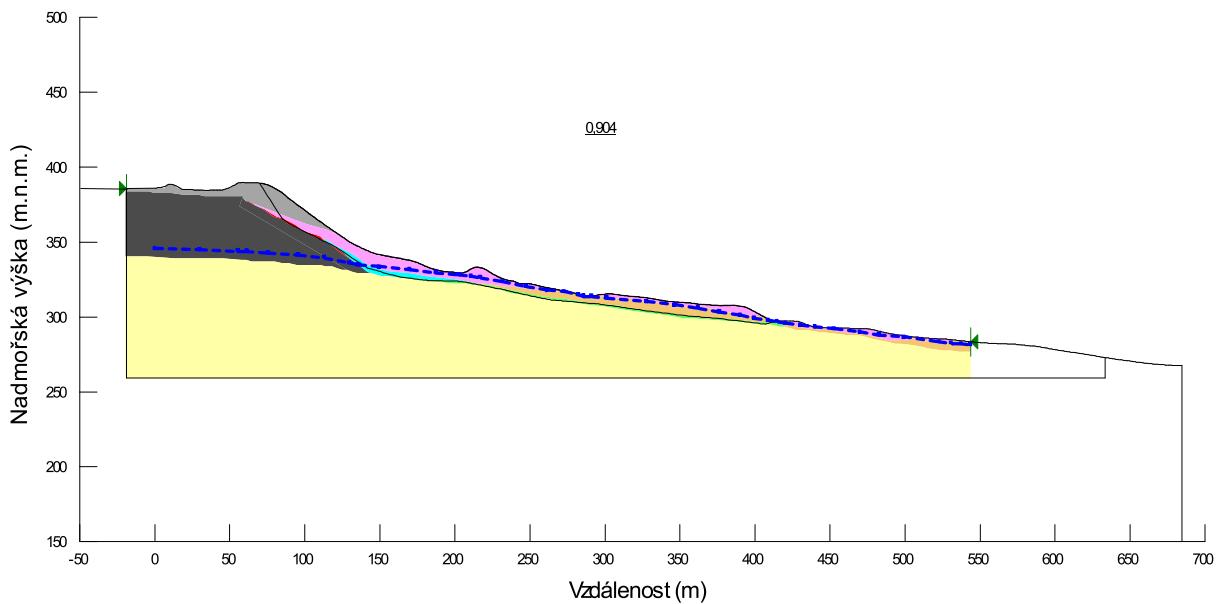
Obrázek 9.139: Stupeň stability pro řez 2 před provedením zářezu. HPV v extrémní poloze. Stupeň stability je vyhovující při zadání úhlu vnitřního tření kluzné zóně  $\varphi_{\text{zpeť}} = 17,2^\circ$  ze zpětné analýzy za přítomnosti zářezu.



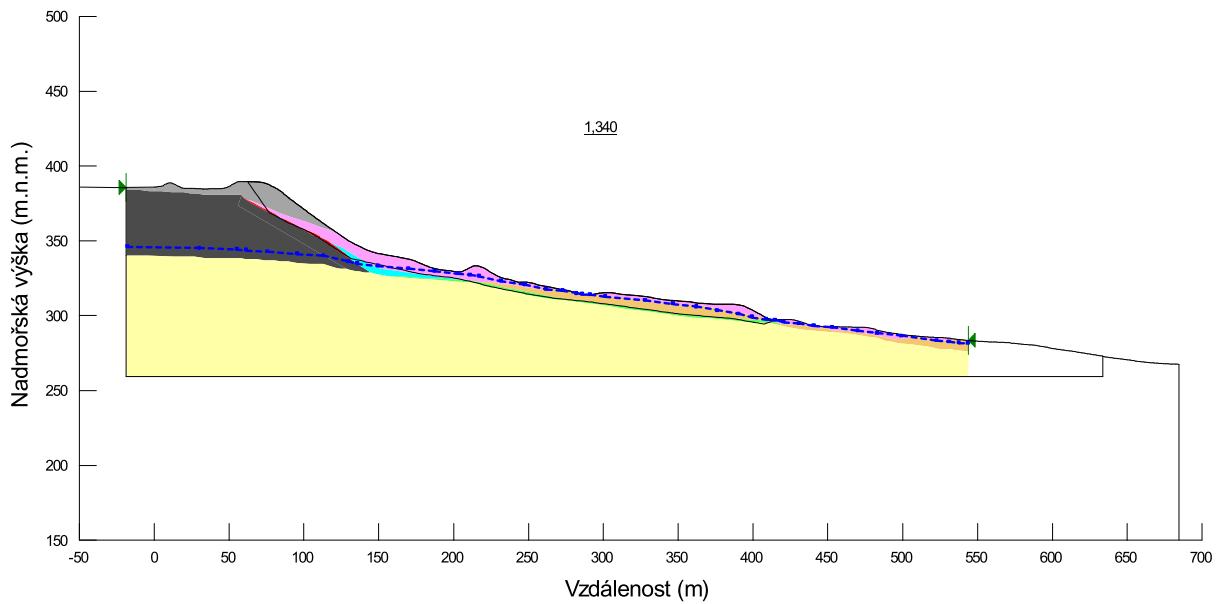
Obrázek 9.140: Stupeň stability pro řez 2 před provedením zářezu. HPV v extrémní poloze. Stupeň stability je i při zadání reziduálního úhlu vnitřního tření v kluzné zóně  $\varphi_{\text{res}} = 15^\circ$  vyšší než 1. S přihlédnutím k výsledku z řezu 1 můžeme konstatovat, že v místě zářezu dálnice a za daných okrajových podmínek výšky deponie a polohy HPV by pravděpodobně nedošlo k poruchám svahu na kontaktu deluvia/slínovce ani v dlouhodobém horizontu.



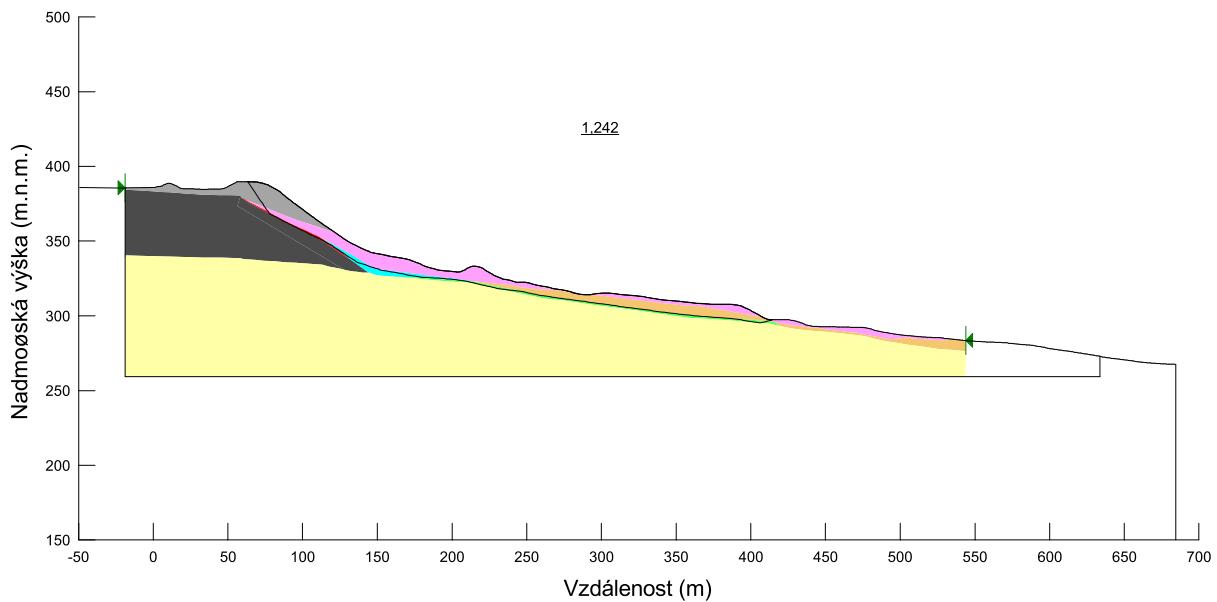
Obrázek 9.141: Zpětná analýza pro řez 2 – s dálničním zárezem. Zpětně vypočítané hodnoty úhlu vnitřního tření  $\varphi_{\text{zpet}} = 17,2^\circ$ . Za pravým okrajem modelu je protažena kontura terénu z LiDARu, geologický podklad je do staničení cca 550 m.



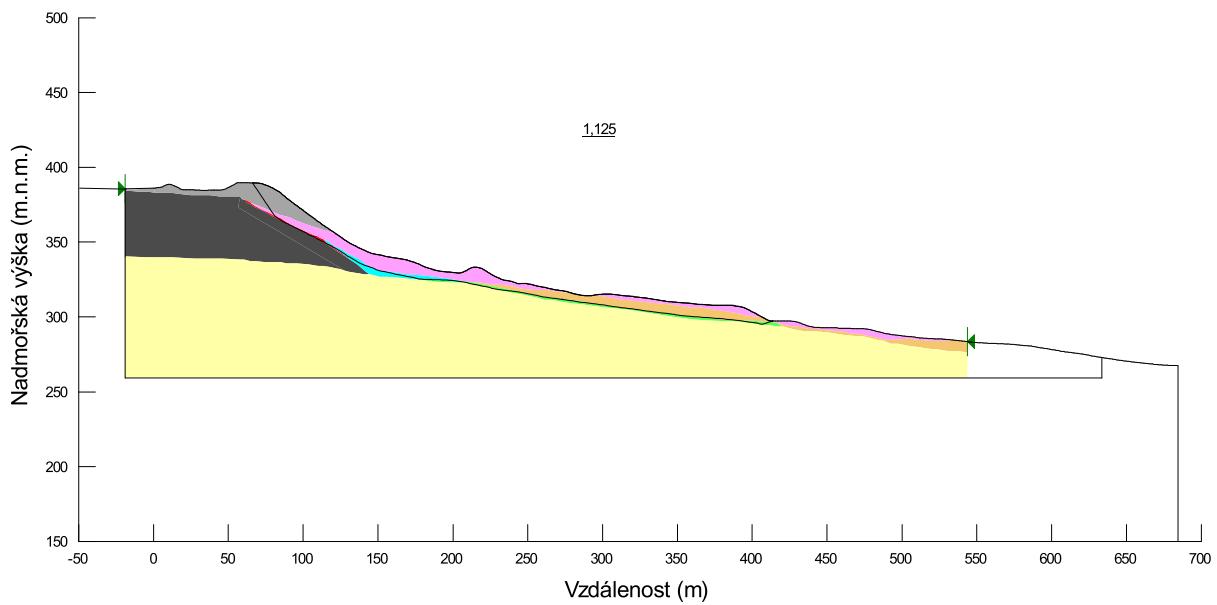
Obrázek 9.142: Nevyhovující stupeň stability pro řez 2 při zadání reziduálních parametrů smykové pevnosti na kluzné ploše  $\varphi_{\text{rez}} = 15^\circ$  (poloha tufů a kontaktu deluvia/slínovce), HPV v extrémní poloze. Pro řez 2 lze s přihlédnutím k nejistotám a předchozímu obrázku 9.141 konstatovat, že sesuv využil ke svému průběhu starou predisponovanou smykovou plochu, na které již v minulosti došlo ke smykovým pohybům.



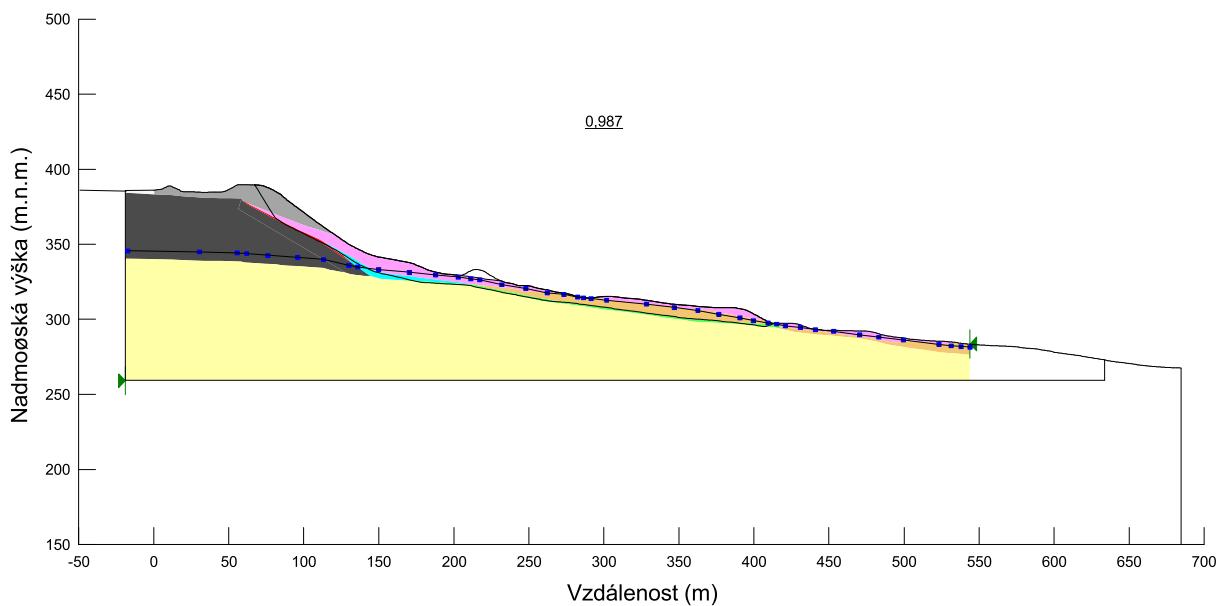
Obrázek 9.143: Stupeň stability pro řez 2, HPV v extrémní poloze. Při zadání kritických parametrů smykové pevnosti kluzným vrstvám (tufy  $\varphi_{cr} = 30^\circ$ , deluviální hlíny  $\varphi_{cr} = 24^\circ$ , rozhraní sutě/bazalt  $\varphi_{cr} = 24^\circ$ ) je svah stabilní.



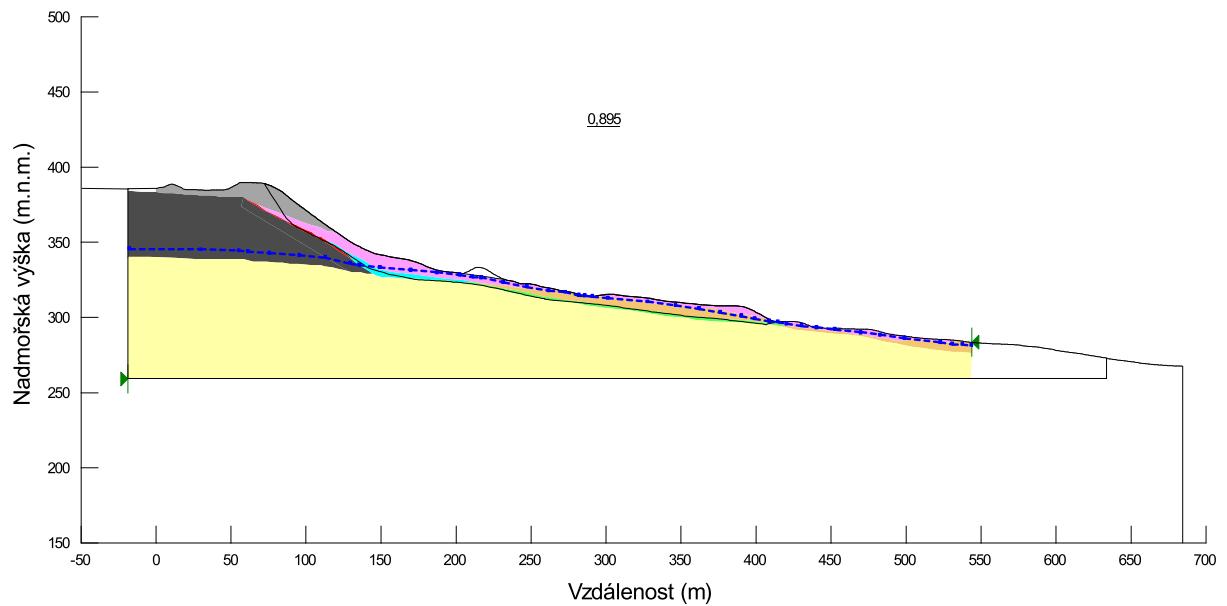
Obrázek 9.144: Vyhovující stupeň stability pro řez 2 s dálničním zárezem, HPV na povrchu slínovců. Z výsledku pro zpětně stanovené parametry smykové pevnosti vyplývá, že hlavním spouštěcím mechanismem byla vysoko položená HPV.



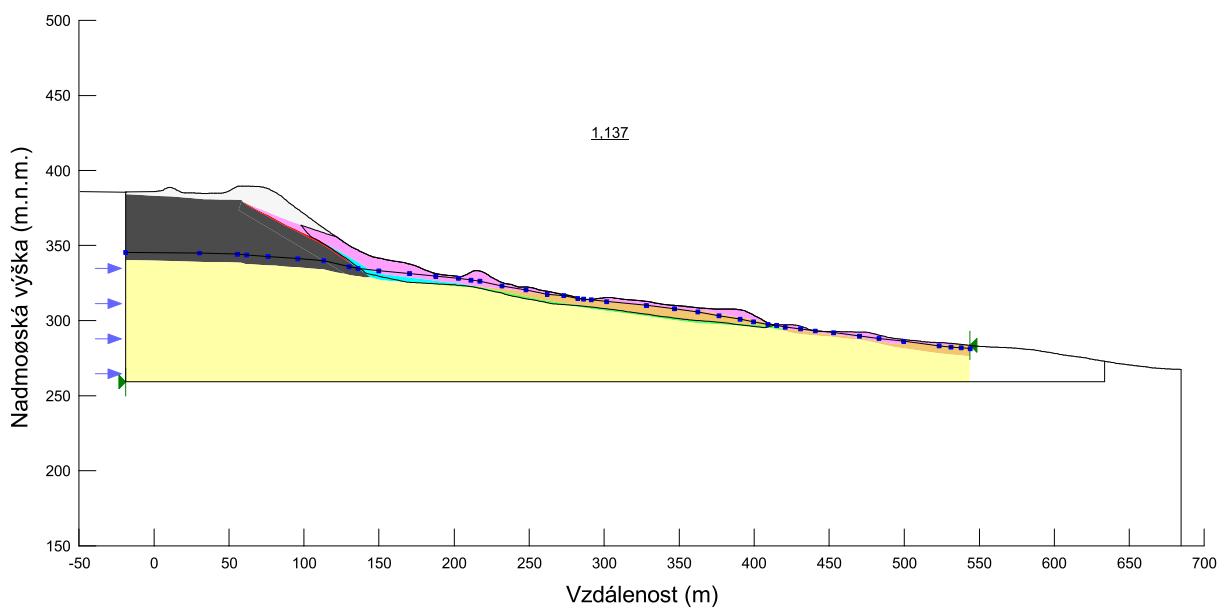
Obrázek 9.145: Stupeň stability ve stejné analýze jako v předchozím případě avšak s reziduálními parametry smykové pevnosti. Hodnota je přesto vyhovující a potvrzuje závěry v popisu obrázku 9.143.



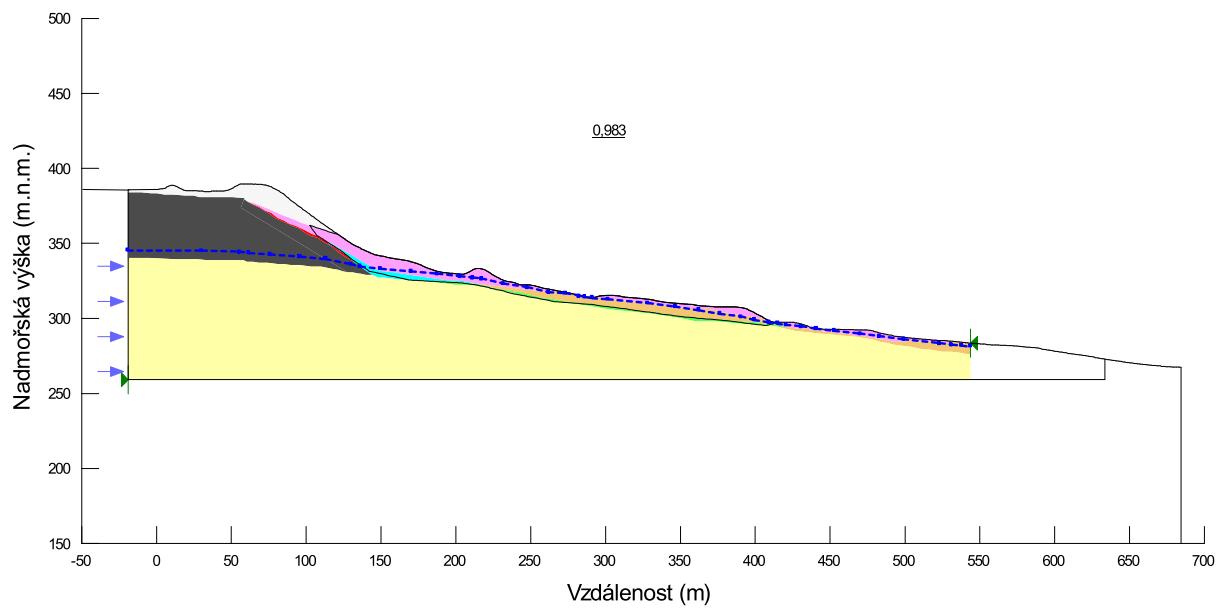
Obrázek 9.146: Nevyhovující hodnota stupně stability pro řez 2, s HPV v extrémní poloze s dálnicí, avšak bez železničního náspu. Lze konstatovat, že přítomnost železničního náspu stabilitní poměry nezhorší, ale naopak zlepšuje.



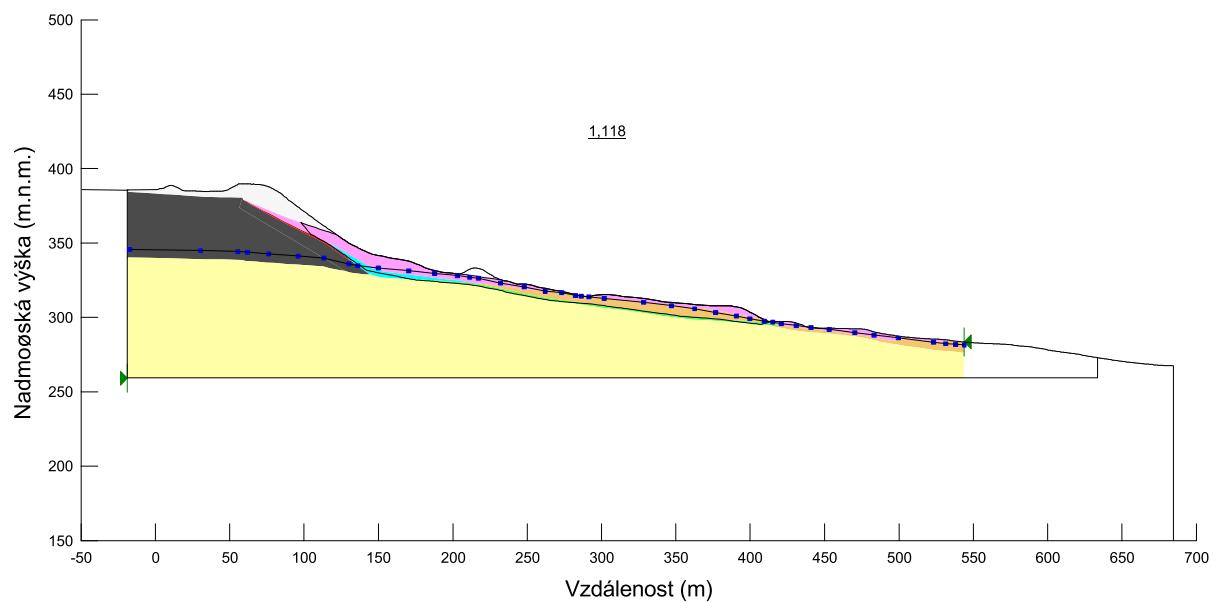
Obrázek 9.147: Tatáž analýza, z něhož je výstup na obrázku 9.146, pouze s rozdílem ve smyslu použití reziduálních hodnot úhlu vnitřního tření místo zpětně získaných.



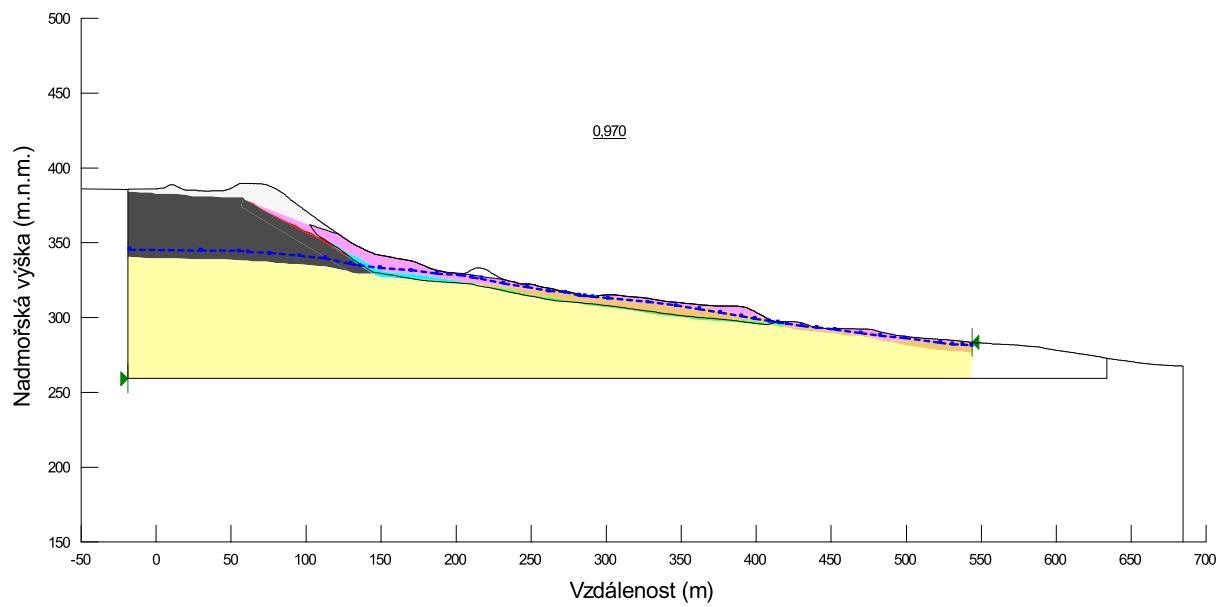
Obrázek 9.148: Vyhovující stupeň stability na smykové ploše pro řez 2, extrémní poloha HPV, se zářezem dálnice avšak bez hmot deponie (výsypky) nebo odvalu z lomu. Z výsledku vyplývá, že výsypka má na stabilitu značný vliv.



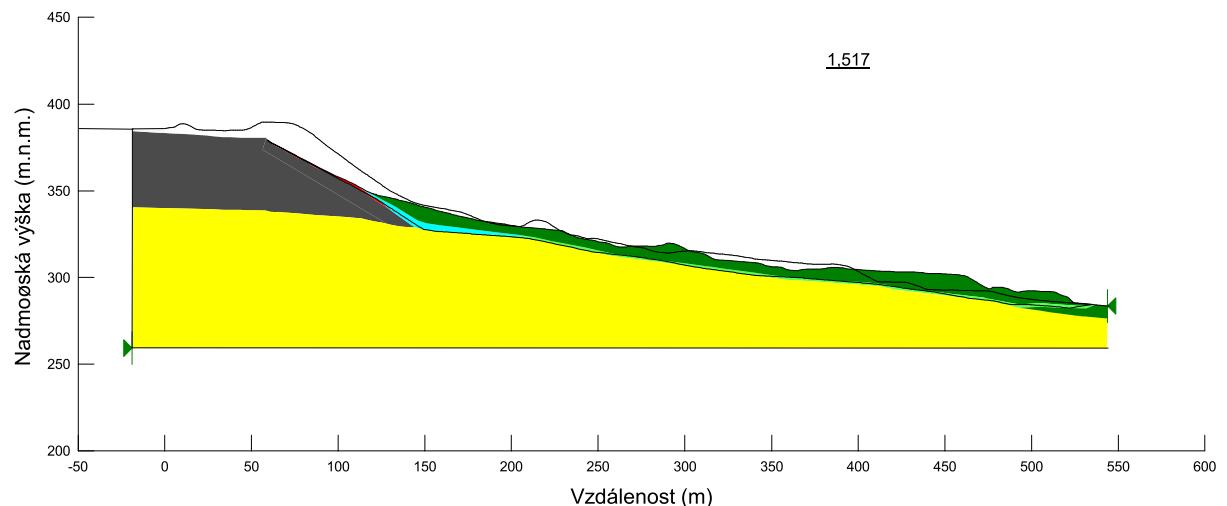
Obrázek 9.149: Pro stejnou analýzu avšak při reziduálních parametrech v kluzné zóně je stupeň stability nižší než 1 – svah zůstává nestabilní.



Obrázek 9.150: Vyhovující stupeň stability pro řez 1, extrémní poloha HPV, bez železničního náspu, se zárezem pro dálnici, bez výsypky kamenolomu.



Obrázek 9.151: Pro stejnou analýzu avšak při reziduálních parametrech v kluzné zóně je stupeň mírně nižší než 1.



Obrázek 9.152: Vyhovující stupeň stability pro řez 2, stav po 1. etapě sanace. Ve výpočtu byly zadány parametry reziduální, smyková zóna prodloužena těsně za hlavní těleso sesutých hmot, zeminy nad smykovou plochou simulovány jako jeden kvazihomogenní celek. HPV odpovídá stavu po 1. etapě sanace.

## **9.13 Geotechnické zhodnocení – Souhrn výsledků a diskuse**

Výsledné hodnoty výpočtových a normalizovaných stupňů stability jsou uvedeny v tabulkách 9.15 až 9.16. Dále v textu jsou pak výsledky komentovány.

V tabulce 9.16 jsou hlavní analýzy označeny tučným fontem, parametrické studie základním fontem. Červeně jsou označeny svahy nestabilní nebo potenciálně nestabilní (FSc nižší či jen zanedbatelně vyšší než 1), černě jsou označeny situace považované za stabilní.

Kromě analýz A až F, prováděných na 3D modelech, jsou do tabulek 9.15 a 9.16 včleněny ještě analýzy G a H, prováděné pouze ve 2D: jedná se o analýzu po I etapě sanace (analýza G) a analýzu bez výsypky kamenolomu a náspu železnice, označovanou D-0-0 v kapitole 9.12 (analýza H).

Tabulka 9.15: Souhrn výsledků numerických analýz: výpočtové stupně stability

### Výpočtové stupně stability FSc

	3D základní parametry	3D smyková plocha $\phi=19^\circ$	3D kontakt bazalt - kamenivo $\phi=28^\circ$	3D deluviaální sedimenty $c=30 \text{ kPa}$	2D - řez I - základní parametry	2D - řez II - základní parametry	2D - řez I - zpětná analýza	2D - řez II - zpětná analýza	2D - řez I - zpětná analýza, smyková plocha pod násepem železnice
<b>Analýza A: stav v době sesuvu</b>	1,227	1,400	1,262	1,370	0,959	0,904	1,003	0,999	-
<b>Analýza B: bez výsypky kamenolomu</b>	1,349	1,595	1,367	-	1,059	0,983	1,124	1,137	-
<b>Analýza C: HPV na úrovni slínovce</b>	1,413	1,587	1,456	-	1,177	1,125	1,235	1,242	-
<b>Analýza D: bez náspu železnice</b>	1,200	-	-	-	0,946	0,895	0,987	0,987	-
<b>Analýza E: bez zářezu dálnice</b>	1,268	-	-	1,578	1,061	1,031	1,118	1,140	0,968
<b>Analýza F: smyková plocha kritické parametry</b>	1,649	-	-	-	1,405	1,340	-	-	-
<b>Analýza G: po 1 etapě sanace</b>	-	-	-	-	1,734	1,517	-	-	-
<b>Analýza H: bez výsypky lomu a náspu železnice</b>	-	-	-	-	1,042	0,970	1,107	1,118	-

*Tabulka 9.16: Souhrn výsledků numerických analýz: normalizované stupně stability*

**Normalizované stupně stability FS<sub>n</sub>**

3D - základní parametry	3D - smyková plocha $\phi=19^\circ$	3D - kontakt bazalt - kamenivo $\phi=28^\circ$	3D - deluvální sedimenty $c=30 \text{ kPa}$	2D - řez I - základní parametry	2D - řez II - základní parametry	2D - řez I - zpětná analýza	2D - řez II - zpětná analýza	2D - řez I - zpětná analýza pod násepem železnice
<b>Analýza A: stav v době sesuvu</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>-</b>
<b>Analýza B: bez výsypky kamenolomu</b>	<b>1,099</b>	<b>1,140</b>	<b>1,083</b>	<b>-</b>	<b>1,104</b>	<b>1,087</b>	<b>1,121</b>	<b>1,138</b>
<b>Analýza C: HPV na úrovni sílnovce</b>	<b>1,151</b>	<b>1,134</b>	<b>1,154</b>	<b>-</b>	<b>1,227</b>	<b>1,244</b>	<b>1,231</b>	<b>1,243</b>
<b>Analýza D: bez náspu železnice</b>	<b>0,978</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,986</b>	<b>0,990</b>	<b>0,984</b>	<b>0,988</b>
<b>Analýza E: bez zářezu dálnice</b>	<b>1,033</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,151</b>	<b>1,106</b>	<b>1,140</b>	<b>1,115</b>	<b>1,141</b>
<b>Analýza F: smyková plocha kritické parametry</b>	<b>1,343</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,465</b>	<b>1,482</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Analýza G: po I etapě sanace</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,808</b>	<b>1,678</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Analýza H: bez výsypky lomu a náspu železnice</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,087</b>	<b>1,073</b>	<b>1,104</b>	<b>1,119</b>

V této kapitole jsou diskutovány výsledky všech provedených numerických analýz.

- Výpočtový stupeň stability FSc se liší mezi 3D a 2D analýzami, přičemž 3D analýzy udávají vyšší výpočtový stupeň stability než 2D analýzy. Například pro základní analýzu A se jedná o FSc=1,23 (3D analýza) v porovnání s FSc mezi 0,90 a 0,95 (2D analýzy). Rozdíl je pravděpodobně způsoben kinematickým omezením nepravidelné plošné smykové plochy v 3D v porovnání s líniovou smykovou plochou ve 2D. Výsledek 3D je považován za realističtější, neboť 3D tvar smykové plochy approximuje skutečnost zjištěnou na základě vrtného průzkumu. 3D model indikuje, že pevnost materiálu na smykové ploše, která kontroluje stabilitu svahu, odpovídá hodnotě  $\text{arctg}(\text{tg}(15^\circ)/1,23)=12,3^\circ$ . Tato hodnota je v rámci rozmezí reziduální pevnosti zemin na smykové ploše zjištěné z laboratorních experimentů (laboratorně bylo zjištěno rozmezí  $7,5^\circ$  až  $16^\circ$ ). Fakt, že je svah kontrolován reziduálními a ne kritickými parametry, dále dokládá analýza F, která vedla ve 3D i ve 2D na vysoký výpočtový stupeň stability (FSc=1,65 ve 3D a FSc=1,34 až 1,41 ve 2D).
- I přes odlišnou absolutní hodnotu výsledných stupňů stability FSc jsou 3D a 2D analýzy konzistentní v předpovědi normalizovaných stupňů stability FS<sub>n</sub>, které jsou adekvátnější mírou pro posouzení stability jednotlivých variant svahu, jak je popsáno v kapitole 9.4.3.
- Zjištění, že je svah kontrolován reziduální pevností implikuje, že byl svah v minulosti postižen sesuvem a že významná část smykové plochy současného sesuvu využívá smykovou plochu sesuvu historického. Je tomu tak proto, že vývoj reziduální smykové pevnosti vyžaduje relativně dlouhý pohyb na smykové ploše, ke kterému může dojít pouze v případě historické svahové deformace. Existenci historického sesuvu potvrzují inženýrskogeologické mapy zpracované před vznikem současného sesuvu (Suchý, 2000).
- Analýza B, reprezentující stav bez výsypky kamenolomu, vede k normalizovanému stupni stability FS<sub>n</sub> mezi 1,08 a 1,14 pro různé typy analýz. 3D a 2D modely konzistentně předpovídají zvýšení stupně stability. Vzhledem k tomu, že normalizace odfiltruje většinu nejistot panujících ohledně modelu a materiálových vlastností, lze svah s hodnotou FS<sub>n</sub> jen mírně vyšší než 1 uvažovat za stabilní, což je i případ analýzy B.
- Analýza s hladinou podzemní vody zaklesnutou na úroveň slínovce (C) indikuje vysoký normalizovaný stupeň stability 1,15 pro 3D simulace a 1,23-1,24 pro 2D simulace. Vzhledem k tomu, že 3D analýza v tomto případě předpovídá deformaci pouze horní části svahu (viz obrázek 9.88), jsou výsledky obou typů analýz konzistentní: 2D analýza uvažuje i pohyb těla sesuvu ve spodní části svahu, které má v tomto případě vyšší lokální stupeň stability než horní část svahu, proto je celkový normalizovaný stupeň stability předpovídáný 2D analýzou vyšší než normalizovaný stupeň stability z 3D analýzy. Tento výsledek ilustruje evidentní fakt, že by bez nastoupání hladiny podzemní vody k sesuvu nedošlo.
- Analýzy bez náspu (D) železniční trati (2D i 3D) indikují, že násep neměl z mechanického hlediska negativní vliv na stabilitu svahu. Naopak, vzhledem k jeho lokaci v plošší části sesuvu, měl dokonce mírně pozitivní vliv na stabilitu (normalizovaný stupeň stability svahu bez náspu železnice byl 0,98 pro 3D simulaci a

0,99 pro 2D simulaci). Eventuální negativní vliv náspu na stabilitu z důvodu změny hydrologického režimu analýza nestudovala, protože jej nelze dostatečně přesně kvantifikovat. Konzistentní závěry dává 2D analýza H (bez výsydky lomu a železničního náspu), která ukazuje na mírně nižší stupeň stability (o cca 0,01-0,02) než ekvivalentní 2D analýza s železničním náspem (analýza B).

- Analýza varianty bez zářezu dálnice (E) indikuje nestabilní svah pro krátký sesuv, jehož smyková plocha končí mezi násepem železnice a současnou trasou dálnice. Vypočtené hodnoty jsou  $FSn=1,03$  pro 3D analýzy a 0,97 pro 2D analýzy, přičemž 3D analýza předpovídá sesuv, jehož čelo končí mezi železničním náspem a dnešním dálničním zářezem. To znamená, že by svah byl pravděpodobně náchylný ke kolapsu i v případě absence dálničního tělesa, nicméně lze očekávat, že kdyby nebyla dálnice vedena v zářezu, ale překlenovala by sesuvné území jiným vhodnějším způsobem, k jejímu poškození v důsledku této sesuvné události by nedošlo (sesuv by ovšem poškodil těleso náspu železnice). Analýzy, v kterých je uvažována smyková plocha vedoucí až k linii dnešního zářezu ukazují, že je tato varianta stabilní ( $FSn=1,15$  pro 3D analýzu a 1,1 až 1,14 pro 2D analýzy) a tedy že by bez přičinění zářezu k sesuvu v současném rozsahu nedošlo.
- Analýza G (po první etapě sanace, pouze 2D), indikuje, že je svah po I etapě sanace za střední úrovňí hladiny podzemní vody bezpečně stabilní (normalizované stupně stability 1,68 až 1,81). Vzhledem k tomu, že nastoupání hladiny podzemní vody vede k snížení stupně stability přibližně o hodnotu 0,25 (porovnáním analýz A a C), a vzhledem k tomu, že svah je v současné době odvodňován drenážním korytem, lze konstatovat, že by byl stabilní i stav po I etapě sanace v případě srážkové události odpovídající srážkám v červnu 2013.

## 10. Závěry

Cíl: Závěrečné shrnutí příčin vzniku sesuvu na dálnici D8 u Dobkoviček v kilometráži 56,300–56,500, včetně objasnění skutečnosti, jak bylo při přípravě její stavby zohledněno, že se jedná o oblast historicky známou výskytem svahových deformací, a jaký byl vliv činnosti kamenolomu na stabilitu zájmového svahu.

Na základě provedené rešerše dostupných podkladů, terénního geofyzikálního a hydrogeologického průzkumu, geologicko-geomorfologického mapování svahových deformací v širším sesuvném území a s využitím nejmodernějších metod analýzy dat dálkového průzkumu Země a geotechnického stabilitního 2D a 3D modelování konstatujeme:

Vývoj deformace svahu nad dálnicí D8 v kilometráži 56,300 – 56,500 vyvrcholil závěrečnou akcelerací v noci z 6. na 7. června 2013. Podél převážně planární smykové plochy vznikl sesuv proudového tvaru. Smyková plocha sesuvu začíná v lomu Dobkovičky a končí v patě zářezu Z-5. Rozestavěná dálnice D8 byla poté zavalena akumulací sesuvu.

Příčinami vzniku sesuvu jsou přítížení horní části svahu deponií štěrkodrtě z lomu Dobkovičky a zvýšení hladiny podzemní vody plynoucí z kombinace nadměrných srážek a změn v hydrologickém a hydrogeologickém režimu, které byly způsobené rozšiřováním lomové těžby a zasakováním vody za náspev tratě. Vznik sesuvu byl přirozeným důsledkem této situace, což bylo potvrzeno i geotechnickými stabilitními 2-D a 3-D modely. Tento sesuv, s odlučnou stěnou v lomu Dobkovičky a smykovou plochou vytvořenou na kontaktu kvartérních sedimentů a křídových slínovců, by při absenci dálničního zářezu zničil těleso železniční tratě. Celý sesuv by podle modelů dosáhlo úrovně mezi železničním náspevem a současnou trasou dálnice a dálnice by poškozena nebyla.

Příčinou propagace smykové plochy sesuvu až do paty zářezu Z5 je, že projekt zářezu nebyl řešen v kontextu dobře známých a dlouhodobě studovaných aspektů sesuvného území - k jeho návrhu se použily analýzy stability lokálních svahů zářezu a ne analýzy řešící stabilitu širšího sesuvného území. Zářez tak byl navržený a realizovaný jako nezajištěný se sklonem svahu 1 : 2. Nezajištěný zářez byl v daném místě nevhodnou variantou vedení dálnice.

Sesuv z roku 2013 je po I. etapě sanace stabilizován, nicméně možnost vzniku dalších sesuvů v širší sesuvné oblasti přetrhává a potenciálně ohrožuje další úseky dálnice, zejména pokud nebudou respektována inženýrskogeologická a geotechnická doporučení vztahující se k podmínkám stavební činnosti v území porušeném svahovými pohyby.

## 11. Citovaná literatura

Arcadis CZ a.s. (leden 2016): Předběžná zpráva, D8 805 Lovosice – Řehlovice, II. etapa inženýrsko-geologického doprůzkumu v oblasti sesuvu Dobkovičky a v jeho předpolí v km 56,300-56,500

ARGUS (2016): 3D model sesuvu po ukončení I. etapy sanace. – ARGUS GEO Systém, Praha, formát xyz.

Archiv map ÚAZK: online na adrese:

[http://archivnimapy.cuzk.cz/mapy/map.phtml?dg=topo\\_csr1&me=-953246.202901,-1587510.7158599999,-94531.42082800006,-865194&language=cz&config=topos&resetsession=ALL&resetsession=ALL](http://archivnimapy.cuzk.cz/mapy/map.phtml?dg=topo_csr1&me=-953246.202901,-1587510.7158599999,-94531.42082800006,-865194&language=cz&config=topos&resetsession=ALL&resetsession=ALL)

AZ Consult (2014): D8 – Odstranění sesuvu v km 56,300-56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby d8 0805 – technická studie proveditelnosti technických opatření. – Návrh 1. etapa opatření. – MS AZ Consult spol. s r.o., 08/2014, Ústí nad Labem.

AZ Consult (2014): D8 – odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805, Podrobný GTP/IGP - závěrečná zpráva. – MS AZ Consult spol. s r.o., Ústí nad Labem.

AZ Consult (2014): D8 – odstranění sesuvu v Km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805, podrobný GTP/IGP, příloha 7, inženýrsko-geologická mapa 1:1000. – MS AZ Consult spol. s r.o., Ústí nad Labem.

AZ Consult (2015): Sesuv v km 56,300 - 56,500, dálnice D8 - I. etapa sanačního opatření, PDPS. – MS AZ Consult spol. s r.o., 03/2015, Ústí nad Labem.

Balatka, B., Kalvoda, J. (1995): Vývoj údolí Labe v Děčínské vrchovině. – Sborník ČGS 100, 3, 173 – 192, Praha.

Boháč J., Škopek J. (1998): Dálnice D8 – stavba 0805 Lovosice – Řehlovice. Zpráva o stabilitě zářezu v km 56,500 a násypů v km 55,340, km 57,460 a km 60,020. - MS Pragoprojekt, a.s.

Bůžková H., Led M. (1969): Průzkum po sesuvu v Prackovickém kamenolomu. MS Stavební geologie, n.p., Praha

Cajz, V., Valečka, J. (2010): Tectonic setting of the Ohře/Eger Graben between the central part of the České středohoří Mts. and the Most Basin, a regional study. – Journal of Geosciences 55, 3, 201-215.

Cruden, D.M., Varnes, D. J. (1996): Landslide types and processes. In: Turner A.K.; Schuster R.L. (eds.) Landslides: Investigation and Mitigation. – Transportation Research Board, Special Report 247, 36 – 75, Washington D.C.

ČGS, ŘSD ČR (2013): Informace pro Vládu ČR o sesuvu na dálnici D8 km 56,300 – 56,500 a návrh řešení havarijní situace. – MS ČGS, ŘSD ČR, 9 s., Praha.

ČHMÚ: [http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps\\_prfbk\\_detail.php?seq=307228](http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307228)

ČÚZK (2010): DMR 5G, listy LITC42, LITC43, LITC52, LITC53. – ČÚZK, Praha, formát xyz.

ČÚZK (2016): Digitální model reliéfu 5. generace: DMR 5G. – on-line:  
<http://geoportal.cuzk.cz/%28S%28cdeegs2e3kjpqmmsmgu5bqku%29%29/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302>

ČÚZK (2016a): WMS ortofoto. – online na adrese:  
[http://geoportal.cuzk.cz/WMS\\_ORTOFOTO\\_PUB/WMSservice.aspx](http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx)

Demek, J. et al. (1965): Geomorfologie českých zemí. – Nakladatelství ČSAV, 336 s., Praha.

Demek, J. et al. (1987): Zeměpisný lexikon ČSR: Hory a nížiny. – Academia, 584 s., Praha.

Demek, J., Mackovčin, P. eds. (2006): Zeměpisný lexikon ČR: Hory a nížiny. – AOPK ČR, 582 s., Brno.

Duncan, J. M. (1996): State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. - Journal of Geotechnical Engineering ASCE 122, 7, 577-596.

Florián, T. (2011): Posouzení stability zářezu a návrh sanačních opatření na úseku dálnice D805 km 56,200 – 57,720. – Diplomová práce, MS VŠB-TU, Ostrava.

GET (2003): Dokumentace dle zák. č. 100/2001 Sb. - Pokračování hornické činnosti v lomu Dobkovičky. – MS GET, 82 s., Praha

Glockner P., Klícha J., Kořán J. (1979): Závěrečná zpráva úkolu Dobkovičky, surovina kámen. Podrobný průzkum stavu ke dni 11.10.1979. MS Geoindustria, n.p., Dubí.

Hantschel, F. (1898): Die Erdrutsche des Mittelgebirges im Frühjahr 1898. – Mittheilungen des Nordböhmischen Excursions-Club, 21, 3, 234-238, Böhm, Leipa.

Herle, V. (2014): Zpráva o vypracování havarijního plánu pro sanaci sesuvu. - MS Arcadis CZ a.s., Praha.

Herle, V. (2015): Stanovisko společnosti ARCADIS CZ k „Podnětu k uplatnění návrhu na nahradu škody“ navrhovatele Ing. Josefa Kačírka a ke „Zaleckému superviserovskému posudku č. 12/2014 ze dne 20.12.2014“. - MS ARCADIS CZ, a.s., divize Geotechnika, Praha.

Herle, V., Novotná, I. (2014): D8 – 0805. Návrh krizového plánu pro sesuv km 56,300 až 56,500. - ARCADIS CZ, a.s., divize Geotechnika, Praha.

Hibsch, J.E. (1917): Geologische Karte des böhmischen Mittelgebirges. Blatt VIII. Umgebung von Salesel. – Tschermarks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen. Neue Folge, XXXIV Bd., Alfred Hölder, Wien.

Hibsch, J.E. (1924): Geologische Karte des Bohmischen Mittelgebirges 1 : 100 000, Děčín.

Holub, R. (2013): Závady v GPK na TK Úpořiny – Chotiměř v km 24,200 – 24,400. – MS Správa tratí Ústí nad Labem, 3s., Ústí nad Labem.

Irgang, G. (1909): Geologische Karte des böhmischen Mittlegerbirges. Blatt XII. Umgebung von Lobositz. – Tschermarks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen. Neue Fogle, XXXIV Bd., Alfred Hölder, Wien.

Janek, J. (1972): Sesuvná území u Prackovic nad Labem. - Diplomová práce, PřFUK.

Janek, J., Pašek, J. (1973): Sesovy podél trasy projektované dálnice u Prackovic. – Geologický průzkum 15, 2, 33 – 35, Praha.

Jelének, J. (2014): D8 – odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 plus stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805. AZ Consult, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Jelének, J. (2014): 3D model sesuvu - formát xyz. – AZ Consult, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Kadlec, J. (1997): Exodynamická fotointerpretace, Ústí nad Labem (list I.), měřítko 1:10 000. – MS ČGÚ, Praha.

Komárek, R. (2016): Odborne vyjadreni k sesuvu na dálnici D8 ve stavbe v prostoru Dobkovicky. – MS RK Geokonsult AB, Täby, Švédsko.

Komín, M., Šíma, J. (2014): Akce: D8, odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 – 0805. - AZ Consult, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Kopecký, J. et al. (1963): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1:200 000. M-33-IX. – ÚÚG, Praha.

Krutský, J. (2016): Dobkovičky, geologický průzkum. Etapa těžební průzkum. - MS GET, s.r.o. Praha.

Kuboušková, S. (2012): Těžba v Českém středohoří a její dopad na krajinný ráz. – MS Gymnázium Roudnice nad Labem, Středoškolská odborná činnost, 147 s., Roudnice nad Labem.

Kusák, M., Kropáček, J., Vilímek, V., Schillaci, S. (in print): Analysis of influence of tectonics on the evolution of valley networks based on SRTM DEM, Jemma River Basin, Ethiopia. – *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Comitato Glaciologico Italiano, Italy. ISSN: 0391-9838

Kycl, P. et al. (2003): Nebezpečí svahových pohybů v jv. části Českého středohoří na území okresu Litoměřice. – MS ČGS, 8 s. + 50/1 s. příloh, Praha.

Kycl, P., Rapprich, V., Mlčoch, B., Valečka, J., Zelenka, P., Čáp, P., Havlíček, P., Holásek, O., Hradecká, L., Šimůnek, Z. (2009): Dokumentace geologických odkryvů a geologických fenoménů v tělese dálnice D8 v úseku stavby 0805 Lovosice - Řehlovice a jejich aktuální význam pro upřesnění geofaktorů životního prostředí. Závěrečná zpráva. - MS Archiv ČGS, 22 s., Praha.

Kycl, P. (2013): Situační zpráva o sesuvu Dobkovičky D8 km 56,300 ke dni 11. června 2013. – MS ČGS, 5 s., Praha.

Kycl, P. (2015): D8 motorway Dobkovičky landslide: the case history and repair options. - Prague Geotechnical Days 2015, Resumé, 32 – 34, Praha.

Kycl, P. (2015): Stanovisko ČGS ke změně umístění retenční nádrže – sanace sesuvu Dobkovičky, I. etapa – „změna E“. - MS ČGS, Praha.

Kycl, P. (2015): Vyjádření České geologické služby k „Podnětu k uplatnění nároku na nahradu škody“ a ke „Znaleckému superviserovskému posudku č. 12/2014 Dobkovičky – sesuv na dálnici D8 – stavba 805“. - MS ČGS, Praha.

Marek, V. (1985): D8 – Prackovice, zpráva o výsledcích geologicko – průzkumných prací. MS Stavební geologie, n.p. Praha.

Marek, V. (1985): D8 – Lovosice – Řehlovice, zpráva o výsledcích geologicko průzkumných prací. MS Stavební geologie, n.p. Praha.

Mašín, D. (2015): The influence of experimental and sampling uncertainties on the probability of unsatisfactory performance in geotechnical applications. - Géotechnique 65, 11, 897-910.

Míča, L., Drochytka, R. (2015): Věc: Dopis ŘSD ČR ze dne 3.6.2015 ve věci D8 – sesuv Dobkovičky. -Stanovisko Fakulty stavební VUT, Brno.

Nemčok, A. (1964): Geologická stavba svahov a jej vplyv na vznik a rozšírenie zosuvov v Západných Karpatoch. – Geologický Sborník Slovenskej Akademie Vied 1, 147 – 155, Bratislava.

Nemčok, A., Pašek, J., Rybář, J. (1974): Dělení svahových pohybů. – Sborník geologických věd, Řada HIG, 11, 77 – 93, Praha.

Novotný, J., Abramčuková, A. (2009a): Technické podmínky GEOTECHNICKÝ PRŮZKUM PRO POZEMNÍ KOMUNIKACE – část A: Zásady geotechnického průzkumu. - Schváleno MD-OSI č.j. 485/09-910-IPK/1 ze dne 17.6.09 s účinností od 1.července 2009 se současným zrušením 2. znění TP schváleného MDS-OPK č. j. 21890/01-123 z 11.5.2001, červen 2009, ARCADIS Geotechnika a.s.

Novotný, J., Abramčuková, A. (2009b): Technické podmínky GEOTECHNICKÝ PRŮZKUM PRO POZEMNÍ KOMUNIKACE – část B: Zásady geotechnického průzkumu. - Schváleno MD-OSI č.j. 485/09-910-IPK/1 ze dne 17.6.09 s účinností od 1.července 2009 se současným zrušením 2. znění TP schváleného MDS-OPK č. j. 21890/01-123 z 11.5.2001, červen 2009, ARCADIS Geotechnika a.s.

Pánek, T., Hartvich, F., Jankovská, V., Klimeš, J., Tábořík, P., Bubík, M., Smolková, V., Hradecký, J. (2014): Large Late Pleistocene landslides from the marginal slope of the Flysch Carpathians. - Landslides 11, 6, 981-992.

Paseka, A., Bažant, Z. (2014): Dobkovičky sesuv na dálnici D8 – stavba 805. Znalecký superviserovský posudek. - MS Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Brno.

Pašek, J., Karous, M., Boháč, J. a Stemberk, J. (1996): Expertní posouzení svahových deformací v úseku dálnice D-8, stavba 0805 (širší oblast Prackovic). - MS PÚDIS, Praha.

Pašek, J. (1997): Účelová inženýrskogeologická mapa 1:2 000 Svahové deformace Dobkovičky – Radejčín. – PÚDIS, Praha.

Pašek, J. (2004): Dálnice D8, stavba 805, varianta „tunel Kubačka“, srovnávací posouzení geotechnických podmínek výstavby. - MS ŘSD, Praha.

Pašek, J., Janek, J. (1972): Inženýrskogeologický průzkum dálnice D8 v úseku Chotiměř – Radejčín, km 62,2 – 67,8. I. etapa. – MS Geologický ústav ČSAV.

Pašek, J., Janek, J. (1972): Mapa geologicko-geomorfologická 1:10 000. – MS Geologický ústav ČSAV, Praha.

Pašek, J., Janek, J., Hroch, Z., Francek, J. (1972): Inženýrskogeologický průzkum dálnice D8 v úseku Chotiměř – Radejčín, km 62,2 – 67,8. II. etapa. MS Geologický ústav ČSAV – Stavební geologie, n.p., Praha.

Pašek, J., Rybář, J. (1969): Inženýrskogeologické posouzení některých obtížných úseků trasy dálnice Praha – Drážďany. - MS Vojenský projektový ústav, Praha.

Pašek, J., Špůrek, J. (1963): Mapa svahových deformací vymapovaná v rámci celostátní systematické registrace sesuvních území v hospodářsky významných oblastech v letech 1962-63. List M-33-53-A-c Lovosice. – MS ÚSMH AVČR, Praha.

Peiter, W. (1900): Die geologischen Verhältnisse im Lobositzer Bezirke. – Aus Deutchen Bergen, 15, 3-4, 40-46, Aussig.

Perissin, D., Wang, Z., Wang, T. (2011): The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. – Proceedings of ISRSE 2010, Sydney.

Plšková, M. (2016): Předběžná zpráva D8-0805 Lovosice-Řehlovice II. etapa inženýrsko-geologického doprůzkumu v oblasti sesuvu Dobkovičky a v jeho předpolí v km 56.300-56.500. – MS Arcadis a.s., Praha.

Plšková, M., Záruba, J. (2014): Závěrečná zpráva D8 – 0805 Lovosice – Řehlovice. Inženýrskogeologický průzkum a monitoring předpolí sesuvu Dobkovičky v km 56,300 – 56,500. - MS ARCADIS CZ, a.s., divize Geotechnika, Praha.

Plšková, M., Záruba, J., Starý J. (2016): Předběžná zpráva D8-0805 Lovosice-Řehlovice, II. etapa inženýrsko-geologického doprůzkumu v oblasti sesuvu Dobkovičky a v jeho předpolí v km 56.300-56.500. - MS Arcadis a.s., Praha

Pod Kubačkou (2016): Kamenolom Prackovice nad Labem. – online na adrese: <http://pod-kubackou.webnode.cz/a5-zastaveni2/kamenolom-prackovice-n-l/>

Pragoprojekt (2004): Obj A101 – Hlavní trasa km 48,276970 – 64,689551 – 1. Technická zpráva. – MS RSD ČR, 25 s., Praha.

Pragoprojekt (2008): Zaměření stavby dálnice D 0805. – Pragoprojekt, Praha, formát txt.

Quitt, E. (1975): Klimatické oblasti ČSR, 1 : 500 000. Brno, GgÚ ČSAV.

Registr sesuvů – Geofond (2016): Mapová aplikace Registru sesuvů ČGS – Geofondu. – online na adrese: [http://mapy.geology.cz/sesuvy\\_geofond/](http://mapy.geology.cz/sesuvy_geofond/)

Růžička, J. (2016): Znalecký posudek. Specializovaná redukce znaleckého posudku č. 1202 – 22/2015 ze dne 31.1.2016. Bánsko – geologické posouzení vzniku sesuvu dne 7.6.2013 s přihlédnutím k činnosti lomu Dobkovičky. - MS Kámen Zbraslav, a.s., Praha.

Rybář, J. (2002): Regional types of deep-seated slope failures in the areas of Tertiary volcanics in the Bohemian Massif. In: Rybář, J., Stemberk, J., Wagner, P. (eds): Landslides, 299 – 303, Lisse.

Rybář, J., Bůžek, J., Nýdl, T., Stemberk, J., Suchý, J., Valigurský, L. (1999): Hodnocení rizik nestability svahů v oblasti Valašské Meziříčí - Mikulůvka - Jablunka - Malá Bystřice v okrese Vsetín. – MS ÚSMH AVČR, Praha.

Rybář, J., Klimeš, J., Kycl, P., Novotný, J., Blahút, J., Malík, J., Marek, T. (2014): Rozbor vlivu klimatu na zvýšený výskyt svahových deformací na území Českého masivu v období 2010 až 2013. – Geotechnika, 4, 9 – 20, Praha.

Rybář, J., Stemberk, J., Suchý, J. (1997): Zpráva o inženýrskogeologickém mapování svahových pohybů ve vybraných modelových oblastech v údolí Labe, projekt MŽP ČR: PPŽP 630/1/97 "Sestavení mapy přírodních rizik v údolí Labe mezi Hřenskem a Ústím nad Labem, se zvláštním zřetelem na svahové pohyby v údolí Labe na území okresu Ústí nad Labem". – MS ÚSMH AVČR, 35 s., Praha.

Rybář, J., Suchý, J. (1997): Účelová inženýrskogeologická mapa, modelová oblast Prackovice, Měřítka 1:5 000. – MS ÚSMH AVČR, Praha.

Rybář, J., Vilímek, V., Cílek, V. (2000): Process analysis of deep slope failures in České středohoří neovolcanites. – Acta Montana IRSM AS CR, AB 8(115), 39 – 46, Praha.

Šrbený, O., Čech, S., Valečka, J., Domas, J. (2001): Geologická mapa 02-41 Ústí nad Labem. Soubor geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů. - Český geologický ústav, Praha.

Silniční a dálniční síť ČR: online na adrese:  
[http://geoportal.jsdi.cz/flexviewers/Silnicni\\_a\\_dalnicni\\_sit\\_CR/](http://geoportal.jsdi.cz/flexviewers/Silnicni_a_dalnicni_sit_CR/)

SLOPE/W (2012): An engineering methodology, user manual, GEO-SLOPE. - Alberta, Canada.

Stemberk, J., Rybář J. (2005): Risk assessment of deep-seated slope failures in the Czech Republic. In: Landslide Risk Management (Hungr, Fell, Couture eds.), 497 – 502, London.

Suchomel, R., Mašín, D. (2010): Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c-phi soil. - Computers and Geotechnics 37, 1-2, 132-140.

Suchý, J. (2000): Svalové deformace v labském údolí v Českém Středohoří. – PhD. disertační práce, MS Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha.

Suchý, J., Rybář, J. (1997): Rajonová mapa náchylnosti území k porušení stability svahů, Modelové území Prackovice, Měřítka 1:10 000. – MS ÚSMH AVČR, Praha.

Suchý, J. et al. (2014): D8 – Odstranění sesuvu v km 56,300 - 56,500 + Stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805; Podrobný GTP / IGP. – AZ Consult, Ústí nad Labem

Suchý, J., et al. (2015): Dálnice D8 0805. Odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 805. - MS AZ Consult, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Svalové nestability (2016): Mapová aplikace Registru svahových nestabilit ČGS. – online na adrese: [http://mapy.geology.cz/sesovy\\_cgs/](http://mapy.geology.cz/sesovy_cgs/)

Svoboda, B. (2013): Znalecký posudek č. 19/13 o geologickém průzkumu pro posouzení stability svahu. – MS Kámen Zbraslav, 124 s., Praha.

Svoboda, B. (2015): Znalecký posudek č. 05/15, lokalita Dobkovičky. - MS Kámen Zbraslav, a.s., Praha.

Svoboda, D. (2015): Sesuv v km 56,300 - 56,500, dálnice D8 - I. etapa sanačního opatření, Stavební objekt: SO 830 Terénní úpravy, Příloha C.830.1., Revize: D, C.830.1. Technická zpráva. – MS AZ Consult spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Šebesta, J. (1997): Rajónová mapa nebezpečí svahových pohybů, Ústí nad Labem (list I.), měřítka 1:10 000. – MS ČGÚ, Praha.

Šebesta, J. et al. (1997): Nebezpečí svahových pohybů v údolí Labe, okres Ústí nad Labem. – ČGÚ, 62 s. + 58 s. příloh, Praha.

Ševčík, J. (1969): Závěrečná zpráva Dálnice Praha – Rájec (D8), úsek Lovosice – Rájec. - MS Geoindustria, n.p., Praha.

Šíma, J., Komín, M., David, M. (2014): D8 – odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + Stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805 – Technická studie proveditelnosti technických opatření, I. etapa. - MS AZ CONSULT, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Šíma, J., Komín, M., Kůrka, J., Vít, P. (2014): D8 – Odstranění sesuvu v km 56,300 – 56,500 + stabilizace oblasti kolem stavby D8 0805 – Technická studie proveditelnosti technických opatření, II. etapa. - MS AZ CONSULT, spol. s r.o., Ústí nad Labem.

Terzaghi, K. (1950): Mechanism of Landslides. In: Engineering Geology (Berkel, ed.) Volume. Ed. Da, The Geological Society of America, New York.

Tyráček, J., Westaway, R., Bridland, D. (2004): River terraces of the Vltava and Labe (Elbe) system, Czech Republic, and their implications for the uplift history of the Bohemian Massif. – Proceedings of the Geologists' Association, 115, 101 – 124.

Údaje o území: online na adrese:

[http://mapy.geology.cz/arcgis/services/Dulni\\_Dila/Udaje\\_o\\_uzemi/MapServer/WmsServer](http://mapy.geology.cz/arcgis/services/Dulni_Dila/Udaje_o_uzemi/MapServer/WmsServer)  
VUMOP: online na adrese: <http://geoportal.vumop.cz/index.php?projekt=zchbpej&s=mapa>

Valečka, J., Adamovič, J., Cajz, V., Kadlec, J., Šebesta, J., Burda, J. (1997): Geologická mapa, Ústí nad Labem (list I.), měřítko 1:10 000. – MS ČGÚ, Praha.

Valtr, V. (2014): Geofyzikální průzkum na lokalitě Sesuv dálnice D8 u Dobkoviček. Závěrečná zpráva. MS Geotrend s.r.o., Slaný.

Vorel, J., Březina, B., Červinka, Š., Marek, V., Nohejl, S., Tobolková, J. (1997): Podrobný geotechnický průzkum pro dálnici D8, stavba D 0805, km 48,277 – 64,690, Lovosice – Řehlovice. – MS PÚDIS, Praha.

Vorel, J. et al. (1998): Doplňující geotechnický průzkum pro dálnici D8, stavba 0805, km 48,277 – 64,690, Lovosice – Řehlovice. MS PÚDIS, a.s., Praha.

Vitásek, P. (2015): Dálnice D8, stavba 0805 A, sesuv Dobkovičky, km 56,300 – 56,500. Dokumentace doplňkového inženýrskogeologického průzkumu. - MS SUDOP. Praha.

Vitásek, P. (2015): Dálnice D8, stavba 0805 A, sesuv Dobkovičky, km 56,300 – 56,500. Dokumentace doplňkového inženýrskogeologického průzkumu, doplněk č. 1. - MS SUDOP, Praha.

Vrzák, F. (2016): Závěrečná technická zpráva. Kamenolom Dobkovičky, geologický průzkum – technické vrtné práce. - MS Stavební geologie – IGHG, spol. s r.o., Tachovice.

Záruba J. (2010): Geotechnická pomoc D805, km 56,200 – 57,720, stability zářezu, návrh sanačních opatření, dokumentace sond, laboratorní zkoušky zemin. MS ARCADIS CZ, a.s., divize Geotechnika, Praha.

Ing. Jiří Záruba (2011), Inženýrskogeologický doprůzkum, stabilitní výpočty v km 56.160-660, ARCADIS GEOTECHNIKA, 07/2011

Záruba J. (2013): Zpráva D8 – 0805. Geotechnická pomoc – výsledky měření inklinovrtů IND 1 – IND 12 v zářezu km 56,200 až 56,700. - MS ARCADIS CZ, a.s., Praha.

Záruba J. (2014): Zpráva D8 – 0805. Geotechnická pomoc – výsledky měření inklinovrtů IND 1 – IND 12 v zářezu km 56,200 až 56,700. - MS ARCADIS CZ, a.s., Praha.