



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Doprava

Ministerstvo dopravy
Státní fond dopravní
infrastruktury



Jiná ověření:

Paré:

Orientační schéma:


Razítko oprávněné osoby:



ŽST Lovosice zast. Lukavec
zast. Nové Kopisty
ŽST Bohušovice nad Ohří

Podpis:

Datum:

Revize:	Datum:	Popis:	Kontroloval:
000	30.09.2023	Definitivní odevzdání dokumentace	Ing. Michal Dvořák

Stavebník/Investor:	Správa železnic, státní organizace		SPRÁVA ŽELEZNIC
Adresa:	Dlážděná 1003/7, 110 00 Praha 1		
Zástupce investora:	Stavební správa západ		
Adresa:	Ke Štvanici 656/3, 186 00 Praha 8		

Zhotovitel díla:	EXprojekt s.r.o.	
Adresa:	Heršpická 758/13, 619 00 Brno	
Kontakt:	T: +420 533 312 000 E: info@exprojekt.cz	
Zhotovitel objektu:	HG PARTNER s.r.o.	
Adresa:	Smetanova 200, 250 82 Úvaly	
Kontakt:	T: +420 777 167 967 E: dvorak@hgpartner.cz	
Hlavní projektant (HIP):	Ing. Petr Jemelka Ing. Dominik Mojžíšek	Specialista:

Název stavby/akce:	Sanace železničního spodku Lovosice - Bohušovice	Označení investora: S631500901
		Zakázka: 2020-077
Název části:	Souhrnná technická zpráva	Označení části: B.10.4.2
Název objektu/dílčí části:	Posouzení stability zemního tělesa železničního násypu	Označení objektu/komplexu: -
Název přílohy:	-	Číslo přílohy (typ/pořadí): 1. 001
Název dílčí části přílohy:		
Odpovědný projektant: Ing. Michal Dvořák	Zpracovatel přílohy: Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.	Měřítko: - Formáty: 27 x A4
Kraj: Ústecký	Katastrální území: viz textová část	TUDU: 0801 26
		Stupeň dokumentace: DUSP+PDPS
		Smluvní datum zpracování: 30.09.2023

Kódové označení přílohy:

S631500901_PDPS_B1042_XXXXXXX_XX_1_001_000



Vysoké učení technické
v Brně

Fakulta stavební,
Centrum AdMas
Ústav geotechniky
Veveří 331/95, 602 00
Brno

tel.: 541 147 234
IČO 00216305, DIČ
CZ00216305



Sanace železničního spodku v úseku

Lovosice – Bohušovice nad Ohří

Posouzení stability zemního tělesa železničního násypu

BRNO, říjen 2021

Závěrečná zpráva k zakázce

SR 122157142

Sanace železničního spodku v úseku

Lovosice – Bohušovice nad Ohří

Posouzení stability zemního tělesa železničního násypu

Objednatel:	HG Partner s.r.o Smetanova 200 250 82 Úvaly IČO: 27221253/ DIČ: 27221253
Odpovědný řešitel:	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Spolupracovali:	doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D. Ing. Jiří Boštík, Ph.D.
Pracoviště:	Ústav geotechniky, Centrum AdMaS Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně Veveří 331/95, 602 00 Brno IČ: 00216305 / DIČ: CZ 00216305
Zpracováno dne:	Brno, 29. 10. 2021

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
odpovědný řešitel

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
vedoucí Ústavu geotechniky

OBSAH

1.	CÍLE A PŘEDMĚT ZPRÁVY.....	4
2.	BIBLIOGRAFIE	5
3.	ZÁKLADNÍ ÚDAJE O KONSTRUKCI A PODLOŽÍ	6
3.1	LOKALITA STAVBY	6
3.2	GEOTECHNICKÉ ZHODNOCENÍ GEOLOGICKÝCH A HYDROGEOLOGICKÝCH POMĚRŮ	7
3.3	NAVRHOVANÁ SANACE ŽELEZNIČNÍHO SPODKU	8
4.	TEORETICKÉ PRINCIPY.....	10
4.1	MODEL PROUDĚNÍ	10
4.2	STABILITNÍ ANALÝZA	11
4.3	METODIKA POSOUZENÍ.....	12
	Posouzení dle stupňů bezpečnosti	12
	Posouzení dle metody dílčích součinitelů (mezních stavů) v souladu s ČSN EN 1997-1 – NP 3.....	12
5.	VÝPOČETNÍ MODEL.....	14
5.1	POPIS VYTVOŘENÉHO MATEMATICKÉHO MODEL	14
5.2	VÝPOČETNÍ FÁZE.....	14
5.3	POUŽITÉ MATERIÁLOVÉ MODEL Y A VSTUPNÍ PARAMETRY	15
5.4	ZATÍŽENÍ OD KOLEJOVÉ DOPRAVY	18
6.	VÝSLEDKY VÝPOČTŮ A ZHODNOCENÍ	19
7.	ZÁVĚR.....	20
	SEZNAM PŘÍLOH.....	20

1. CÍLE A PŘEDMĚT ZPRÁVY

Předmětem tohoto dokumentu je posouzení vnější stability zemního tělesa železničního násypu, úsek Lovosice – Bohušovice, za povodní (PV_{100}). V důsledku zaplavení území v okolí tratě může docházet k saturaci zemního tělesa železničního násypu vodou, co má nepříznivý vliv na stabilitní poměry zemní konstrukce.

Posouzení bylo provedeno v rámci navrhované rekonstrukce trati, které součástí je také sanace železničního spodku pomocí šterkových pilířů. Analyzovány byly dva příčné řezy (PF 2 – km 491,050 a PF 3 – km 491,925). Výpočty byly provedeny jak pro časově stacionární, tak nestacionární režim filtračního proudění. V rámci analýz s časově nestacionárním režimem filtračního proudění bylo ověřováno, jak rychle bude probíhat sycení železničního tělesa za povodně. Posouzení vycházelo především z následujících podkladů: geotechnický průzkum pražcového podloží [1], charakteristický příčný řez [2], pracovní příčné řezy vybrané pro posouzení [3] a návrh stacionárních a nestacionárních zatěžovacích stavů [4].

V textu zprávy je používána klasifikace zemin dle ČSN 73 6133. Výpočty byly provedeny v programu Plaxis 2D jako rovině deformační úloha. Ve zprávě je používán výškový systém Balt po vyrovnání (Bpv).

2. BIBLIOGRAFIE

1. Kubát, A. Sanace železničního spodku v úseku Lovosice - Bohušovice. *Železniční spodek - Geotechnický průzkum pražcového podloží*. Praha : GeoTec-GS, a.s., 2021.
2. EXprojekt s.r.o. Charakteristický řez; Kralupy n.V. - Lovosice; staničení 490,800 000; Lovosice.
3. Dvořák, M. Aktualizace příčných řezů pro posouzení [elektronická pošta]. *Message to: mica.l@fce.vutbr.cz*. 13.10.2021, 8:41.
4. Dvořák, M. Bohušovice návrhové hladiny. *Message to: chalmovsky.j@fce.vutbr.cz*. 21.09.2021, 9:52.
5. Správa železniční dopravní cesty. SŽDC S4. *Železniční spodek*. Praha : Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, , 2008.
6. ČSN 73 6301. *Projektování železničních drah*. místo neznámé : Český normalizační institut , 1998.
7. ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla. 2006.
8. Schanz, T., Vermeer, P.A. a Bonnier, P.G. The hardening soil model: Formulation and verification . *Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of Plaxis* . 1999.
9. LOOK, B. *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Londýn : Taylor & Francis Group, 2007.
10. Tan, S. A., Tjahyono, S. a Oo, K. K. Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2008, Sv. 134, 2.
11. REDDI, Lakshmi N. *Seepage in soils: principles and applications*. místo neznámé : John Wiley & Sons, 2003.
12. GALAVI, V. *Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analysis in Plaxis 2D and 3D, Plaxis report*. 2010.
13. Říha, J. a Špano, M. a kol. *Využití metody dílčích součinitelů při hodnocení bezpečnosti vodních děl a odvození mezních hodnot TBD*. , 2017.
14. ČSN EN 15528 Železniční aplikace – Traťové třídy zatížení pro určení vztahu mezi dovoleným zatížením infrastruktury a maximálním zatížením vozidla . místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
15. Brikngreve, R.B.J. a kol. *Plaxis 2D 2019*. Delft, the Netherlands : Plaxis bv, Plaxis bv.
16. Tan, S.A. a Khine, Khine Oo. Finite element modeling of stone columns – a case history. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005.
17. ČSN 73 6133 - Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Praha : Český normalizační institut, 2010.
18. ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 2: Zásady pro zařizování*.

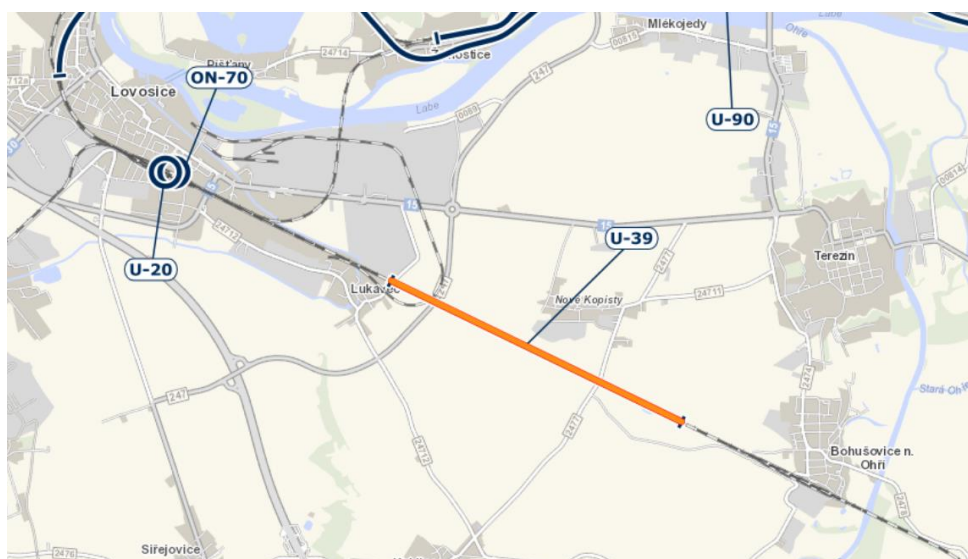
3. ZÁKLADNÍ ÚDAJE O KONSTRUKCI A PODLOŽÍ

3.1 *Lokalita stavby*

Analýzovaný železniční úsek spojuje města Lovosice a Bohušovice nad Ohří a je součástí trati 090 Praha – Ústí nad Labem - Děčín. V rámci rekonstrukce předmětného úseku je plánována sanace železničního spodku v délce 3 km přibližně v prostoru mezi zastávkami Nové Kopisty a Lukavec.



Obr. 3-1 Poloha železniční tratě (www.mapy.cz)



Obr. 3-2 Předmětný úsek s plánovanou sanací železničního spodku (www.mapy.spravazeleznic.cz)

3.2 *Geotechnické zhodnocení geologických a hydrogeologických poměrů*

Výřez geologické mapy předmětné lokality je znázorněn na Obr. 3-3. Zhodnocení inženýrsko-geologických podmínek vychází z předaného podkladu [1], který se týká geotechnického průzkumu pražcového podloží. Cílem průzkumu bylo ověření skladby a stavu stávajícího pražcového podloží, a to s ohledem na úroveň hladiny podzemní vody, geotechnických vlastností zemin tvořících zemní pláš včetně ověření charakteru a složení konstrukčních vrstev, zemin násypů a jejich podloží. Pro zjištění těchto informací byly provedeny kopané sondy, statické zatěžovací zkoušky v úrovni zemní pláň, těžké dynamické penetrační zkoušky a průzkumné jádrové vrty také skrz násypové těleso do podloží násypů. Průzkumné práce proběhly ve dvou etapách.

Na základě informací uvedených v podkladu [1] se v trase železnice nachází geologické poměry:

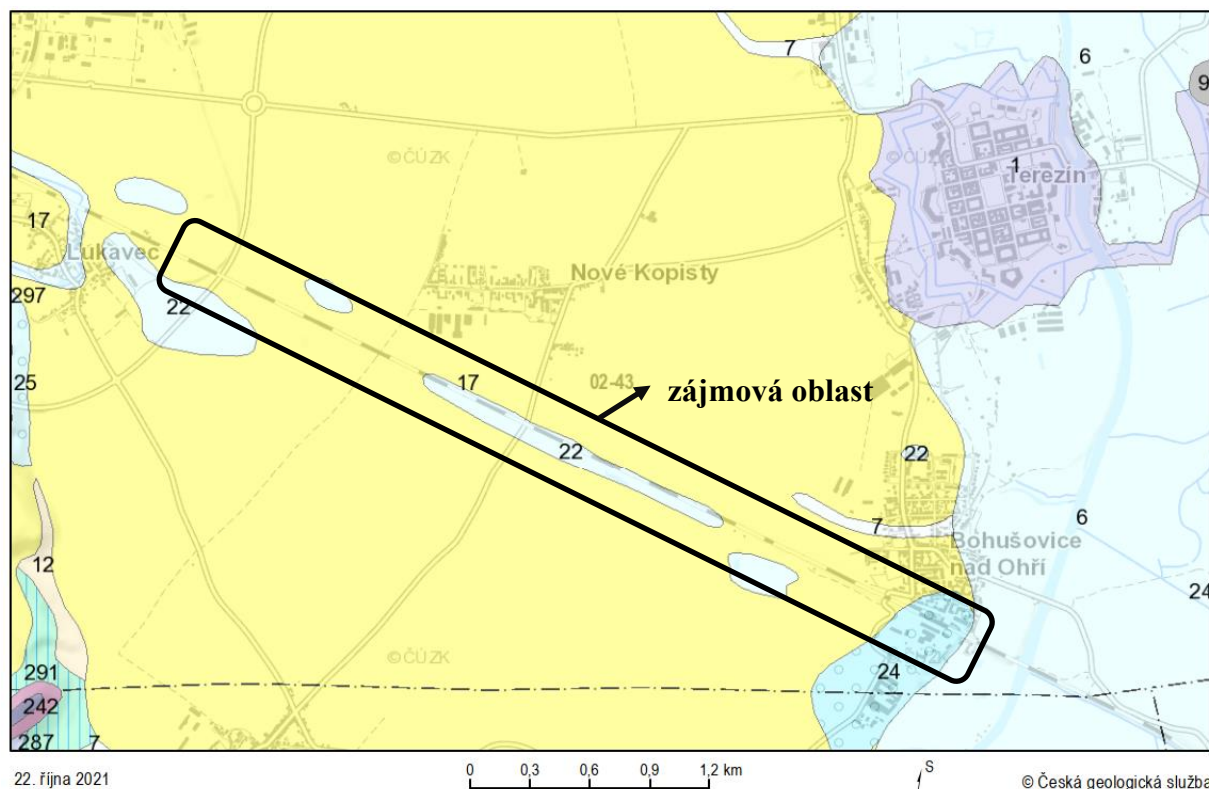
Předkvartérní podklad (křída). je tvořen horninami mesozoika – svrchní křídý, stupeň turon. Jde o mořské sedimenty charakteru vápnitých prachovců, vápnitých jílovců a slínovců. Ve svrchních částech jsou horniny prachovitě zvětralé v mocnosti cca 1 – 3 m. Hluběji jsou horniny mírně zvětralé a navětralé.

Kvartér, který je zastoupen následujícími sedimenty:

- **Fluviální sedimenty** – jsou reprezentovány hrubozrnnými zeminami charakteru písků štěrků. Převládají středně až hrubě zrnité písky nad jemnozrnnými. Štěrků mají proměnlivý podíl valounů křemene a hornin do velikosti až 10 cm. Zatříděním dle ČSN 73 6133 se v trase nachází písky a štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy (S3 S-F a G3 G-F), jílovité písky (S5 SC). Ulehlost těchto sedimentů je převážně středně ulehlá či popř. ulehlá.
- **Eolické sedimenty** – tvoří jej spraše a sprašové hlíny charakteru prachovitých, vápnitých, jemně slídnatých jílo a jílovitých hlín. Zatříděním dle ČSN 73 6133 se v trase nachází jíly s nízkou plasticitou (F6 CL), střední plasticitou (F6 CI), jíly s vysokou plasticitou (F8-CH) a jíly písčité (F4 CS). Jejich konzistence je uváděna jako tuhá a pevná.
- **Antropogenní sedimenty** – jsou zastoupeny jílovitými, písčitými, kamenitými až balvanitými zeminami a stavebním odpadem. Vzhledem k jejich různorodosti jde o středně ulehlé a ulehlé písky nebo štěrky špatně zrněné nebo písky a štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy (S2 SP, G2 GP, S3 SF, G3 G-F), jíly písčité a jíly štěrkovité s kameny (F4 CS, F2 CG) tuhé až pevné konzistence nebo středně ulehlé písky jílovité (S5 SC).

Z hydrogeologického hlediska je podzemní voda v kvartérních sedimentech vázána na mocné polohy hrubozrnných písčitých nebo štěrkovitých sedimentů náplavů řeky Labe (fluviální sedimenty). Jde o značně propustné zeminy a hladina podzemní vody je souvislá. Dle podkladu [1] byla zastižena v hloubkách cca 1,8 – 7,2 m pod povrchem terénu. Eolické sedimenty vytvářejí nepropustný izolátor a podzemní voda tak může být i místy napjatá. U předkvartérního podkladu je propustnost hornin (jílovců a slínovců) definována jako puklinová a v jeho ve svrchních partiích

jde o zcela ojedinělé, nesouvislé a podružné zvodnělé pukliny. Hladina podzemní vody (druhá zvođen) se v předkvartérním podloží vyskytuje ve větších hloubkách a je vázána na otevřené puklinové zóny s omezenou komunikací a propustností a bývá nespojitá a mírně napjatá.



17 – spraš, sprašová hlína (eolická geneze); 22 – písek, štěrk (fluviální geneze); 24 – písek, štěrk (fluviální geneze)

Obr. 3-3 Výřez z geologické mapy 1: 50 000 (ČGS)

3.3 *Navrhovaná sanace železničního spodku*

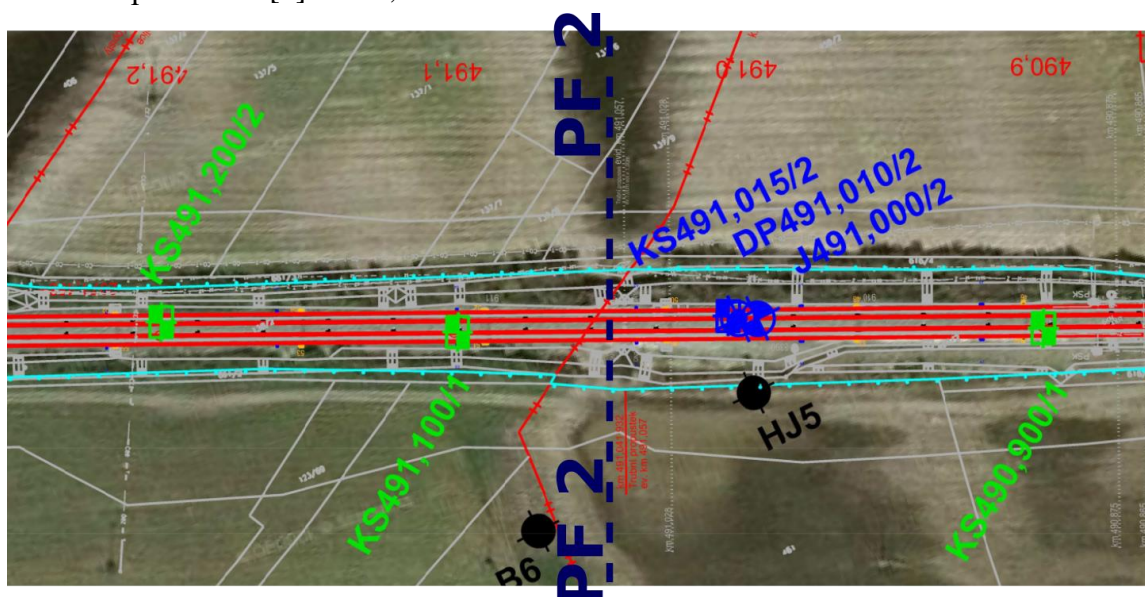
Dle informací zveřejněných Správou železnic je předmětný úsek postižen častými poruchami geometrické polohy koleje s následnou nutností častého podbíjení. Jako důvod je uváděno nevhodné složení násypu a vysoká hladina podzemní vody. V rámci sanace, jejíž realizace je plánována na rok 2023 dojde k částečnému odtižení násypového tělesa s následnou náhradou kvalitnějším materiálem. Oblast mezi zemní plání a plání tělesa železničního spodku bude dále vyztužena dvojicí biaxiálních geomříží. Dle zaslaných podkladů ([2], [3]) je plánováno zlepšení železničního spodku pomocí štěrkových pilířů průměru 600 mm instalovaných v trojúhelníkovém rastru ve vzdálenostech 1,8 m a délkou 5,5 m. Autoři zprávy doporučují konzultovat volbu této technologie s realizační firmou. Stávající násypové těleso je obecně tvořeno soudržnou zeminou tuhé až pevné konzistence. Použití štěrkových pilířů je obecně vhodné a přínosné v soudržných zeminách s měkkou až tuhou konzistencí s hodnotami neodvodněné smykové pevnosti c_u obecně mezi 7 až 50 kPa.

Posouzení bylo provedeno pro dva příčné profily znázorněné na Obr. 3-4 definovaných objednatelem posudku:

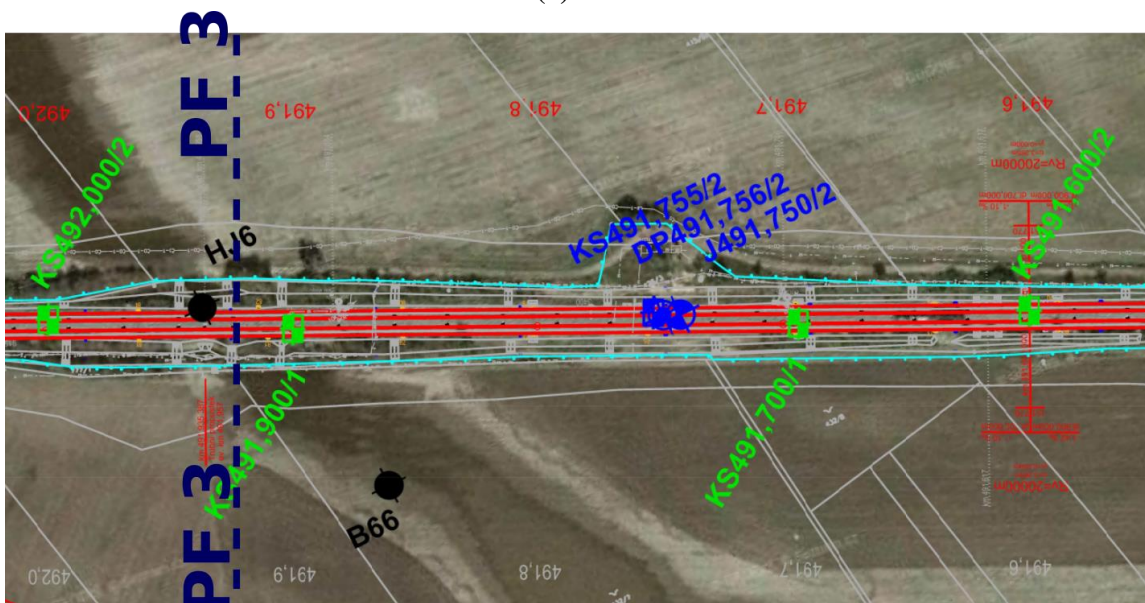
- PF 2 – km 491,050, výška zemního tělesa po rekonstrukci 4,8 m,
- PF 3 – km 491,925, výška zemního tělesa po rekonstrukci 4,0 m.

Pro sestavení geotechnických modelů byly využity následující průzkumná díla:

- PF 2: KS 491,100/1; KS 491,015/2; DP 491,010/2; J 491,000/2 z průzkumu [1] a B6; HJ5 z archivních dat.
- PF 3: KS 491,900/1; KS 492,000/2; KS 491,755/2; DP491,756/2; J491,750/2 z průzkumu [1] a HJ6; B66 z archivních dat.



(a)



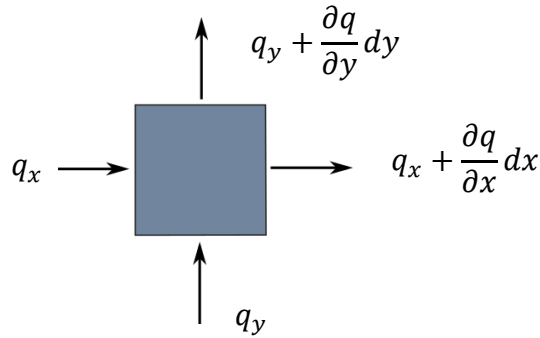
(b)

Obr. 3-4 Pozice analyzovaných řezů; a) PF 2, b) PF 3

4. TEORETICKÉ PRINCIPY

4.1 Model proudění

Řešení vychází ze zákona zachování hmotnosti, který lze zapsat dle vztahu (4-1). Levá strana rovnice představuje změnu specifického průtoku vyjádřenou pomocí Darcyho zákona, pravá pak vyjadřuje změnu hustoty vody ρ_w , pórovitosti n a stupně nasycení S v čase, k_{sat} je koeficient hydraulické vodivosti nasycené zeminy, k_{rel} je podíl koeficientu hydraulické vodivosti nenasyčené zeminy při daném stupni nasycení ku koeficientu hydraulické vodivosti nasycené zeminy.



Obr. 4-1 Průtok jednotkovým elementem

$$\nabla^T \mathbf{q} = -\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n S) \quad (4-1)$$

$$\nabla^T \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w g} \mathbf{k}_{sat} (\nabla p_w + \rho_w \mathbf{g}) \right] = -\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n S)$$

Rovnici lze při zanedbání stlačitelnosti zrn skeletu a změny hustoty vody převést do vztahu (4-2), kde K_w je objemový modul vody.

$$S \mathbf{m}^T \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^T}{\partial t} - n \left(\frac{S}{K_w} - \frac{\partial S}{\partial p_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla^T \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w g} \mathbf{k}_{sat} (\nabla p_w + \rho_w \mathbf{g}) \right] = 0 \quad (4-2)$$

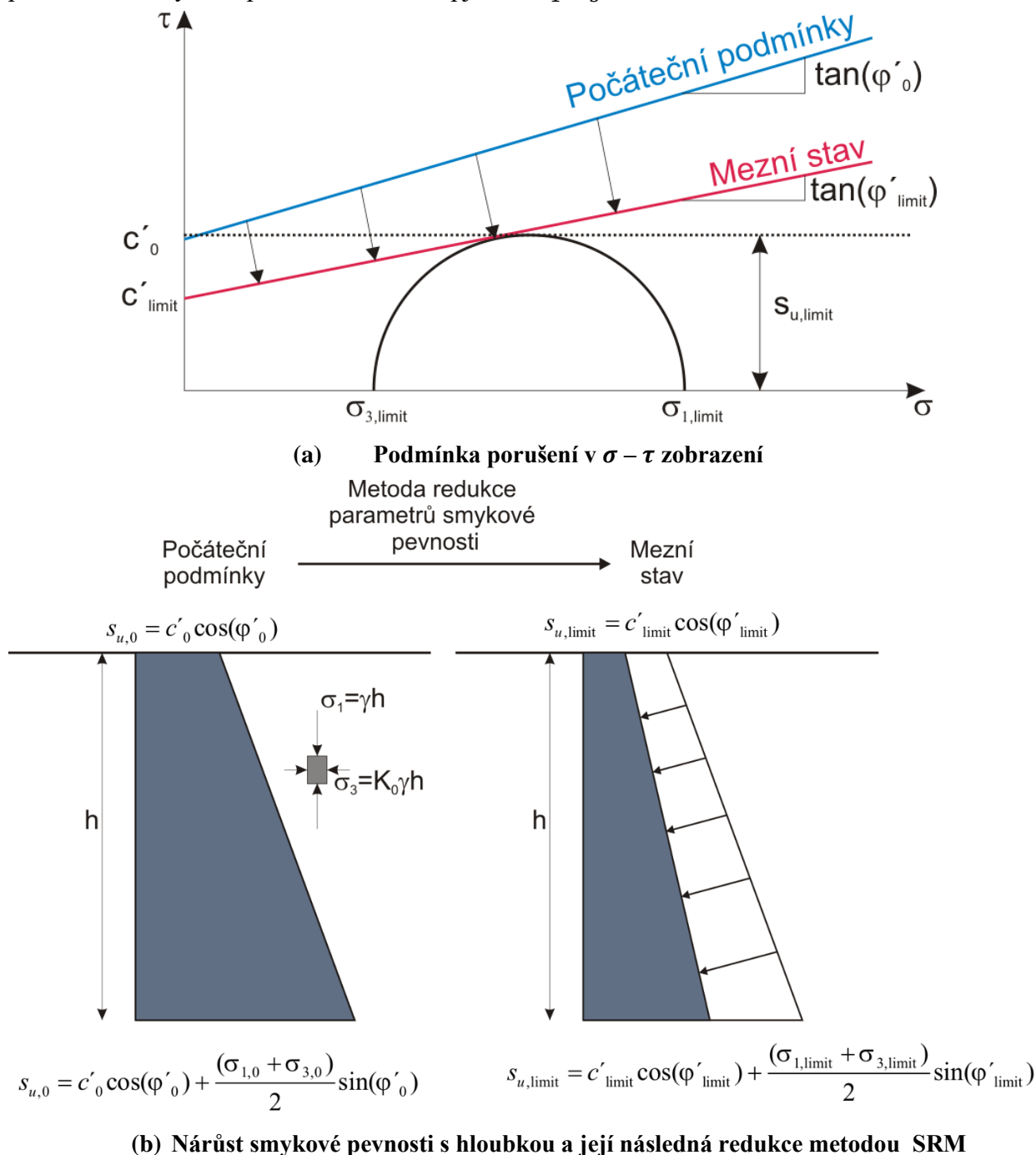
S využitím stejných tvarových (interpolačních) funkcí pro složky posunutí a pórový tlak (\mathbf{N}) a Greenova teorému pak lze rovnici (4-2) zapsat ve formě (4-3), v maticové podobě pak vztahem (4-4), kde \mathbf{v} a \mathbf{p}_n jsou vektory obsahující hledané složky pórového tlaku a posunutí v uzlech konečného prvku.

$$\begin{aligned} \int \mathbf{N}^T S \mathbf{m}^T \underline{B} \frac{d\mathbf{v}}{dt} dV - \int \mathbf{N}^T n \left(\frac{S}{K_w} - \frac{\partial S}{\partial p_w} \right) \frac{d\mathbf{p}_n}{dt} \mathbf{N}^T dV \\ - \int (\nabla \mathbf{N})^T \frac{k_{rel}}{\gamma_w} k_{sat} \nabla \mathbf{N} \mathbf{p}_n dV - \int (\nabla \mathbf{N})^T \frac{k_{rel}}{\gamma_w} \mathbf{k}_{sat} \rho_w \mathbf{g} dV \\ + \int \mathbf{N} \hat{q} dS = 0 \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$-\mathbf{H} \mathbf{p}_n - \mathbf{S} \frac{d\mathbf{p}_n}{dt} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{G} + \mathbf{q}_p \quad (4-4)$$

4.2 Stabilitní analýza

Pro vyčíslení stupně bezpečnosti FoS byla použita výpočetní procedura využívající redukci parametrů smykové pevnosti (SRM). Schematicky je princip metody SRM pro neodvodněný materiál (materiál s malou propustností) definovaný efektivními parametry smykové pevnosti znázorněn na Obr. 4-2, s_u je neodvodněná smyková pevnost odpovídající daným efektivním parametrům smykové pevnosti a stavu napjatosti σ_1, σ_3 .



Obr. 4-2 Princip metody redukce parametrů smykové pevnosti

Podstatou metody SRM je řízené redukování parametrů smykové pevnosti v matematickém modelu od počátečních (vstupních) hodnot ($c'_0, \tan \varphi'_0$) až do stavu, kdy není možné splnit

podmínky rovnováhy (c'_{limit} , $\tan \varphi'_{limit}$). Stupeň stability („Factor of Safety“ - FoS) je pak definován poměrem původních (vstupních) a limitních hodnot parametru smykové pevnosti dle vztahu (4-5). V případě asociované plasticity ($\varphi' = \psi$) je současně s efektivním úhlem vnitřního tření redukován také úhel dilatance ψ . V případě neasociované plasticity ($\varphi' > \psi$) zůstává úhel dilatance konstantní až do stavu, kdy se redukováný efektivní úhel vnitřního tření vyrovná úhlu dilatance a pak opět dochází k současné redukci obou parametrů.

$$FoS = \frac{c'}{c'_{limit}} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_{limit}} \quad (4-5)$$

4.3 Metodika posouzení

Posouzení bylo provedeno alternativně pomocí stupně bezpečnosti a dle metody dílčích součinitelů (mezních stavů)

Posouzení dle stupňů bezpečnosti

Podmínka spolehlivosti má tvar (4-6), kde FoS_{min} je minimální požadovaný stupeň bezpečnosti. Stupeň stability FoS udává poměr mezi charakteristickými hodnotami odporu a účinku zatížení. Pro stanovení minimální požadované hodnoty FoS_{min} určuje předpis SŽDC S4 [5] jako směrodatnou normu ČSN 73 6301 [6]. Zde je minimální požadovaný stupeň bezpečnosti pro svahy násypů definován v závislosti na charakteru podloží (únosné/neúnosné) a typu použitých parametrů smykové pevnosti (vrcholové/koncové, efektivní/totální) v rozmezí 1,15 – 1,5, horní limit $FoS = 1,5$ je požadován pouze pro násypová tělesa na málo únosném podloží. „Koncové“ parametry smykové pevnosti závisí na konečném přetvoření a tudíž nelze hovořit o materiálových parametrech. Ve výpočtech bylo uvažováno s $FoS_{min} = 1,3$ a to z následujících důvodů:

- Únosné podloží – v rámci rekonstrukce železniční tratě v úseku Lovosice – Bohušovice je součástí i sanace železničního spodku pomocí šterkových pilířů. Navržení těchto prvků se provádí za účelem zvýšení únosností a snížení stlačitelnosti podloží. Tím dojde ke zvýšení smykové pevnosti a tuhosti podloží.
- Nebyly provedeny zkoušky smykové pevnosti – uvažovaná hodnota představuje horní mez stupňů stability na únosném podloží.

$$FoS = \frac{R_k}{E_k} \geq Fos_{min} \quad (4-6)$$

Posouzení dle metody dílčích součinitelů (mezních stavů) v souladu s ČSN EN 1997-1 – NP 3

Návrhové hodnoty jednotlivých účinků zatížení (E_d), materiálových vlastností (X_d) a odporu (R_d) se stanoví podle vztahů (4-7) až (4-9). E_k , X_k , R_k jsou příslušné charakteristické hodnoty, γ_F je souhrnné označení pro dílčí součinitele zatížení ($\gamma_G, \gamma_{G, fav}, \gamma_Q, \gamma_{Q, fav}$), γ_M je souhrnné označení pro dílčí součinitele materiálových charakteristik ($\gamma_{\varphi'}, \gamma_{c'}, \gamma_{\gamma}$) a γ_R je souhrnné označení pro dílčí součinitele odporu (γ_{Rv}, γ_{Rh}).

$$E_d = E_k \gamma_F \quad (4-7)$$

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4-8)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (4-9)$$

Byl využit návrhový přístup 3 (NP 3), který je v našich podmínkách pro posuzování vnější stability geotechnických konstrukcí preferován. Hodnoty dílčích součinitelů pro NP 3 dle [7] jsou uvedeny v Tab. 4-1

Tab. 4-1 Hodnoty dílčích součinitelů pro NP 3

Dílčí součinitel		Zatížení, účinky zatížení	Materiálové vlastnosti	Odpor
		A2	M2	R3
Součinitel pro stále nepříznivé zatížení	γ_G	1,0		
Součinitel pro stále příznivé zatížení	$\gamma_{G,fav}$	1,0		
Součinitel pro nahodilé nepříznivé zatížení	γ_Q	1,3		
Součinitel pro nahodilé příznivé zatížení	$\gamma_{Q,fav}$	0,0		
Součinitel pro úhel vnitřního tření	$\gamma_{\varphi'}$		1,25	
Součinitel pro soudržnost	$\gamma_{c'}$		1,25	
Součinitel pro vlastní tíhu	γ_γ		1,0	
Součinitel pro odpor ve svislém směru	γ_{Rv}			1,0
Součinitel pro odpor ve vodorovném směru	γ_{Rh}			1,0

V NP 3 tedy do stabilitního výpočtu (metody redukce parametrů smykové pevnosti) vstupují, místo charakteristických hodnot c' , $\tan \varphi'$, již návrhové hodnoty parametrů smykové pevnosti (c'_d , $\tan \varphi'_d$) stanovené dle vztahů (4-10) a (4-11), kde $\gamma_{c'}$ je parciální součinitel spolehlivosti pro soudržnost a $\gamma_{\varphi'}$ pro úhel vnitřního tření. V souladu se zvoleným návrhovým přístupem č. 3 mají tyto součinitele hodnotu 1,25.

$$c'_d = \frac{c'}{\gamma_{c'}} \quad (4-10)$$

$$\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'}{\gamma_{\varphi'}} \quad (4-11)$$

Podmínka spolehlivosti má tvar (4-12), kde OF („stupeň předimenzování“) je principiálně poměr mezi návrhovou hodnotou odporu (R_d) a účinku zatížení (E_d). Obrácenou hodnotu faktoru OF lze tedy interpretovat jako stupeň využití Λ (4-13).

$$OF = \frac{R_d}{E_d} \geq 1,0 \quad (4-12)$$

$$\Lambda = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0 \quad (4-13)$$

5. VÝPOČETNÍ MODEL

5.1 *Popis vytvořeného matematického model*

Stabilitní posouzení bylo provedeno ve dvou řezech (PF 2, PF 3 dle značení uvedeném objednatel) s využitím programu Plaxis 2D za předpokladu platnosti rovinné deformace. Geometrie modelu byla převzata z předaných podkladů [3] a [2] .

Vytvořená síť konečných prvků (celkový pohled a detail v oblasti železniční trati) je znázorněna v Příloze č. 1. Byly použity 15-uzlové trojúhelníkové prvky s dodatečným zahuštěním sítě v okolí železniční tratě. Detailní informace o sestavených matematických modelech jsou uvedeny v Tab. 5-1.

Tab. 5-1 Detailní informace o sestaveném matematickém modelu

ID modelu			PF 2	PF 3
Maximální výška modelu	h	[m]	22,4	17,6
Maximální šířka modelu	b	[m]	130	80,0
Typ použitého prvku	-		15-uzlové trojúhelníkové	15-uzlové trojúhelníkové
Celkový počet prvků	n_p	[-]	6451	7393
Minimální délka prvku	$l_{p,min}$	[m]	8,16e-3	7,37e-3
Maximální délka prvku	$l_{p,max}$	[m]	3,392	3,69
Průměrná délka prvku	$l_{p,av}$	[m]	0,673	0,49
Celkový počet uzlů	n_n	[-]	52211	59807

5.2 *Výpočetní fáze*

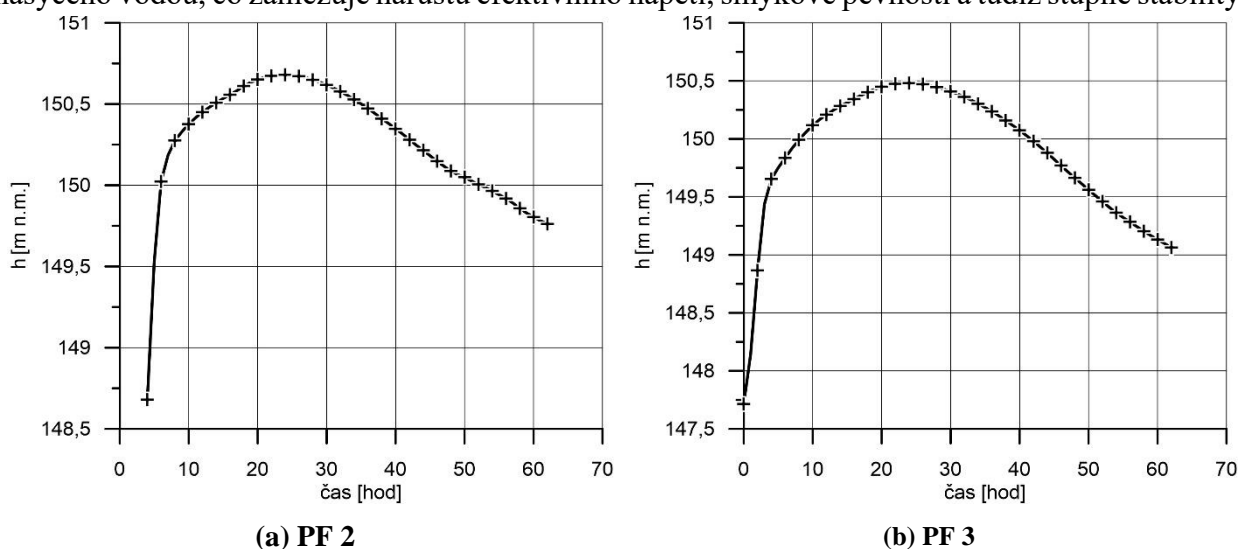
Byly analyzovány následující zatěžovací stavy:

- ZS 0 Počáteční podmínky – odpovídá stavu před navrhovanou rekonstrukcí
 - výchozí stav HPV
 - hydrostatické podmínky
- ZS 1 Sanace železničního spodku – simulace provedení navrhovaných stavebních prací
 - výchozí stav HPV
 - hydrostatické podmínky
- ZS 2 Zatížení kolejovou dopravou
 - výchozí stav HPV
 - hydrostatické podmínky
 - traťová třída zatížení D4
- ZS 3 Hladina na úrovni Q100
 - vychází ze ZS 2
 - časově stacionární režim filtračního proudění
- ZS 4 Simulace povodně Q100
 - vychází ze ZS 2
 - časově nestacionární režim proudění

Pro ZS 3 se stacionárním režimem proudění je dle [4] pro Q100 uvažováno s následujícími výškami hladin:

- PF 2: 150,68 m n. m. pro severní svah a 150,83 m n. m. pro jižní svah
- PF 3: 150,48 m n. m. pro severní svah a 150,79 m n. m. pro jižní svah

V ZS 4 s nestacionárním režimem proudění jsou použité časové závislosti výšky hladin zobrazeny v grafech na Obr. 5-1. V tomto případě je na obou svazích násypového tělesa uvažováno s jednotným časovým průběhem [4]. Výšky hladin v posledním bodě obou závislostí poskytnutých objednatelem nekorrespondují s úrovní terénu v jednotlivých řezech (cca 148,67 m n. m. – PF 2; 147,30 m n. m. – PF 3). Závislosti byly proto extrapolovány dle koncové rychlosti poklesu hladiny až na úroveň terénu. Z hlediska stability zemního tělesa je tento stav nejméně příznivý. Pokud je pokles hladiny rychlý (vzhledem k hydraulické vodivosti zeminy), zůstává násypové těleso z části nasyceno vodou, co zamezuje nárůstu efektivního napětí, smykové pevnosti a tudíž stupně stability

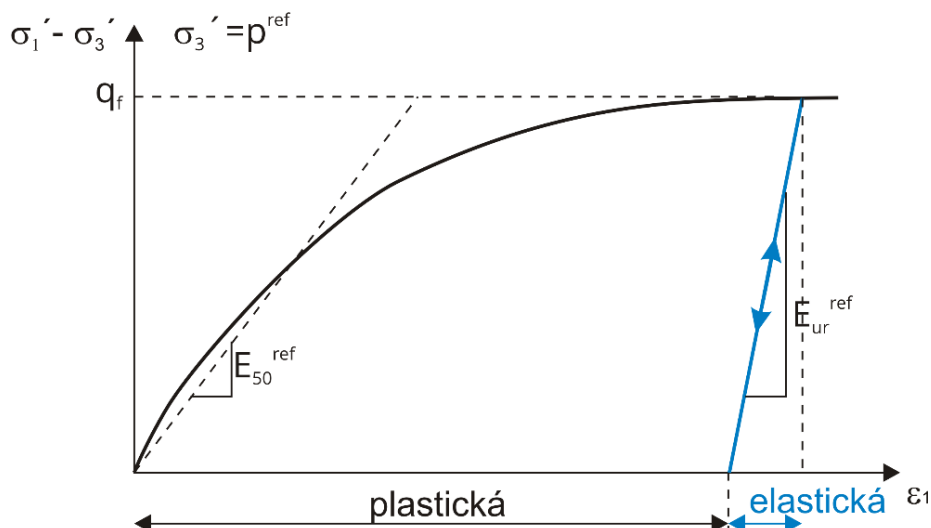


Obr. 5-1 Časové průběhy hladin v nestacionárním zatěžovacím stavu č. 4

5.3 Použité materiálové modely a vstupní parametry

Pro jednotlivé geotechnické typy a konstrukční vrstvy železniční tratě byl použit materiálový model Hardening soil model [8]. Jde o elastoplastický materiálový model s objemovým a smykovým zpevněním. V materiálovém modelu je dále zahrnuta závislost tuhosti na režimu zatěžování (prvotní zatížení versus odtížení - opětovné přetížení) a na efektivním napětí. Uvedené faktory jsou relevantní pro deformační analýzu. Z hlediska stabilitních výpočtů je v materiálovém modelu implementována standardní Mohr-Coulombova podmínka porušení. Základní charakteristiky tohoto modelu jsou pro triaxiální podmínky a edometrické podmínky znázorněny na Obr. 5-2 a Obr. 5-3.

Hodnoty vstupních parametrů jsou uvedeny v Tab. 5-2 (objemové tíhy, parametry smykové pevnosti a hydraulické parametry) a Tab. 5-3 (parametry stlačitelnosti). Na řešenou kombinaci stabilitní výpočet – průsaková analýza mají největší vliv parametry smykové pevnosti a hydraulické parametry. Pro všechny materiály bylo uvažováno s efektivními parametry smykové pevnosti (c' , φ').



Obr. 5-2 HS model – triaxiální podmínky

Materiálový model je definován následujícími parametry:

φ' – efektivní úhel vnitřního tření,

c' – efektivní soudržnost,

ψ – úhel dilatance,

E_{oed}^{ref} – tečnový edometrický modul platný pro referenční napětí $\sigma'_1 = p_{ref}$

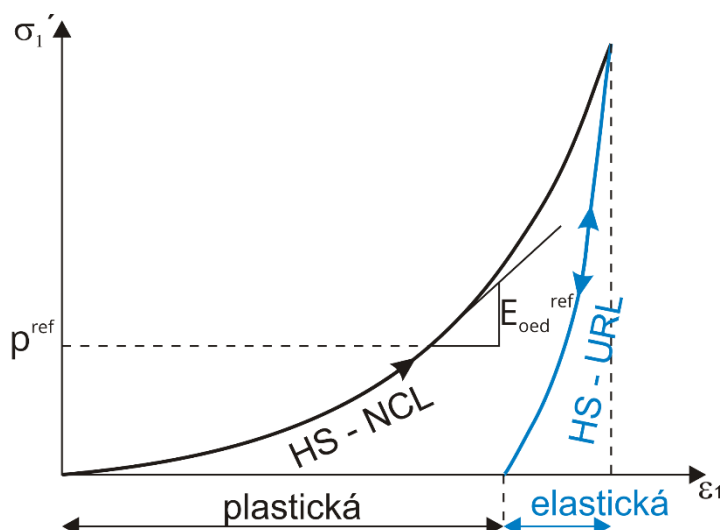
E_{50}^{ref} – sečnový modul z triaxiální zkoušky platný pro referenční napětí $\sigma'_3 = p_{ref}$

E_{ur}^{ref} – modul pružnosti při odtížení – opětovném přitížení pro referenční napětí $\sigma'_3 = p_{ref}$,

ν_{ur} – Poissonovo číslo při odtížení – opětovném přitížení,

p_{ref} – referenční napětí,

m – parametr definující závislost deformačních parametrů na napětí.



Obr. 5-3 HS model – edometrické podmínky

Tab. 5-2 Hodnoty vstupních parametrů: fyzikálně indexové, pevnost, propustnost

Identifikace			Objemová tíha		Soudržnost, úhel vnitřního tření, úhel dilatance			koef. hydraulické vodivosti
			γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	ϕ'	ψ	$k_{x,y \text{ sat}}$
Označení	Klasifikace, stav / použití		[kN/m ³]		[kPa]	[°]	[°]	[m/s]
Podloží	P1	F3 MS, F4 CS, F6 CI, F8 CH tuhá až pevná konzistence	18	20	10	25	0	1e-7
	P2	S5 SC středně ulehlý	17	20	5	27,5	0	1e-6
	P3	S3 S-F – S2 SP středně ulehlý	17	20	0	35	5	1e-4
Konstrukční vrstvy, zlepšení podloží	ŠP	Štěrkový pilíř	19	21	0	40	10	1e-4
	K1	Rekonstrukce – železniční svršek (kolejové lože)	19	21	0	40	10	1e-4
	K3	Rekonstrukce – železniční spodek	19	21	0	37,5	7,5	1e-4
	K3	Pražcové podloží původní tratě	19	21	0	35	5	1e-4
	K4	Násypové těleso	17	20	5	30	0	1e-6

Tab. 5-3 Charakteristické hodnoty vstupních parametrů: stlačitelnost

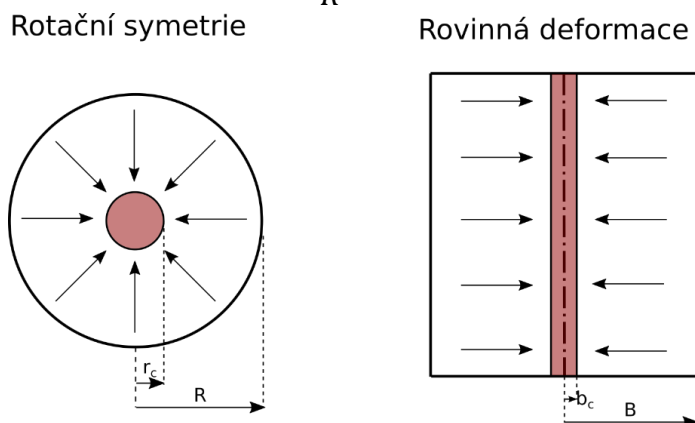
Identifikace			Sečnový modul (triax. podmínky), tečnový modul (1D komprese), modul pružnosti při odtížení, závislost na napětí			
			E_{50}^{ref}	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	m^*
Označení	Klasifikace, stav / použití		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
Podloží	P1	F3 MS, F4 CS, F6 CI, F8 CH tuhá až pevná konzistence	7,5	7,5	22,5	1
	P2	S5 SC středně ulehlý	15	15	45	0,75
	P3	S3 S-F – S2 SP středně ulehlý	30	30	90	0,5
Konstrukční vrstvy, zlepšení podloží	ŠP	Štěrkový pilíř	45	45	135	0,5
	K1	Rekonstrukce – železniční svršek (kolejové lože)	50	50	150	0
	K3	Rekonstrukce – železniční spodek	45	45	135	0
	K3	Pražcové podloží původní tratě	45	45	135	0
	K4	Násypové těleso	15	15	45	0,75

* $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$

Aktuální stav zeminy (stupeň konzistence a ulehlosti) byl interpretován z provedených vrtů a dynamických penetrací [1]. Zde je však nutné podotknout, že byly shledány rozdíly ve výsledcích dynamických penetrací a vrtů. Příkladem je vrt J491,750/2 a penetrace DP491,756/2. Pro soudržné sprašové zeminy v podloží násypu (hloubka 2,1 – 3,2 m) je na základě geologického popisu zemin a hornin uváděna konzistence tuhá až pevná, nicméně dynamická penetrace zde vykazuje minimální hodnoty (medián $N_{10} = 1$). Dále vzhledem k faktu, že v rámci navrhované rekonstrukce nebyly provedeny zkoušky smykové pevnosti, musely být hodnoty těchto parametrů odhadnuty s využitím zkušenosti a dostupné literatury (např. [9]). Koeficienty hydraulické vodivosti byly odvozeny z archivních hydrogeologických vrtů. S ohledem na tuto skutečnost byly i stanovovány vstupní parametry do materiálového modelu jednotlivých zemin.

Pro převod štěrkových pilířů do rovinně deformační úlohy bylo uvažováno doporučení [10]. Hodnoty mechanických a hydraulických parametrů zůstávají při převodu zachovány, mění se tloušťka štěrkového pilíře. Pro převod platí vztah (5-1), který vychází ze zachování stupně vyztužení v rovinně deformační a axisymetrické úloze. Význam veličin je zřejmý z Obr. 5-4. Pro poloměr ekvivalentní buňky R pilířů v trojúhelníkovém rastru platí vztah $R = 1,13s$, kde s je osová vzdálenost pilířů. Pro řešenou úlohu ($r_c = 0,3 \text{ m}$; $s = 1,8 \text{ m}$; trojúhelníkový rastr) je ve výpočetním modelu uvažováno s $b_c = 0,10 \text{ m}$.

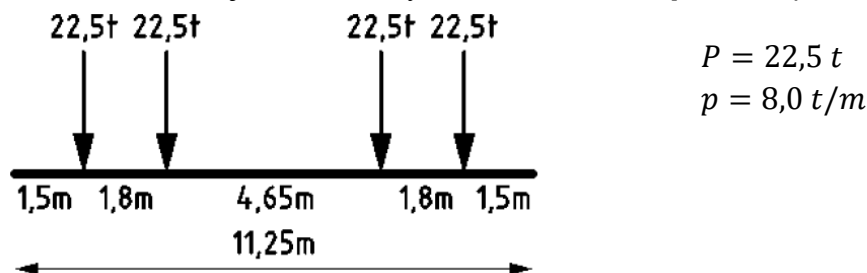
$$b_c = B \frac{r_c^2}{R^2} \quad (5-1)$$



Obr. 5-4 Převod štěrkového pilíře do rovinné deformační úlohy

5.4 Zatížení od kolejové dopravy

Bylo uvažováno s traťovou třídou zatížení D4 se zatížením na nápravu referenčního vozidla $P = 22,5 \text{ t}$ a hmotností na jednotku délky referenčního vozu $p = 8,0 \text{ t/m}$.



Obr. 5-5 Referenční vůz D4

Liniová hmotnost p byla pro matematický model přepočtena na dvojici samostatných působících plošných zatížení $q = 261,6 \frac{kN}{m}$ pro každou kolejnici UIC 60 působících na šířku paty kolejnice $b_k = 150 \text{ mm}$. Příčné pražce byly v matematickém modelu zahrnuty pomocí desko-stěnového prvku. Osová tuhost $E_A = 3,9e6 \text{ kN/bm}$ a ohybová tuhost $E_I = 1,6e4 \text{ kNm}^2/\text{bm}$ byly stanoveny z geometrických rozměrů pražce B 91 S/1 ($b_p = 0,3 \text{ m}$, $h_p = 0,22 \text{ m}$), jejich osová vzdálenosti $a_p = 0,6 \text{ m}$ a předpokládaného modulu pružnosti betonu $E_{cm} = 36 \text{ GPa}$.

6. VÝSLEDKY VÝPOČTŮ A ZHODNOCENÍ

Výsledky posouzení vnější stability jsou uvedeny v Tab. 6-1 (PF 2) a Tab. 6-2 (PF 3). Tvary kritických smykových ploch jsou znázorněny Příloze č. 2. U obou profilů jsou zobrazeny tvary kritických smykových ploch pro ZS2 a Z4. Jelikož u profilu PF 2 bylo dosaženo nejnižší hodnoty stupně stability resp. nejvyšší hodnoty stupeň využití v ZS 3, tak je navíc vykreslen i tvar kritické smykové plochy pro tento zatěžovací stav. Tvary kritických smykových ploch jsou zobrazeny v podobě přírůstku smykové plastické deformace v posledním výpočetním kroku daného zatěžovacího stavu. Hladina podzemní vody (hranice zóny 100% saturace) a izolinie piezometrické výšky při kulminaci povodně a na konci poklesu hladiny v průběhu ZS 4 jsou znázorněny v Příloze č. 3.

Tab. 6-1 Výsledky stabilitních analýz – PF 2

Zatěžovací stav		FoS [–]	FoS_{min} [–]	Λ [–]	Λ_{max} [–]
ZS 1	Sanace železničního spodku – simulace provedení stavebních úprav	1,70	1,3	0,74	1,0
ZS 2	Zatížení kolejovou dopravou	1,57	1,3	0,84	1,0
ZS 3	Hladina na úrovni Q100	1,44	1,3	0,91	1,0
ZS 4	Simulace povodně Q100	1,47	1,3	0,89	1,0

Tab. 6-2 Výsledky stabilitních analýz – PF 3

Zatěžovací stav		FoS [–]	FoS_{min} [–]	Λ [–]	Λ_{max} [–]
ZS 1	Sanace železničního spodku – simulace provedení stavebních úprav	1,98	1,3	0,57	1,0
ZS 2	Zatížení kolejovou dopravou	1,75	1,3	0,76	1,0
ZS 3	Hladina na úrovni Q100	1,64	1,3	0,80	1,0
ZS 4	Simulace povodně Q100	1,52	1,3	0,85	1,0

Výsledky vykazují postupný pokles stupně stability. Zatížení kolejovou dopravou je v ZS 2 simulováno za neodvodněných podmínek. Dochází tedy k nárůstu zvýšených pórových tlaků, je zmezeno nárůstu efektivního napětí a tudíž smykové pevnosti, co při současném nárůstu zatížení vede k poklesu stupně stability. V ZS 3 dochází navíc k nasycení zemního tělesa a následně

poklesu efektivního napětí vlivem vztlaku. V průběhu ZS 4 je pokles hladiny podzemní vody (hranice 100% saturace) v zemním tělese opožděn ve srovnání s poklesem hladiny. Zemní těleso tak i po poklesu hladiny zůstává částečně nasyceno, co má v případě PF 3 opět nepříznivý vliv na vnější stabilitu. U PF 2 dochází v ZS 4 k mírnému nárůstu FoS , co je způsobeno rychlejším odvodněním tělesa násypu v průběhu poklesu hladiny ve srovnání s PF 3.

7. ZÁVĚR

V souladu se zadáním bylo provedeno posouzení vnější stability zemního tělesa železničního násypu tratě Lovosice – Bohušovice na Ohří za povodně. Posouzení bylo provedeno pro dva příčné profily zadané objednatelem. Ve výpočtech bylo uvažováno jak se stacionárním, tak nestacionárním režimem proudění.

Lze konstatovat, že v řešených příčných řezech konstrukce vyhovuje na posouzení vnější stability dle metody stupňů bezpečnosti (ČSN 73 6301 [6]) a dle metody dílčích součinitelů – mezních stavů (ČSN EN 1997-1 [7]). Z hlediska stavebně technického konstatujeme, že na základě zvolených vstupních parametrů a provedených výpočtů navrhovaná konstrukční opatření svým rozsahem vyhovují a z hlediska stability konstrukce není nutná realizace dalších doplňujících opatření pro zajištění stability drážního tělesa při vybraných (posuzovaných) povodňových stavech na Labi a Ohří.“

Autoři upozorňují, že hodnoty všech mechanických vlastností zeminy musely být odhadnuty vzhledem k absenci relevantních laboratorních zkoušek. Pokud je součástí projektové přípravy provedení stabilitního posouzení navíc v kombinaci s průsakovou analýzou, je nutné tomu faktu přizpůsobit inženýrsko – geologický průzkum. Autoři posudku si proto vyhrazují právo úpravy výpočtu v případě nových skutečností/doplnění inženýrsko-geologického průzkumu.

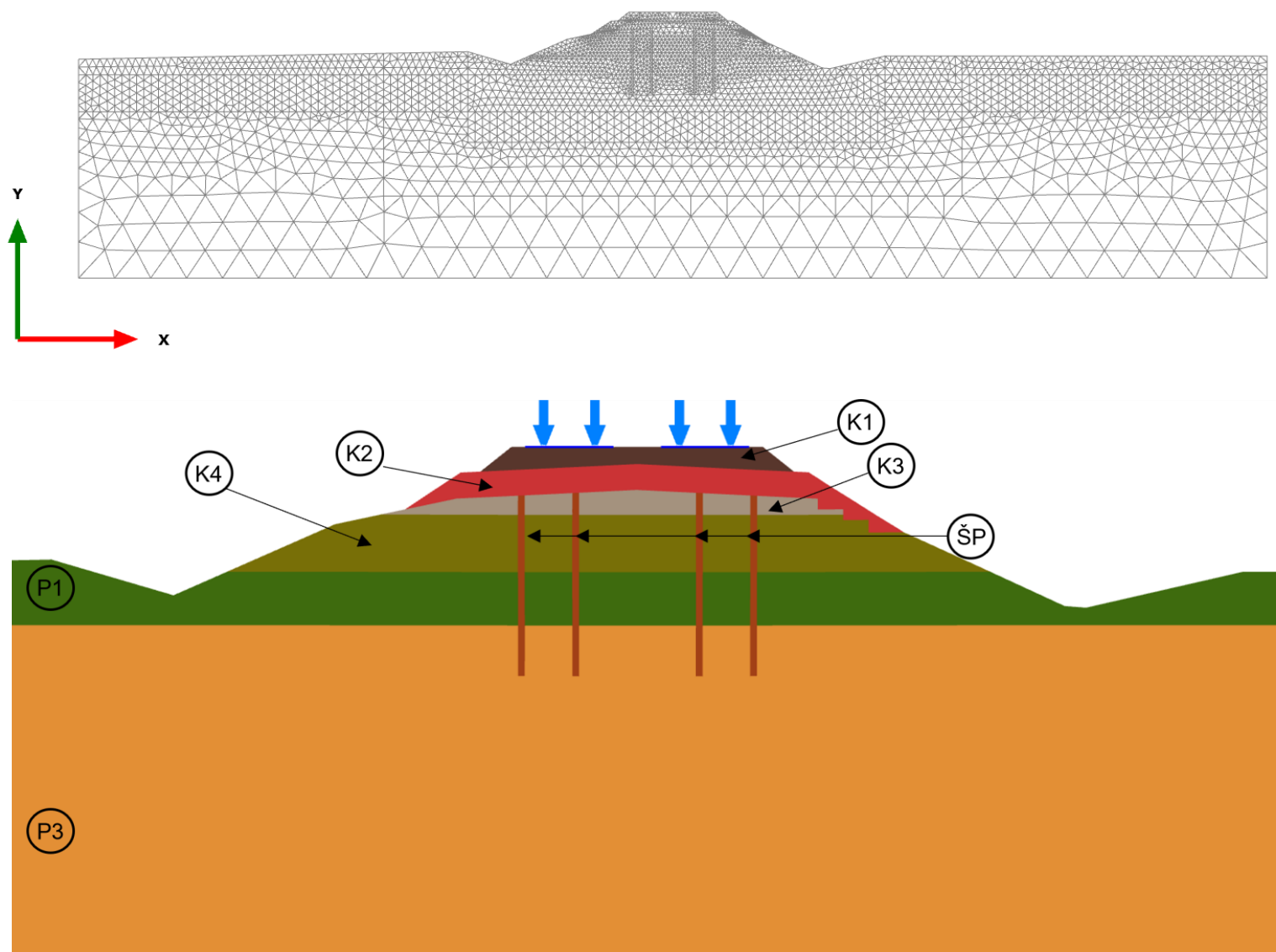
SEZNAM PŘÍLOH

1. A) Vytvořený matematický model – PF 2
B) Vytvořený matematický model – PF 3
2. A) Tvary kritických smykových ploch – PF 2
B) Tvary kritických smykových ploch – PF 3
3. A) Izolinie piezometrických výšek, ZS 4 – PF 2
B) Izolinie piezometrických výšek, ZS 4 – PF 3

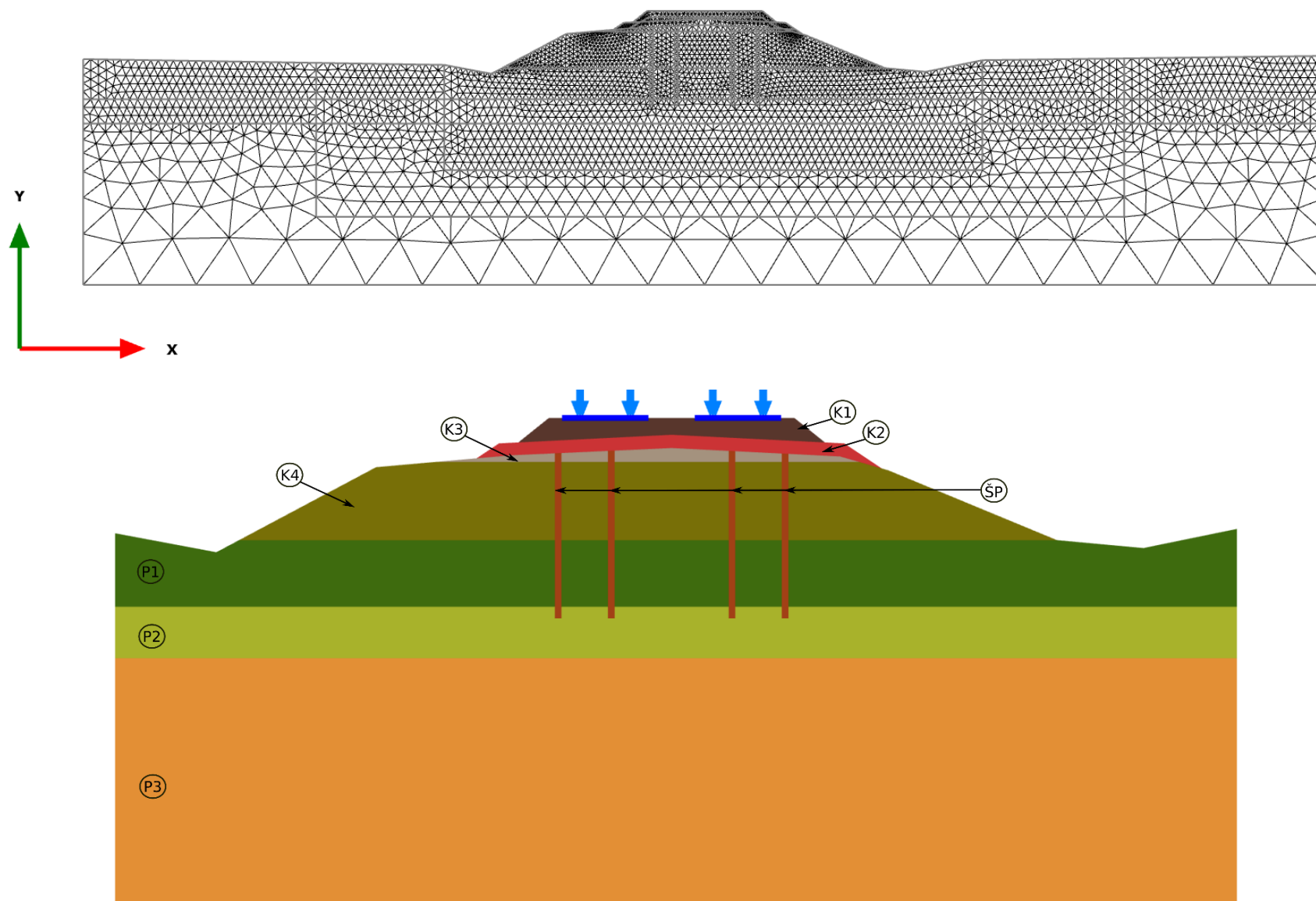
V Brně, říjen 2021

Vypracoval:
Kontroloval:

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D

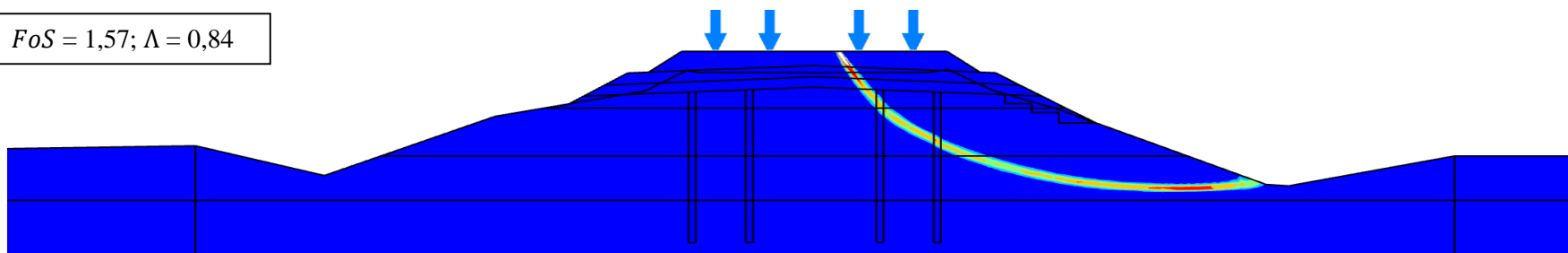


Příloha 1-A
Sestavený matematický model – PF 2



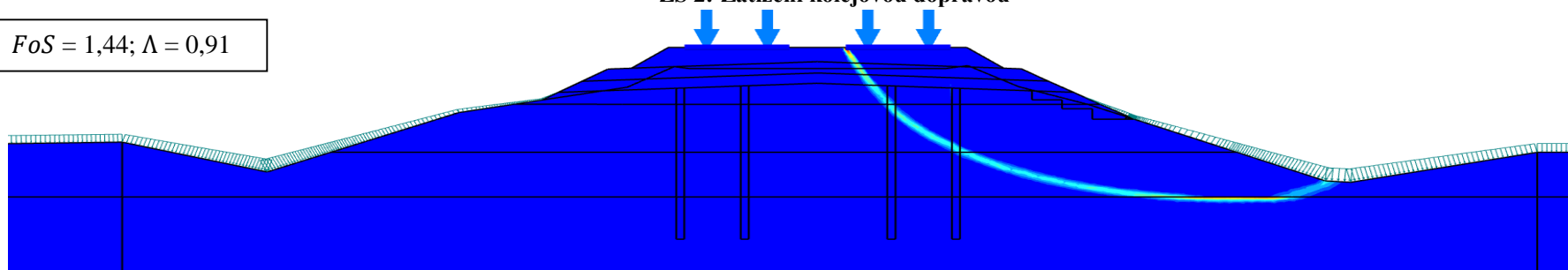
Příloha 1-B
Sestavený matematický model – PF 3

$FoS = 1,57; \Lambda = 0,84$



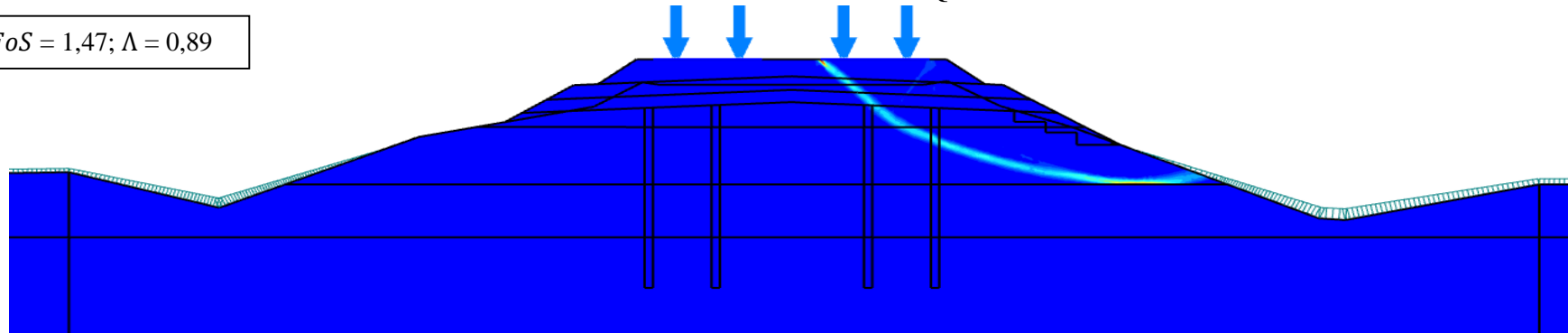
$FoS = 1,44; \Lambda = 0,91$

ZS 2: Zatížení kolejovou dopravou



ZS 3: Hladina na úrovni Q100

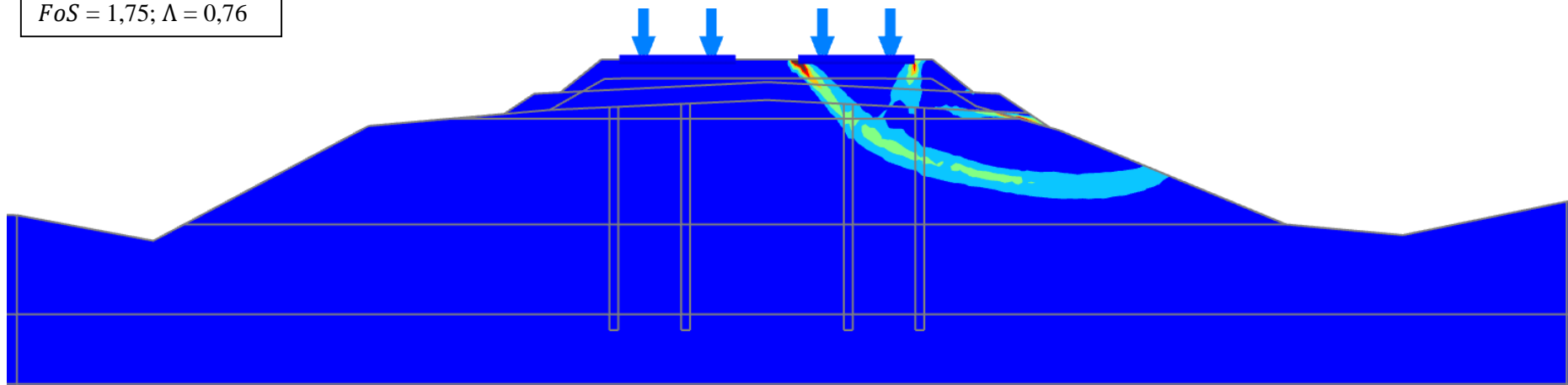
$FoS = 1,47; \Lambda = 0,89$



ZS 4: Simulace povodně Q100

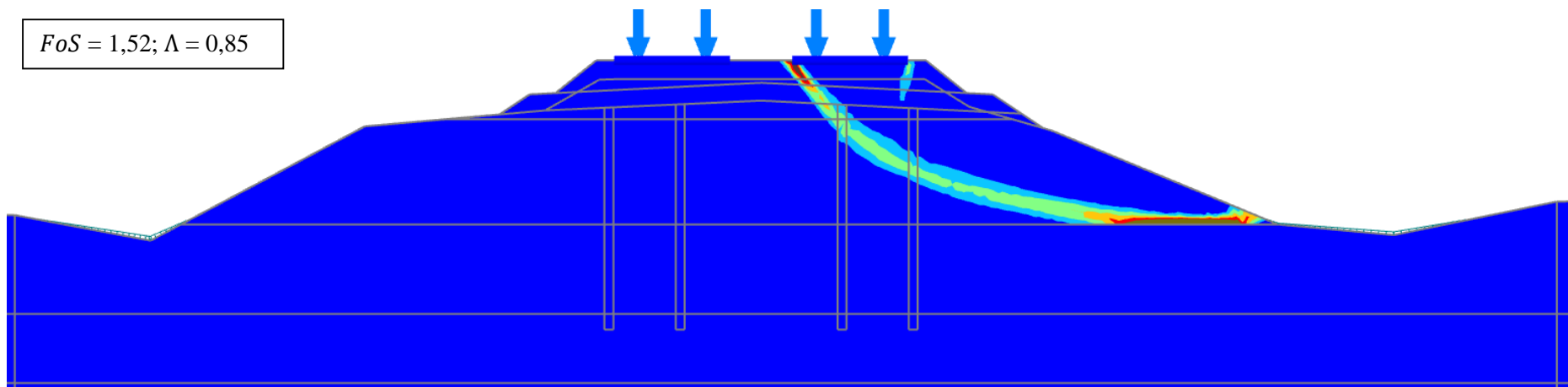
Příloha 2-A
Tvary kritických smykových ploch – PF 2

$FoS = 1,75; \Lambda = 0,76$



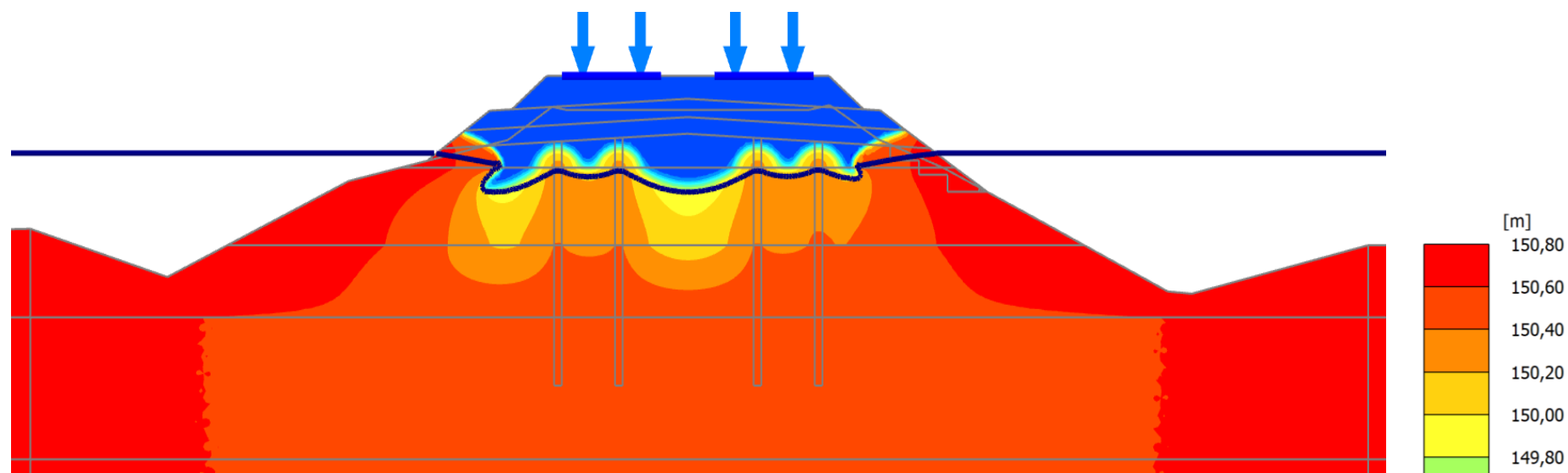
ZS 2: Zatížení kolejovou dopravou

$FoS = 1,52; \Lambda = 0,85$

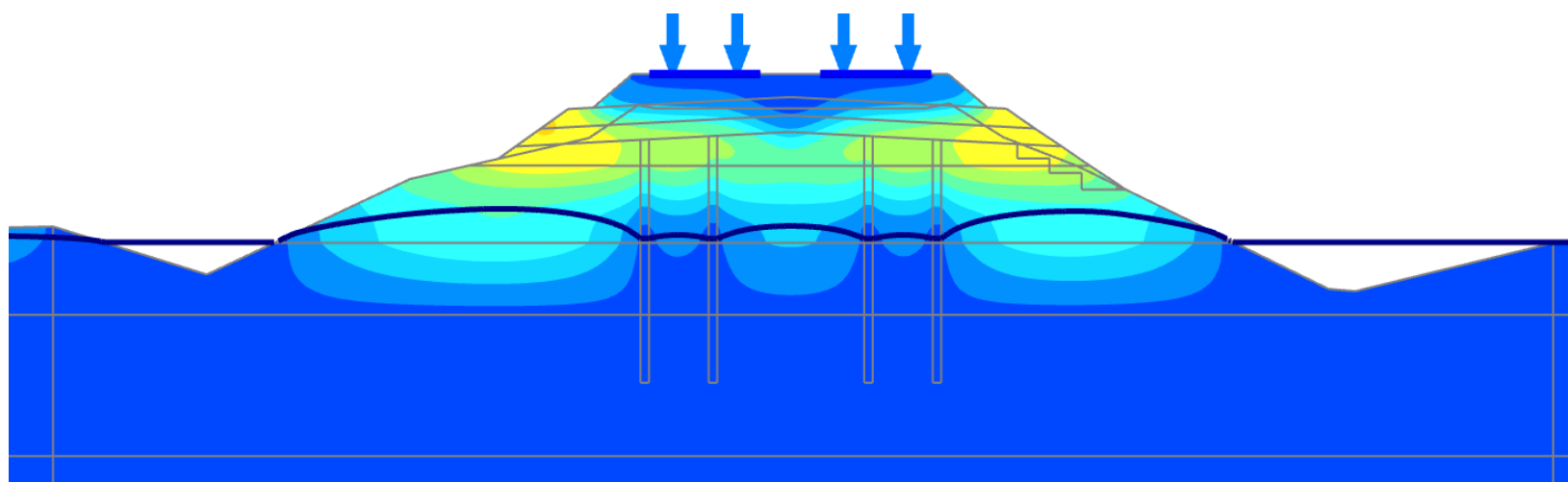


ZS 4: Simulace povodně Q100

Příloha 2-B
Tvary kritických smykových ploch – PF 3

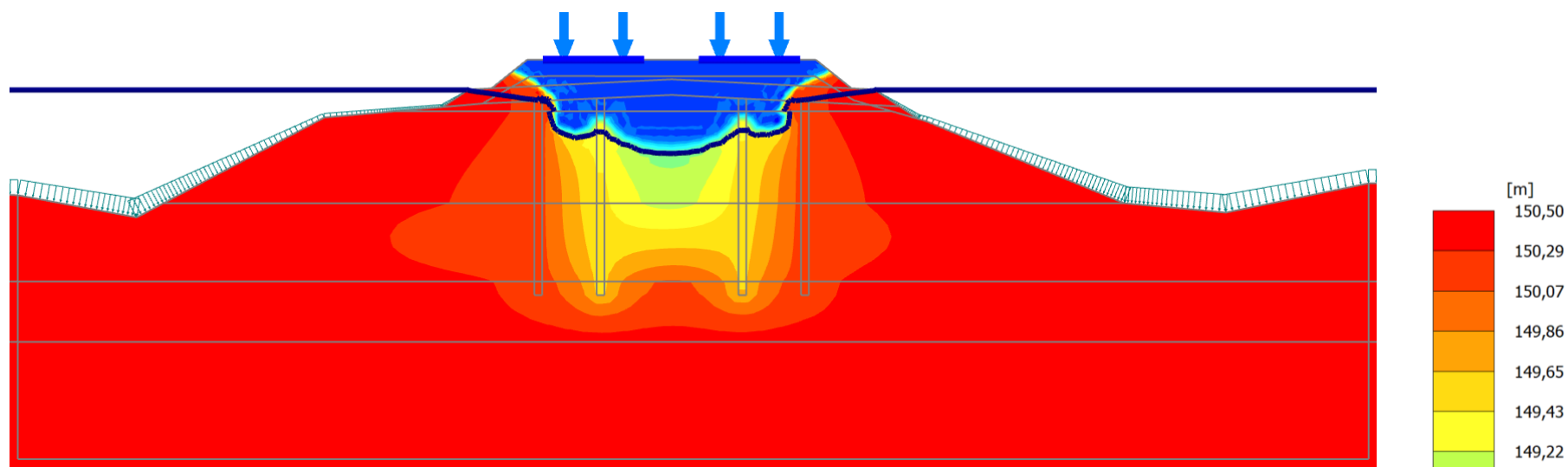


ZS 4: Simulace povodně Q100 - kulminace

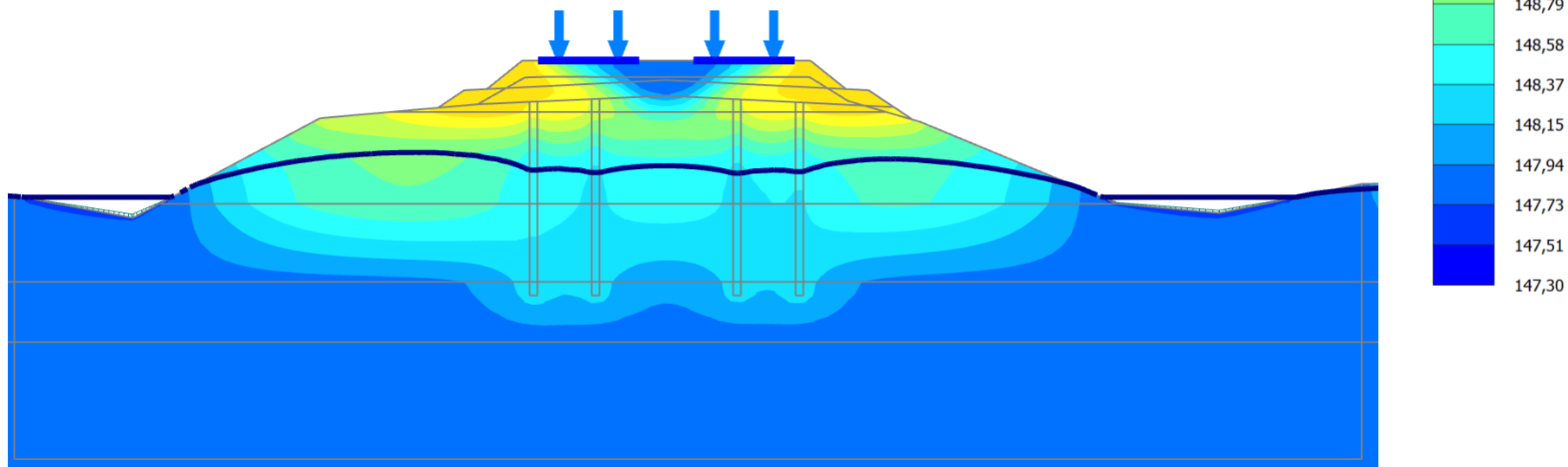


ZS 4: Simulace povodně Q100 – pokles na dno

Příloha 3-A
 Izolinie piezometrických výšek, ZS4 – PF 2



ZS 4: Simulace povodně Q100 - kulminace



ZS 4: Simulace povodně Q100 – pokles na dno (extrapolovaný)

Příloha 3-B
Izolinie piezometrických výšek, ZS4 – PF 3