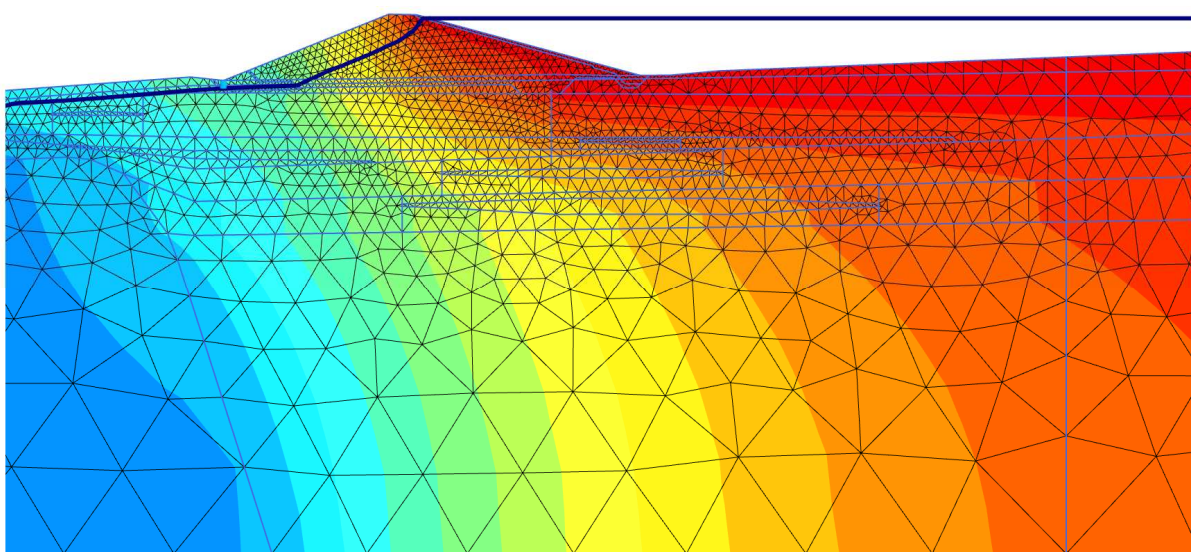


Višňová, Víška – výstavba suché nádrže na Krčeleckém potoce

Deformační, stabilitní a průsaková analýza



OBSAH

1.	IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE	3
2.	ÚVODNÍ ČÁST	3
3.	POUŽITÉ PODKLADY	3
4.	ZÁKLADNÍ ÚDAJE	4
4.1	HYDROLOGICKÉ PODKLADY.....	6
5.	DEFORMAČNÍ, STABILITNÍ, PRŮSAKOVÁ ANALÝZA	6
5.1	POPIS VYTVOŘENÝCH MODELŮ A VÝPOČETNÍ FÁZE.....	6
	Popis vytvořených modelů	6
	Výpočetní fáze	8
5.2	POUŽITÉ MATERIÁLOVÉ MODELY A VSTUPNÍ PARAMETRY	9
5.3	ZPŮSOB STANOVENÍ VNĚJŠÍ STABILITY	11
5.4	VÝSLEDKY	11
	Výsledky řešení stability	11
	Deformace hráze bez bezpečnostního přelivu – <i>Varianta A</i>	12
	Sedání bezpečnostního přelivu – <i>Varianta B-1 a B-2</i>	14
	Výsledky řešení průsakových poměrů	16
6.	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ.....	21
	Stabilita suché hráze.....	21
	Deformační odezva suché hráze pro různé zatěžovací stavy	21
	Sedání bezpečnostního přelivu.....	22
	Proudění v tělese hráze a v podloží.....	22
	Závěrečný komentář	22

1. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Objednatelem zakázky je firma GEOtest, a.s., zastoupená pro věcná jednání Mgr. L. Hubingerem.

Název akce:	Višňová, Víška – výstavba suché nádrže na Krčeleckém potoce, Doplnkový GTP
Zpracovatel:	doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D., Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Purkyňova 139, 612 00 Brno
Výškový systém:	Balt po vyrovnání (BPV).

2. ÚVODNÍ ČÁST

Předmětem zprávy je zhodnocení sedání a stability nově budované suché nádrže na Krčeleckém potoce pro různé zatěžovací stavy.

V roce 2015 byly zpracovány zadávací podmínky pro doplnkový inženýrskogeologický průzkum [1], protože předchozí etapy nedaly dostatečné geologické a geotechnické informace pro zpracování projektové dokumentace pro výstavbu hráze a dalších objektů. Součástí zprávy [1] je i doporučení, na co by měl zejména odpovědět geotechnický matematický model suché hráze, a to následovně:

- Stabilita návodního a vzdušního líce hráze bez vody a při různých úrovních zadržené vody.
- Stabilita návodního líce při náhlém poklesu vody při odeznění povodně.
- Sedání hráze při ukončení výstavby a celkové sedání při úplné konsolidaci podloží. Sedání hráze při náběhu popovodňové vlny.
- Sedání objektů hráze, zejména šachtového přelivu.
- Časový průběh konsolidace hráze a návrh úprav podloží v případě, že bude nutné dobu konsolidace zkrátit.
- Průběh sedání výpustního potrubí v tělese hráze v podélném profilu a návrh úpravy pro vyrovnání rozdílů sedání v součinnosti s projektantem.
- Vodorovné posuny a přetvoření. Průběhy napětí v tělese hráze a v podloží (stav bez vody a s návrhovou hladinou).
- Průběh proudění tělesem hráze a podloží při zadržení povodňové vlny. Návrh hloubky návodní těsnicí ostruhy v součinnosti s projektantem.

3. POUŽITÉ PODKLADY

- [1] Zpráva- Zadávací podmínky pro doplnkový inženýrskogeologický průzkum, Višňová, Víška – výstavba suché nádrže na Krčeleckém potoce, ARCADIS CZ, a.s., divize Geotechnika, 9/2015
- [2] Geologická dokumentace vrtů a kopaných sond (J5, J6, J7, J8, S5 a S6), GEOtest, a.s.

- [3] Vyhodnocení penetračních sond (SP1, SP2, SP3, SP4, DP5, SP6, SP7, SP8 a SP9), GEOtest, a.s.
- [4] Protokol o zkoušce č.: 3203-0160/16, GEOtest, a.s., 9/2016
- [5] Zpráva o laboratorních trojosých zkouškách 3 neporušených vzorků od společnosti GEOtest, a.s. provedených v roce 2016 v rámci HČ PřF UK v Praze podle objednávky ze dne 28. 7. 2016, 09/2016
- [6] Inženýrskogeologický profil (Geotechnický řez A-A'), GEOtest, a.s., M 1:100, 09/2016 (formát dwg / rezy s profily_v4.dwg/)
- [7] Vzorový příčný řez – zemní hráz.dwg (podklad od projektanta HG Partner s.r.o.).
- [8] Výpustný objekt a BP.dwg (podklad od projektanta HG Partner s.r.o.).
- [9] Doporučené vstupní hodnoty do modelu (GT3 – GT8), GEOtest, a.s., 10/2016 (formát pdf)
- [10] TNV 75 2415 Suché nádrže, 01/2013
- [11] DOLEŽAL, P. a kol., Malé vodní a suché nádrže: TP 1.19: technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011, 108 s.
- [12] VUKOVIČ, M., PUŠIČ, M. Soil Stability and Deformation due to Seepage. Water Resources Publications. Highlands Ranch: Colorado, 1992, 80 p. ISBN 0-918334-78-0.
- [13] DEN ADEL, H. a kol., Internal stability of minestone. Proc. Int. Symp. Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Rotterdam: Balkema, 1988.

4. ZÁKLADNÍ ÚDAJE

Posuzovaná hráz je navržena jako zemní z místních materiálů. Výška nádrže je proměnná od 0,0 m do cca 10,0 m od úrovně založení hráze. Kóta koruny nádrže je 260,01 m n.m.

Geologická a hydrogeologická stavba podloží

Dle pokladu [1] bude nádrž zakládána ve velmi složitých geologických podmínkách. V podloží nádrže se nachází granitoidy lužického plutonu. Nad ním se vyskytují pánevní sedimenty tvořené zejména jíly a s písky. V těchto pánevních sedimentech se navíc vyskytují polohy xylitického popř. detritického lignitu. Kvartérní pokryv je zastoupen sedimenty kontinentálního zalednění charakteru glaciofluvialních písků a štěrkopísků, s polohami tence laminovaných jíků.

Hydrogeologie zájmového území je dána střídáním propustných a nízko propustných vrstev. Hladina podzemní vody je v těsné blízkosti terénu.

V roce 2016 je prováděn na základě pokladu [1] doplňkový inženýrskogeologický průzkum. Z tohoto průzkumu v době zpracování této zprávy byly k dispozici jen dílčí podklady [2], [3] a geologický profil v posuzovaném řezu [6]. Dílčí podklady potvrzují složitost geologických podmínek. Jde o velmi nestejnoroďe stlačitelné podloží.

Těleso hráze

Dle pokladu [6] je těleso nádrže navrženo jako homogenní hráz z místních zemín. Při doplňkovém průzkumu byly provedeny dvě kopané sondy (S5 a S6). Zeminy odebrané z nich byly odzkoušeny v laboratoři mechaniky zemín firmy GEOtest, a.s. a pro materiál hráze byl vybrán materiál geotechnického typu GT3 (jíl písčitý).

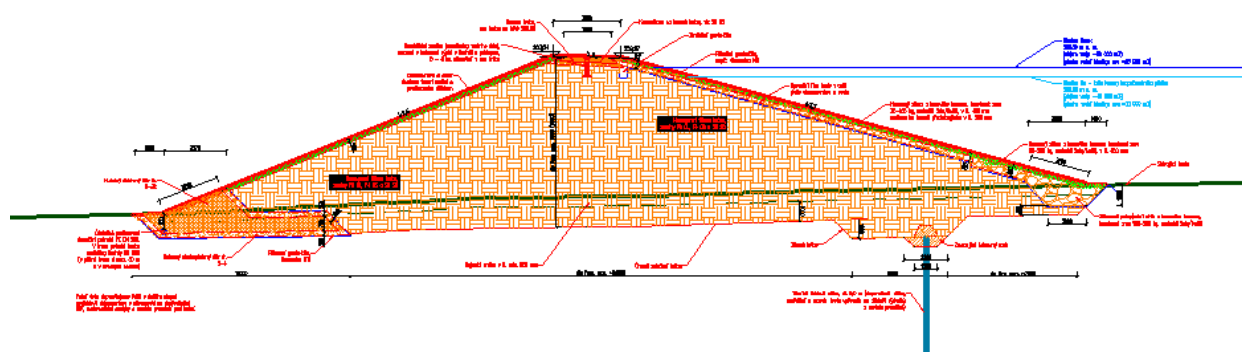
Návodní svah hráze je projektován ve sklonu 1:3,7 a je opevněn kamenných záhozem z lomového kamene o hmotnosti zrna 80 – 200 kg v mocnosti 600 mm při patě nádrže. Dále na něj navazuje až ke koruně nádrže kamenný zához z lomového kamene o hmotnosti zrna 30 – 100 kg v proměnné tloušťce 300 – 400 mm. V patě návodního svahu je dále zhotovena záhozová pata z lomového kamene o hmotnosti zrna 100 – 200 kg.

Vzdušný svah hráze je projektován ve sklonu 1:2,5. V jeho patě je vytvořen hutněný šterkový filtr a povrch je ohumusován ve vrstvě 150 mm a oset travním semenem.

Koruna hráze má šířku 3,5 m se sklonem 2% směrem k návodní straně. Skladba komunikace není známa.

Založení hráze je navrženo do štěrků a písků (GT4) s provedením zámku do hlín s vysokou plasticitou (GT6). V místě zámku je dále navržena těsnící štetová clona délky 6,0 m.

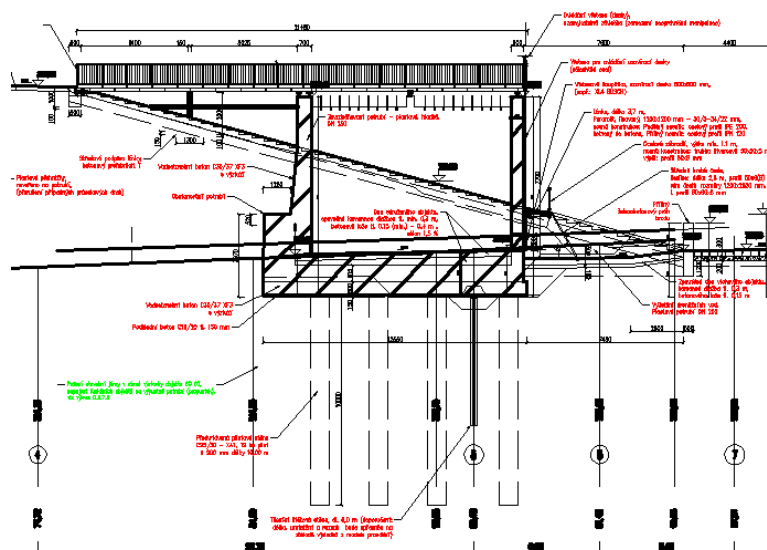
Tvar příčného profilu, geometrické rozměry a materiálové složení je schematicky uvedeno na Obr. 1 (vzorový příčný profil hráze) [7].



Obr. 1 Vzorový příčný řez suchou nádrží [7]

Bezpečnostní přeliv

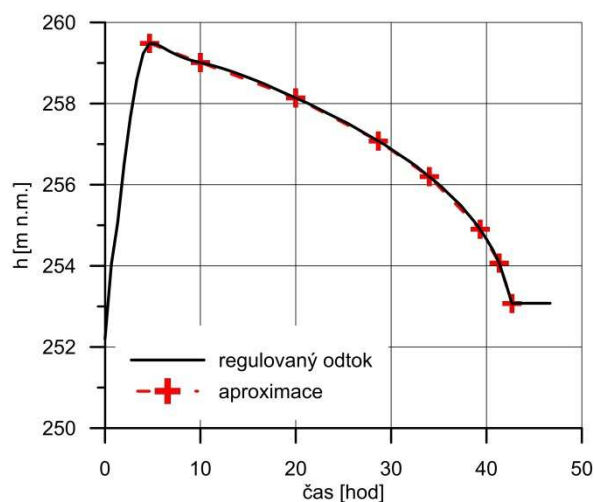
Je projektován jako železobetonová konstrukce založená na vrtaných pilotách a je zasazen do tělesa nádrže (obr. 2). Je součástí sruženého objektu. Geometrie bezpečnostního přelivu je dána výkresovou dokumentací dle podkladu [8].



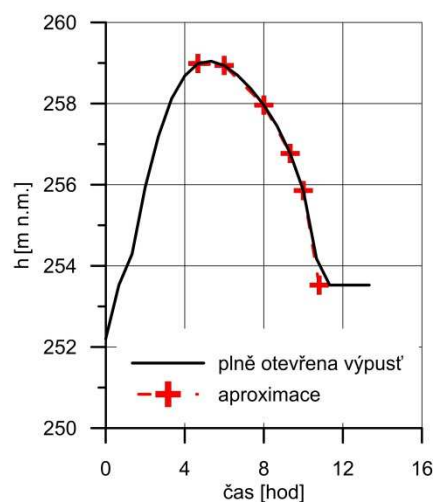
Obr. 2 Příčný řez sruženým objektem [8]

4.1 Hydrologické podklady

Pro potřebu posudku byl poskytnut firmou HG Partner, s.r.o podklad [3] definující průběh povodňové vlny PV_{100} . Časový průběh výšky hladiny vody v nádrži pro regulovaný pokles a pokles při plně otevřené spodní výpusti [3] spolu s náhradním (aproximovaným) průběhem poklesu hladiny uvažovaným v provedených výpočtech je znázorněn na obr. 3 a 4.



Obr. 3 Regulovaný pokles



Obr. 4 Pokles při plně otevřené výpusti

5. DEFORMAČNÍ, STABILITNÍ, PRŮSAKOVÁ ANALÝZA

V rámci provedených analýz byly vytvořeny na základě požadavků objednatele tři geotechnické modely. První (základní) model (dále „Varianta A“) vznikl na základě požadavku objednatele analyzovat profil hráze odpovídající inženýrskogeologickému profilu dle podkladu [6]. U tohoto modelu (Varianta A) byla provedena detailní analýza. Druhý model (dále „Varianta B“) vychází z prvního s tím rozdílem, že je do něj zakomponován bezpečnostní přeliv a poslední modifikace vznikla na základě zhodnocení větší mocnosti propustnější vrstvy v podloží (Varianta C). V případě těchto dvou variantních modelů již byly analyzovány pouze dílčí aspekty.

Cílem této analýzy je získat informace o chování suché nádrže, aby bylo pokud možné odpověď na body uvedené v kapitole 2 této zprávy.

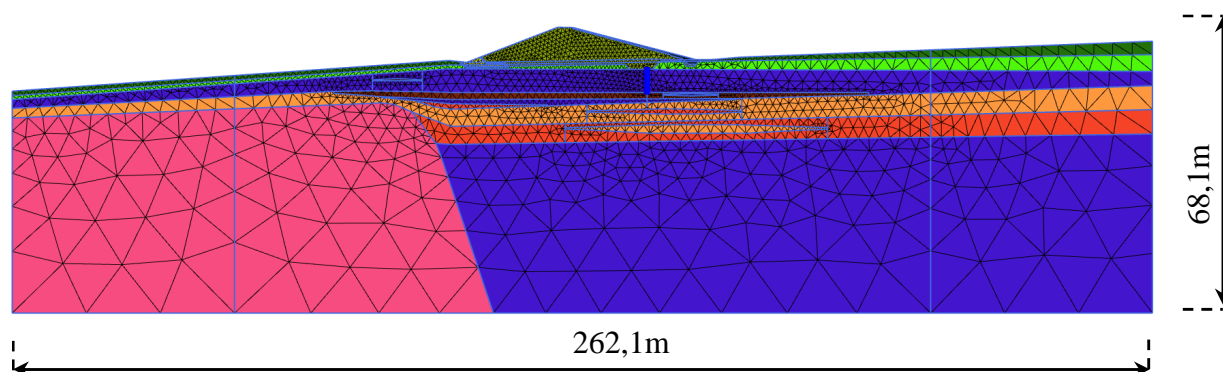
5.1 Popis vytvořených modelů a výpočetní fáze

Popis vytvořených modelů

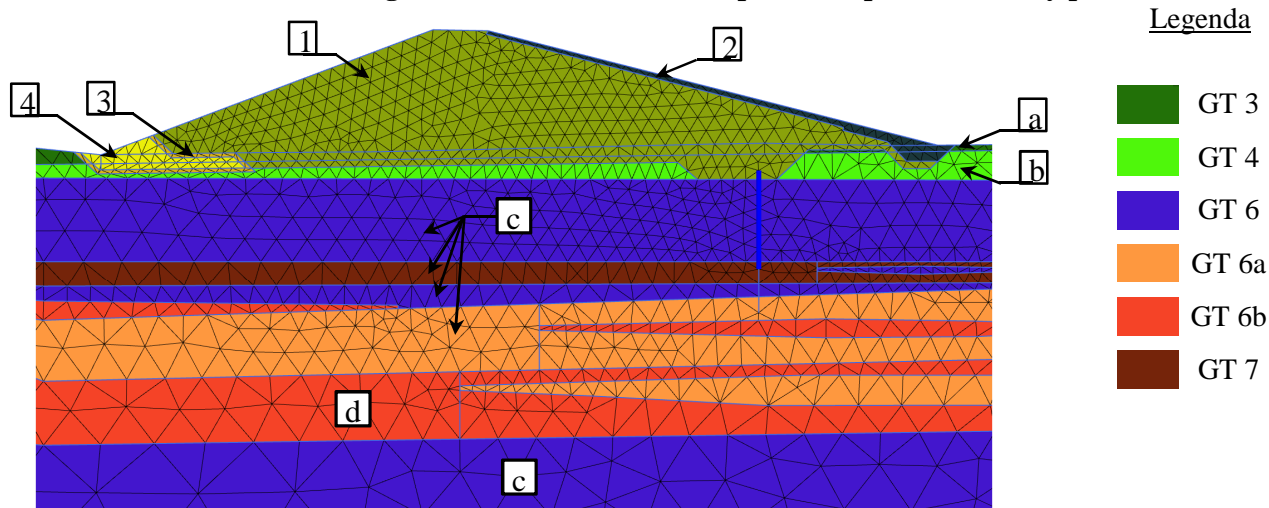
Deformační a stabilitní analýza suché hráze (SN) byla provedena s využitím programu Plaxis 2D za předpokladu platnosti rovinné deformace.

Geometrie modelu (geologické vrstvy, tvar tělesa SN a jeho uspořádání) byly převzaty z podkladů [6] a [7]. S ohledem na omezení vlivu velikosti modelu bylo nutné provést jeho rozšíření oproti podkladu [6]. Geometrie a vytvořená síť konečných prvků jsou pro Variantu A

znázorněny na obr. 5 (celkový pohled) a 6 (detail tělesa SN). Celkový počet konečných prvků je 4405, průměrná délka strany prvku je 2,013m.

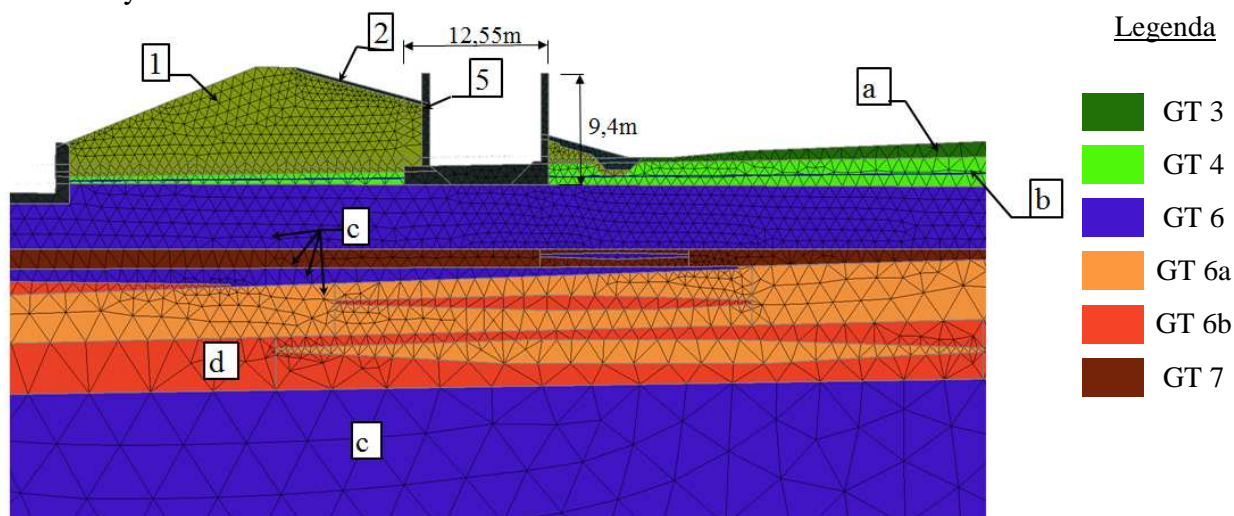


Obr. 5 Varianta A - geometrie modelu mimo bezpečnostní přeliv – celkový pohled



Obr. 6 Varianta A - geometrie modelu mimo bezpečnostní přeliv – detail

Geometrie Varianty B je zobrazena na obrázku 7. Délka modelu je 262 m a výška 68 m. Ve Variantě B je stejná geologie i výška hráze. Model je pouze doplněn o geometrii bezpečnostního přelivu a vývaru.



Obr. 7 Varianta B - geometrie modelu s bezpečnostním přelivem – detail

V závěru zpracovávání numerické analýzy došlo k další modifikaci výchozí *Varianty A*. Požadavek objednatele zněl posoudit vliv těsnící štětové clony z pohledu průsakových poměrů pro případ, že se v podloží nachází větší mocnost vrstvy zeminy GT4. Vzhledem k tomu, že provedeným IGP byl sestaven pouze geotechnický profil A-A', bylo ze strany objednatele rozhodnuto, že v tomto profilu bude horní vrstva z GT6 zaměněna za propustnější typ GT 4. Tento výpočet je označen jako *Varianta C*.

Výpočetní fáze

Analýza suché nádrže pro *Variantu A* byla rozdělena do těchto fází:

- ZS 0 Počáteční podmínky
- ZS 1 Výstavba SN
 - doba výstavby: 1 rok
- ZS 2 Ukončení konsolidace
 - Požadovaný stupeň konsolidace $U=95\%$
- ZS 3 Nádrž naplněná – maximální hladina při neregulovaném poklesu [3]
 - hladina v nádrži na kótě 259,0 m n.m.,
 - ustálený stav filtračního proudění.
- ZS 4 Nádrž naplněná – maximální hladina při regulovaném poklesu [3]
 - hladina v nádrži na kótě 259,5 m n.m.,
 - ustálený stav filtračního proudění.
- ZS 5 Pokles hladiny – plně otevřena spodní výpust (neregulovaný pokles)
 - max. rychlost prázdnění: 2,91 m/den
- ZS 6 Pokles hladiny – regulovaný pokles
 - max. rychlost prázdnění: 0,75 m/den

V ZS 3 a 4 se předpokládá ukončená konsolidace podloží v důsledku výstavby SN. ZS 5 navazuje na ZS 3 a ZS 6 navazuje na ZS 4.

Analýza sedání bezpečnostního přelivu ve *Variantě B* byla na základě konzultace s projektantem hráze rozdělena na dvě podvarianty: *Varianta B-1* a *Varianta B-2* s těmito fázemi výpočtu:

Varianta B-1 (bezpečnostní přeliv je budován současně s výstavbou hráze):

- ZS 0 Počáteční podmínky
- ZS 1 Výstavba SN včetně přelivu
 - doba výstavby: 1 rok
- ZS 2 Ukončení konsolidace
 - Požadovaný stupeň konsolidace $U=95\%$

Varianta B-2 (bezpečnostní přeliv je proveden až po výstavbě hráze dle HG Partner, s.r.o.):

- ZS 0 Počáteční podmínky
- ZS 1 Výstavba SN
 - doba výstavby: 1 rok
- ZS 2 Bezpečnostní přeliv - odkop
- ZS 3 Bezpečnostní přeliv - výstavba
 - doba výstavby: 130 dní
- ZS 4 Ukončení konsolidace
 - Požadovaný stupeň konsolidace $U=95\%$

Analýza průsakových poměrů ve *Variantě C* byla řešena v těchto fázích::

- ZS 0 Počáteční podmínky
- ZS 1 Výstavba SN
 - doba výstavby: 1 rok
- ZS 2 Ukončení konsolidace
 - Požadovaný stupeň konsolidace $U=95\%$
- ZS 3 Nádrž naplněná – maximální hladina při regulovaném poklesu [3]
 - hladina v nádrži na kótě 259,5 m n.m.,
 - ustálený stav filtračního proudění.

5.2 Použité materiálové modely a vstupní parametry

Pro analýzu předmětné stavby byly využity následující materiálové modely:

- *Mohr – Coulomb model (MC)* – využit pro materiál tělesa násypu, návodního opevnění, patního drénu a filtrů. Deformační charakteristiky (E' , ν') tělesa násypu byly zvoleny na základě zkoušek jednoosé stlačitelnosti na zhutněném vzorku. Pro ostatní materiály hráze byly tyto charakteristiky odhadnuty.

- *Soft Soil Model (SS)* – využit pro soudržné zeminy GT 6 a GT 6a zastižené v analyzovaném profilu. Z provedených laboratorních zkoušek jednoosé stlačitelnosti a z výsledků CPT lze polohy soudržných zemin klasifikovat podle *Tomlinson (1995)* jako mírně stlačitelné ($E_{oed} = 3-10\text{MPa}$) až velmi stlačitelné ($E_{oed} = 0,7-3\text{MPa}$), co v kombinaci s dostupnými zkouškami stlačitelnosti pro GT 6 odůvodňuje použití tohoto typu modelu. Deformační parametry SS modelu (λ^* , κ^*) byly odvozeny z výsledků zkoušek jednoosé stlačitelnosti a srovnány s řadou dostupných korelačních závislostí.

- *Hardening Soil Model (HS)* – využit pro nesoudržné zeminy GT 4, GT 6b a pro vrstvu GT 3 v analyzovaném profilu. Hodnoty deformačních charakteristik (E_{oed}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} , m) bylo nutné odhadnout na základě výsledků CPT zkoušek a s využitím empirických zásad a doporučení.

Parametry smykové pevnosti (ϕ' , c') byly zvoleny na základě zaslaných doporučených hodnot [9], výsledků triaxiálních zkoušek CU [5] a odborného odhadu zpracovatelů zprávy.

Provedené zkoušky stlačitelnosti neodhalily překonsolidaci zemin. V analýzách bylo proto uvažováno s $OCR=1$ a $POP=0$ kPa (HS, SS).

Použité hodnoty vstupních parametrů jsou shrnuty v tab. 1 (fyzikálně-indexové, pevnost, propustnost) a tab. 2 (stlačitelnost).

Tab. 1 Hodnoty vstupních parametrů: fyzikálně indexové, pevnost, propustnost

Materiál		Objemová tíha		Soudržnost/úhel vnitřního tření		koef. hydraulické vodivosti
		γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	ϕ'	$k_{x,y sat}$
		[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[m/den]
1	Těleso SN	19,0	21,0	5,0	28,0	0,026
2	Zához	19,0	21,0	1,0	41,0	8,64*
3	Filtr 2-4	17,0	19,0	1,0	30,0	8,64
4	Filtr 8-32	17,0	19,0	1,0	32	8,64
a	GT 3	16,0	20,0	2,0	29,0	2,6e-3
b	GT 4	15,0	17,0	1,0	31,0	0,52
c	GT 6, 6a, 7	13,5	18,0	1,0	29,0 [#]	2,6e-3
d	GT 6b	15,0	18,0	3,0	31,0	0,086
e	GT 8	18,2	20,5	1,0	25,0	0,043

* Propustnost totožná s propustností materiálu filtru – zvýšení propustnosti má jen malý vliv na výsledky, resp. v případě rychlého poklesu na návodní straně může vést použití nižších hodnot propustnosti ke konzervativnějším výsledkům (stupeň stability)

[#] Kritická hodnota úhlu vnitřního tření

Tab. 2 Hodnoty vstupních parametrů: stlačitelnost

Materiál		MC		SS		HS			
		E'	ν'	λ^*	κ^*	E_{oed}^{ref}	E_{50}^{ref}	E_{ur}^{ref}	m
		[MPa]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1	Těleso SN	13,5	0,35						
2	Zához	150,0	0,35						
3	Filtr 2-4	15,0	0,30						
4	Filtr 8-32	15,0	0,30						
a	GT 3*					0,92	1,15	3,50	1,0
b	GT 4					25,53	31,91	95,73	0,5
c	GT 6, 6a ⁺ , 7 [#]			0,0279	0,0062				
d	GT 6b					60,0	75,0	225,0	0,5
e	GT 8					90,0	112,5	337,5	0,5

* pro tento typ soudržné zeminy nejsou k dispozici zkoušky stlačitelnosti, byl využit HS model s odhadem vstupů, v analyzovaném řezu se pod tělesem SN nenachází, sedání tělesa tedy touto vrstvou není ovlivněno

⁺ dle podkladu [9] jsou doporučené hodnoty GT 6a a GT 6 sobě blízké, bylo rozhodnuto uvažovat se vstupy pro GT6a dle GT6

[#] pro GT 7 byly, vzhledem na minimální prozkoumanost a variabilitu této vrstvy zvoleny parametry shodné s GT 6

Důvodem pro využití pokročilejších materiálových modelů je kvalitativně lepší predikce chování zemin. S ohledem na deformační a stabilitní analýzu jde především o následující aspekty:

- Tuhost zeminy závislá na hlavních napětích σ_1 , σ_3
- Vyšší tuhost zeminy při odtěžování – opětovném přitěžování ve srovnání s tuhostí při prvotním zatížení

- Vznik pórových tlaků v důsledku zatížení zeminy deviátorovým napětím (důležité z hlediska vnější stability konstrukcí v prostředí normálně až mírně překonsolidovaných zemin)

Pro bezpečnostní přeliv byl použit lineárně-elastický materiálový model. Vstupní hodnoty pro tento model jsou shrnuty v Tab. 3.

Tab. 3 Hodnoty vstupních parametrů pro beton (bezpečnostní přeliv)

Materiál		Objemová tíha	Poissonův součinitel	Modul pružnosti C20/25
		γ	ν	E_b
		[kN/m ³]	[-]	[GPa]
5	Beton	31*	0,2	29

* Objemová tíha byla zvýšena z důvodu modelování přelivu v 2D úloze. Tato hodnota byla odvozena z napětí v základové spáře přelivu od celé konstrukce pro úsek jednoho metru ve 2D za předpokladu vyvození stejné intenzity napětí v základové spáře.

5.3 Způsob stanovení vnější stability

Pro stanovení bezpečnosti SN byla použita výpočetní procedura využívající redukci parametrů smykové pevnosti (SRM). Podstatou metody SRM je řízené redukování vstupních hodnot smykové pevnosti (c_0 , $\tan \varphi_0$) až do situace, kdy je docíleno kolapsu analyzované konstrukce (c_f , $\tan \varphi_f$). Výstupem z této procedury je stupeň bezpečnosti:

$$F = \frac{c_0}{c_f} = \frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi_f} \quad (1)$$

Pro podmínku spolehlivosti proto platí vztah (2). Podle TNV 75 2415 je požadované $F_{\min}=1,5$.

$$F \geq F_{\min} \quad (2)$$

5.4 Výsledky

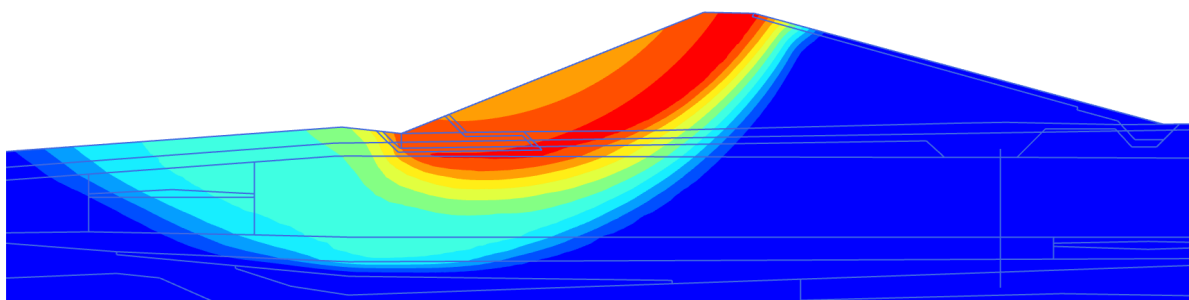
Výsledky řešení stability

Výsledné hodnoty stupňů stability F jsou pro *Varinatu A* shrnuty v tab. 4. Tvary smykových ploch jsou znázorněny na obr. 8. Komentář – zdůvodnění výsledků stabilitních analýz je proveden v závěrečné části zprávy.

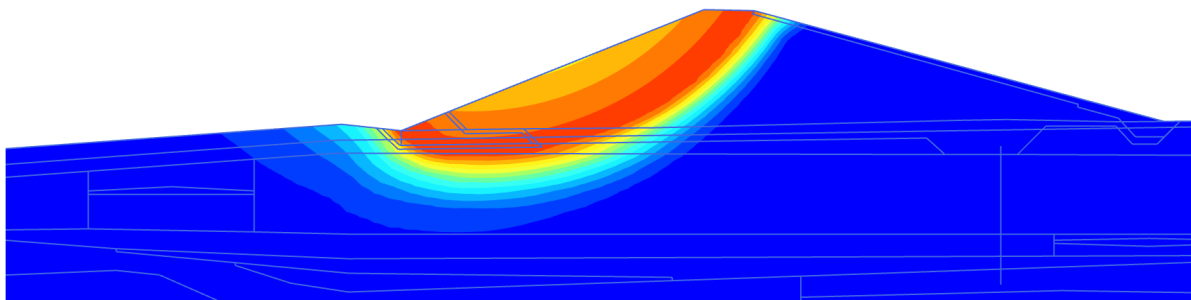
Tab. 4 Výsledky stabilitních výpočtů – Varianta A

Zatěžovací stav	F	Posouzení	Poloha smykové plochy
1	1,67	1,67>1,5	Vzdušný
2	1,70	1,70>1,5	Vzdušný
3	1,57	1,57>1,5	Vzdušný
4	1,51	1,51>1,5	Vzdušný
5	1,57*	1,57>1,5	Vzdušný
6	1,51*	1,51>1,5	Vzdušný

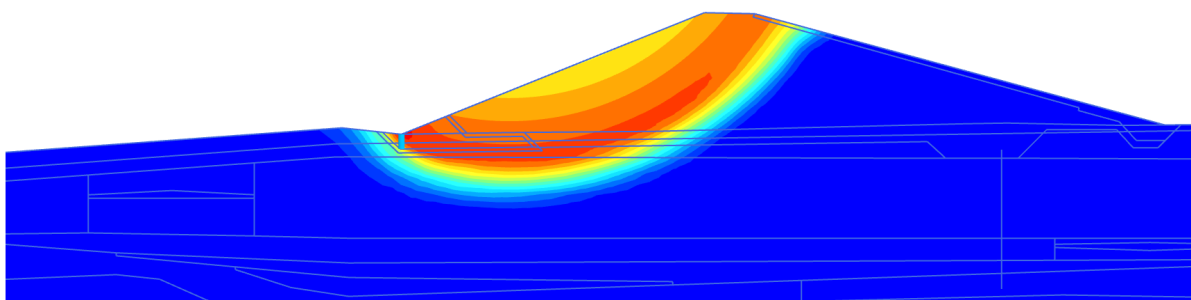
* při obou poklesech hladin zůstává smyková plocha na vzdušní straně tělesa SN (z důvodu malého sklonu návodního líce). Nejnepríznivější stav je tedy při začátku poklesu hladiny, kdy je HPV v tělese SN nejvyšší.



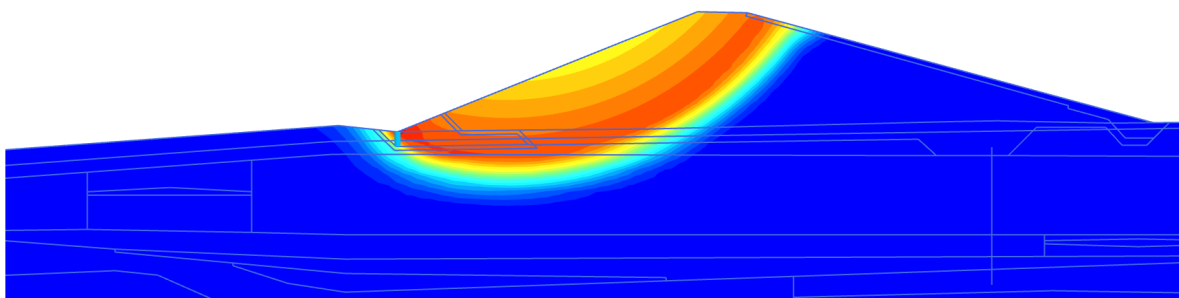
Obr. 8a Tvar smykové plochy – ZS1



Obr. 8b Tvar smykové plochy – ZS2



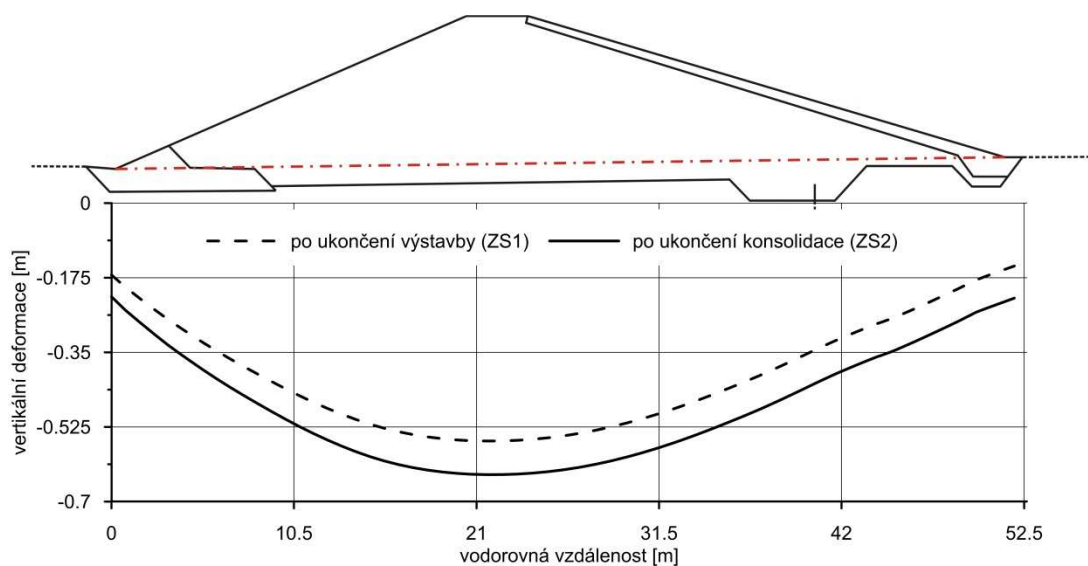
Obr. 8c Tvar smykové plochy – ZS3; ZS5



Obr. 8d Tvar smykové plochy – ZS4; ZS6

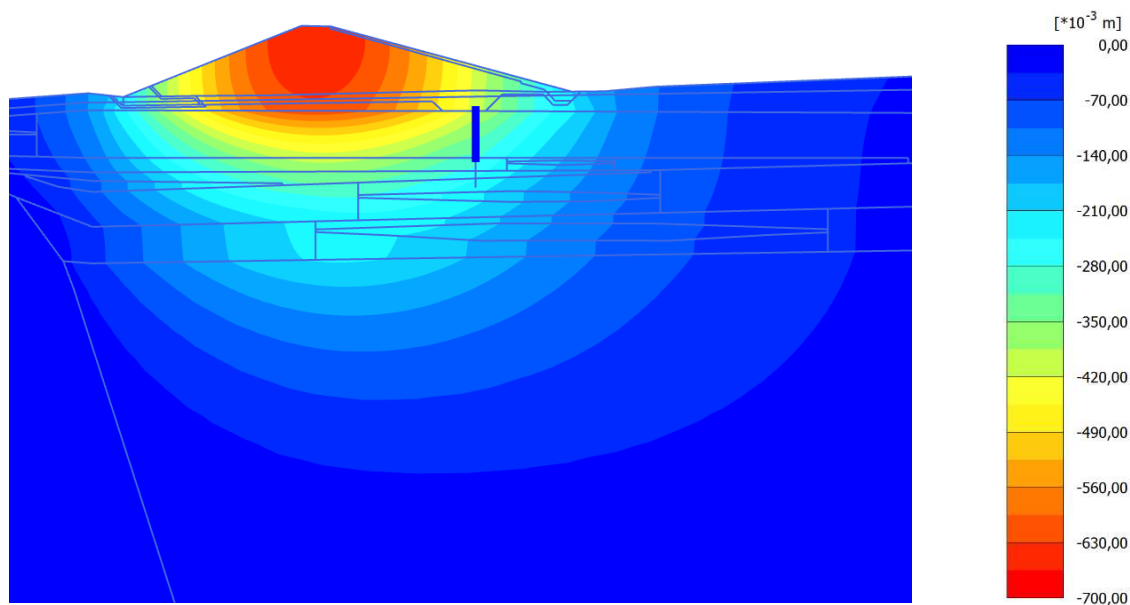
Deformace hráze bez bezpečnostního přelivu – *Varianta A*

Svislé deformace pro etapu budování tělesa SN (ZS 1) a ukončení konsolidace (ZS 2) jsou znázorněny na obr. 9.



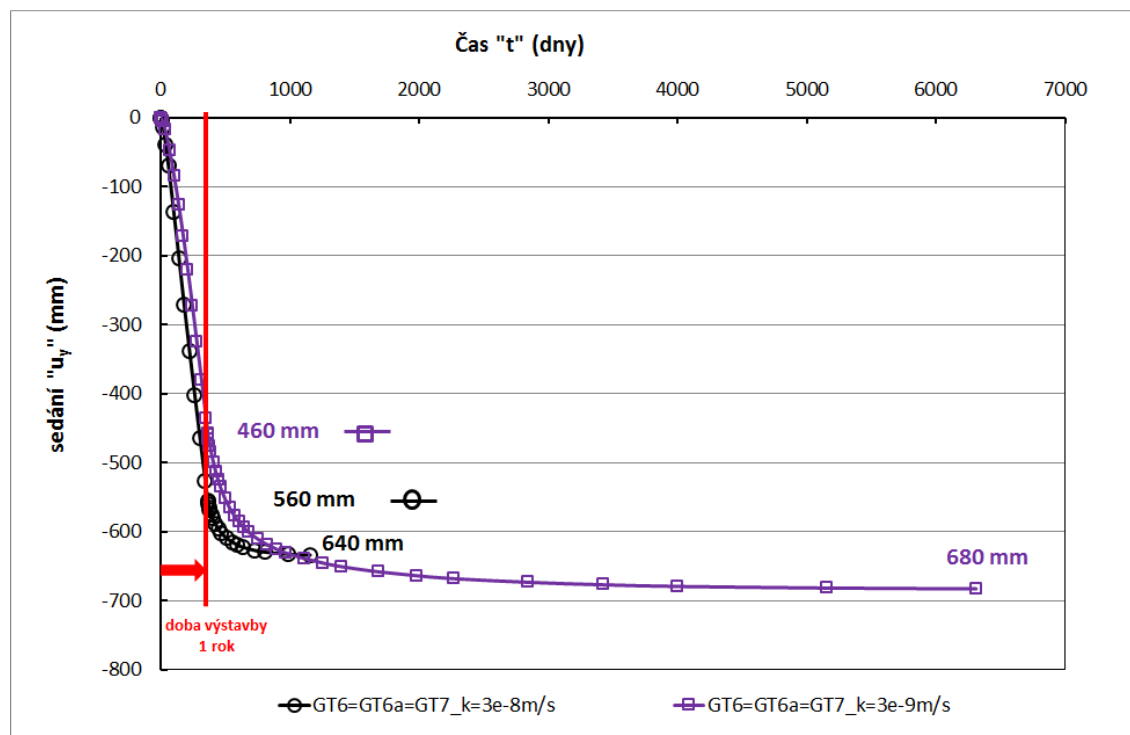
Obr. 9 Rozložení předpokládaných vertikálních deformací ve vodorovném řezu

Izolinie předpokládaných vertikálních deformací po ukončení konsolidace (ZS 2) jsou znázorněny na obr. 10.



Obr. 10 Izolinie předpokládaných vertikálních deformací po ukončení konsolidace – ZS 2

Na základě požadavku objednatele byla dodatečně provedena analýza sedání suché hráze pro případ, že koeficient hydraulické vodivosti bude nižší než doporučený (viz. Tab. 1). Ke snížení koeficientu hydraulické vodivosti o jeden řád došlo u zemin geotechnického typu GT6, GT 6a a GT7 (tzn. z $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$ m/den ($3 \cdot 10^{-8}$ m/s) na $k = 2,6 \cdot 10^{-4}$ m/den ($3 \cdot 10^{-9}$ m/s)). Pro obě alternativy bylo sledováno sedání bodu ve středu báze hráze. V tomto bodě je vykreslen průběh sedání „ u_y “ v čase (Obr. 11).



Obr. 11 Izolinie předpokládaných vertikálních deformací po ukončení konsolidace – ZS 2

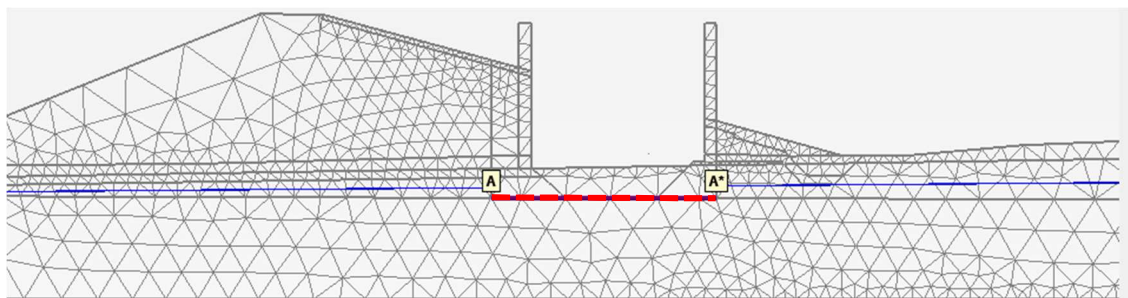
Z obrázku 11 je zjevné, což je i známo, že snížením koeficientu hydraulické vodivosti bude sedání hráze po její výstavbě (1 rok) menší oproti alternativě s vyšším koeficientem hydraulické vodivosti. Následné dosednutí hráze po výstavbě bude větší nižší „k“. Proto určení koeficientu hydraulické vodivosti je velmi důležité.

Sedání bezpečnostního přelivu – Varianta B-1 a B-2

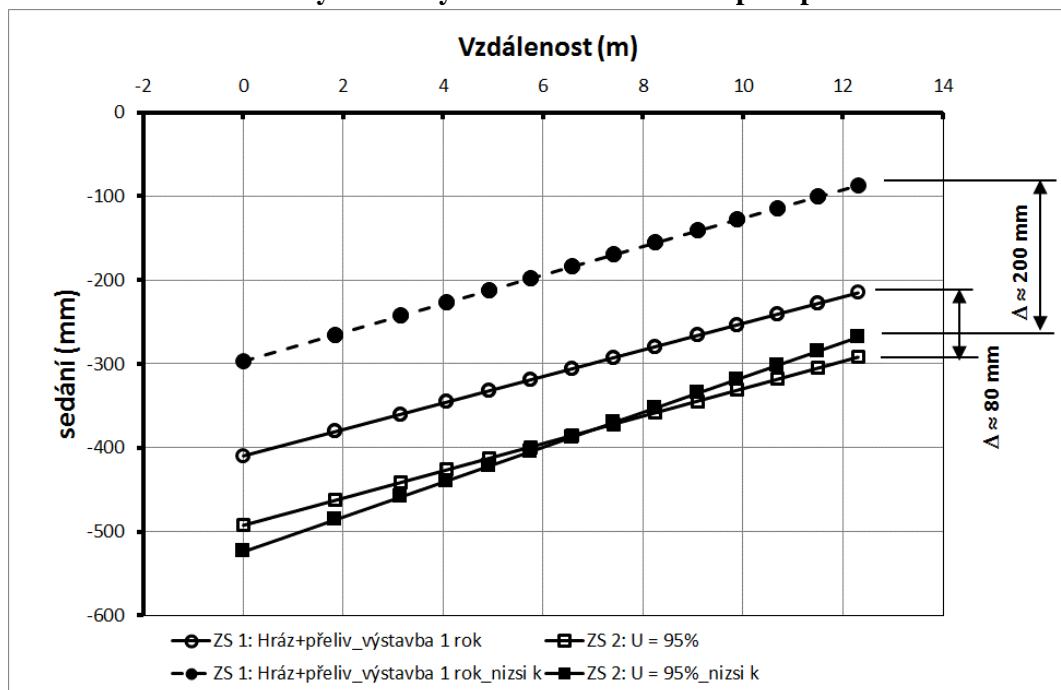
Sedání bezpečnostního přelivu bylo vypočteno ve dvou subvariantách – *Varianta B-1* a *Varianta B-2*. Ve *Variantě B-1* je hráz i bezpečnostní přeliv budován souběžně po dobu 1 roku a poté následuje konsolidace. Ve *Variantě B-2* je nejdříve vybudována hráz (doba výstavby 1 rok), poté dojde k odtěžení části hráze a zhotovení bezpečnostního přelivu. Doba výstavby přelivu včetně výkopu pro něj je 150 dní. Poté následuje konsolidace. *Varianta B-2* reflektuje záměr projektanta hráze, kterým se má předejít velkým nerovnoměrným sedáním.

Pro obě varianty byl sledován svislý posun přelivu v základové spáře. Vyšetřovaný řez je zobrazen na Obr. 12. Dosažené posuny jsou pro obě varianty vykresleny v grafické závislosti pro zatěžovací stav ZS1 a ZS2 u *Varianty B-1* (Obr. 13) a pro ZS3 a ZS4 u *Varianty B-2* (Obr. 14).

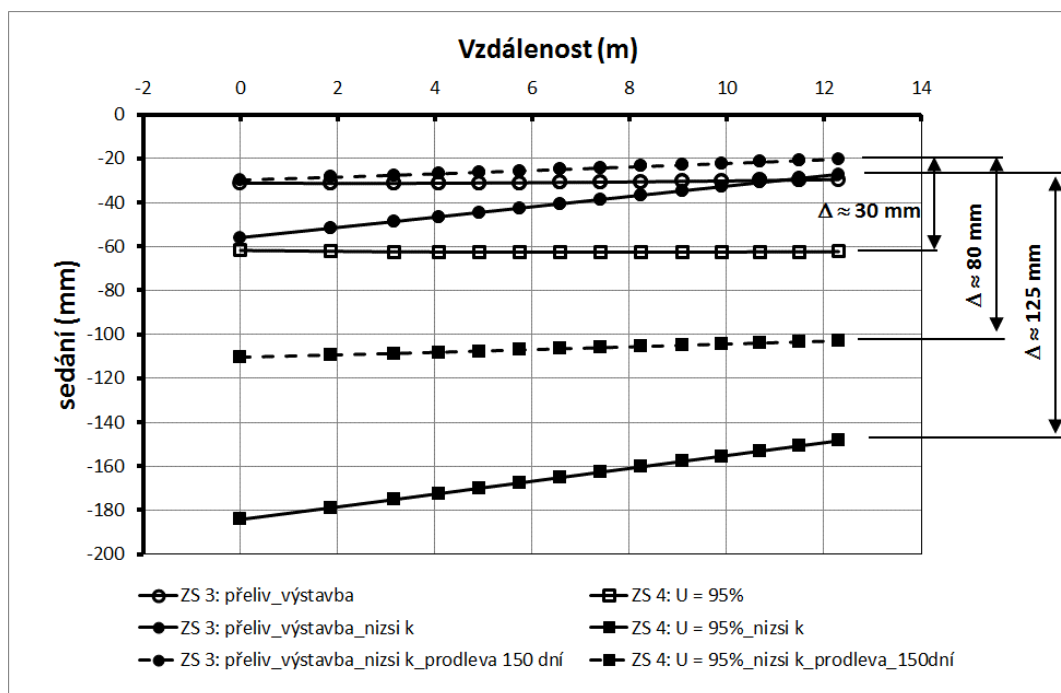
Analogicky se sedáním celé hráze, bylo i u bezpečnostního přelivu přistoupeno ke snížené koeficientu hydraulické vodivosti o řád u GT6, GT 6a a GT7. Průběh sedání je zakreslen rovněž do grafů na obr. 13 a 14. Touto analýzou se opět prokázalo, že nerovnoměrné i velikost sedání bude větší. Navíc u *Varianty B-2* došlo k zvýšení velikosti sedání i jeho přírůstku po výstavbě přelivu. Proto byla do výpočtu zahrnuta časová prodleva 150 dní mezi ukončením výstavby hráze a budováním přelivu. Průběh svislých posunů je zahrnut do grafu na obr. 14.



Obr. 12 Vyšetřovaný řez A-A' v základové spáře přelivu



Obr. 13 Varianta B-1 - Průběh sedání přelivu v základové spáře



Obr. 14 Varianta B-2 - Průběh sedání přelivu v základové spáře

Zhodnocení sedání je shrnuto v Tab. 5.

Tab. 5 Sedání bezpečnostního přelivu

Varianta	Časový úsek	Konečné celkové sedání			nerovnoměrné		
		$u_{y,max}$	$u_{y,min}$	posouzení	dru h	velikost	posouzení
		[mm]	[mm]			[-]	
B-1	1 rok	410	215	> 200 mm	$\Delta s/$	0,016	> 0,003
	U = 95%	492	292	> 200 mm	b	0,016	> 0,003
B-1 nižší „k“	1 rok	297	87	> 200 mm	$\Delta s/$	0,017	> 0,003
	U = 95%	524	268	> 200 mm	b	0,021	> 0,003
B-2	1 rok	31	30	< 200 mm (OK)	$\Delta s/$	0,0001	< 0,003 (OK)
	U = 95%	63	62	< 200 mm (OK)	L_T	0,0001	< 0,003 (OK)
B-2 nižší „k“	1 rok	56	27	< 200 mm (OK)	$\Delta s/$	0,002	< 0,003 (OK)
	U = 95%	184	148	< 200 mm (OK)	b	0,003	= 0,003
B-1 nižší „k“ + prodleva	1 rok	30	20	< 200 mm (OK)	$\Delta s/$	0,001	< 0,003 (OK)
	U = 95%	110	103	< 200 mm (OK)	b	0,001	< 0,003 (OK)

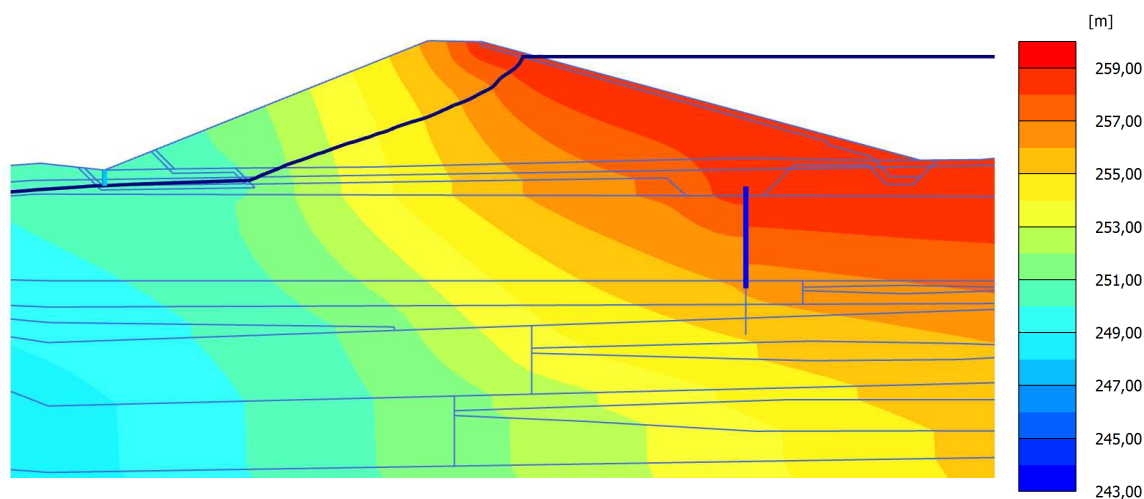
Pozn: $b = L_T = 12,55m$

Bezpečnostní přeliv je předpokládán jako tuhá ŽB konstrukce

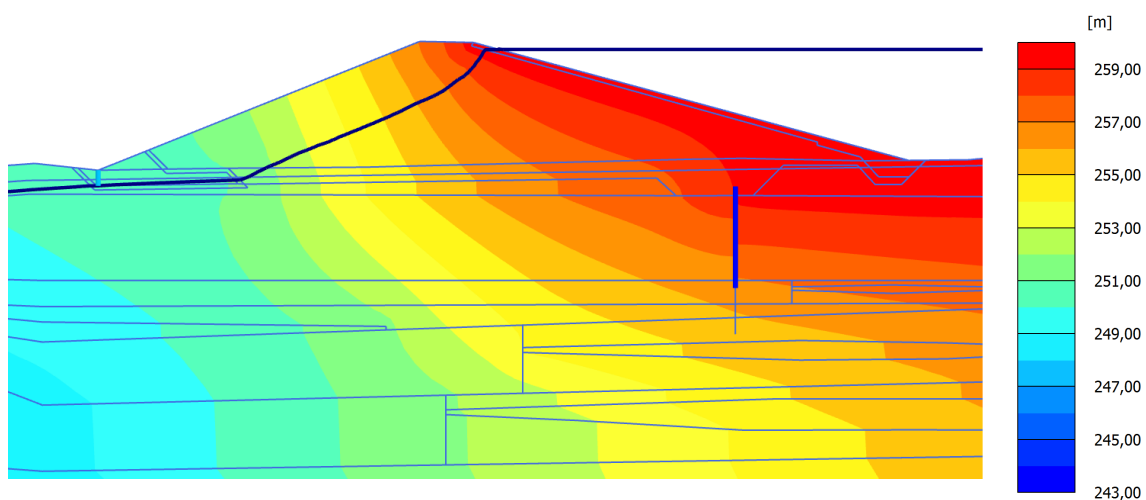
Výsledky řešení průsakových poměrů

Varianta A:

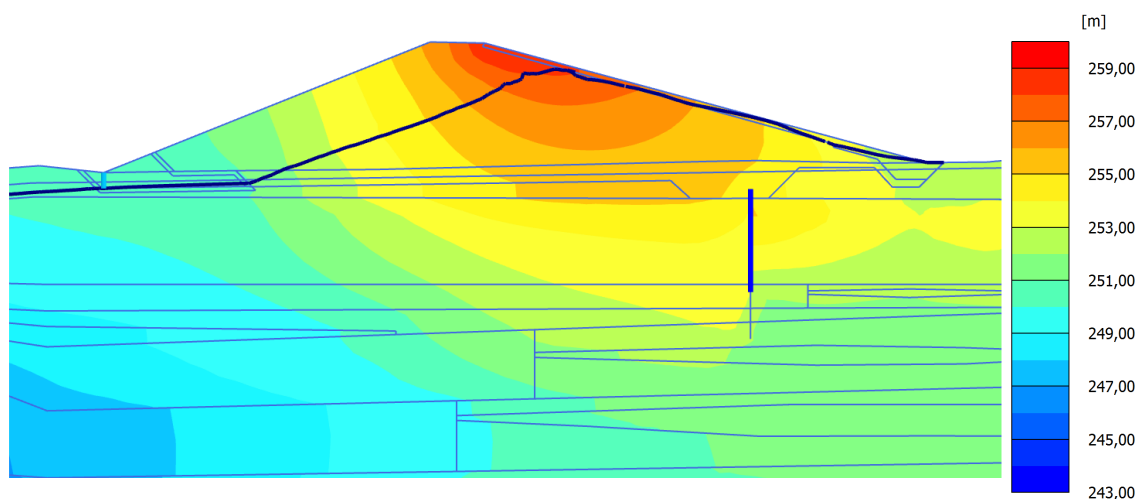
Izolinie piezometrických výšek spolu s vypočtenou polohu HPV jsou znázorněny na obr. 15.



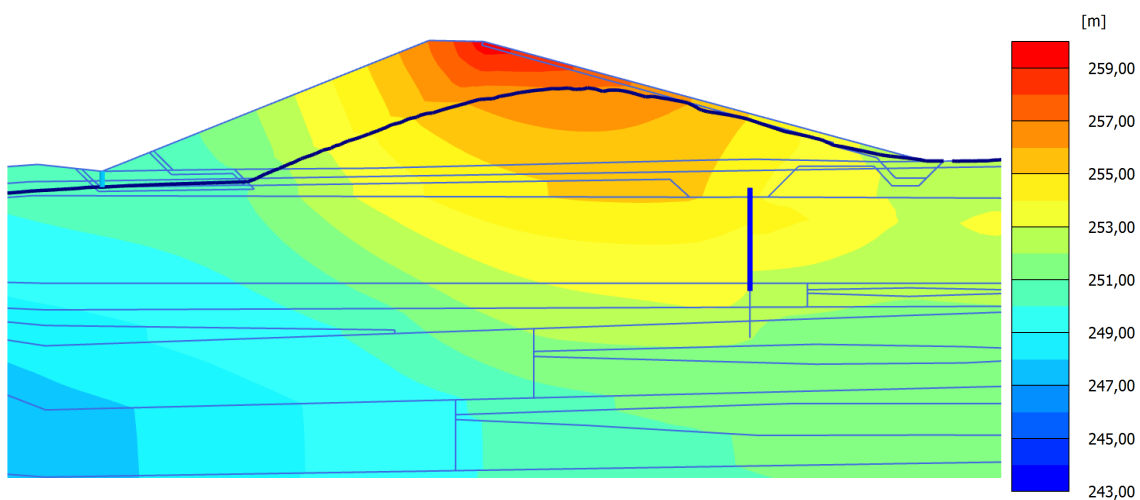
Obr. 15a Izolinie piezometrických výšek, ZS 3 – ustálené proudění, H=259,0 m n. m.



Obr. 15b Izolinie piezometrických výšek, ZS 4 – ustálené proudění, $H=259,5$ m n. m.



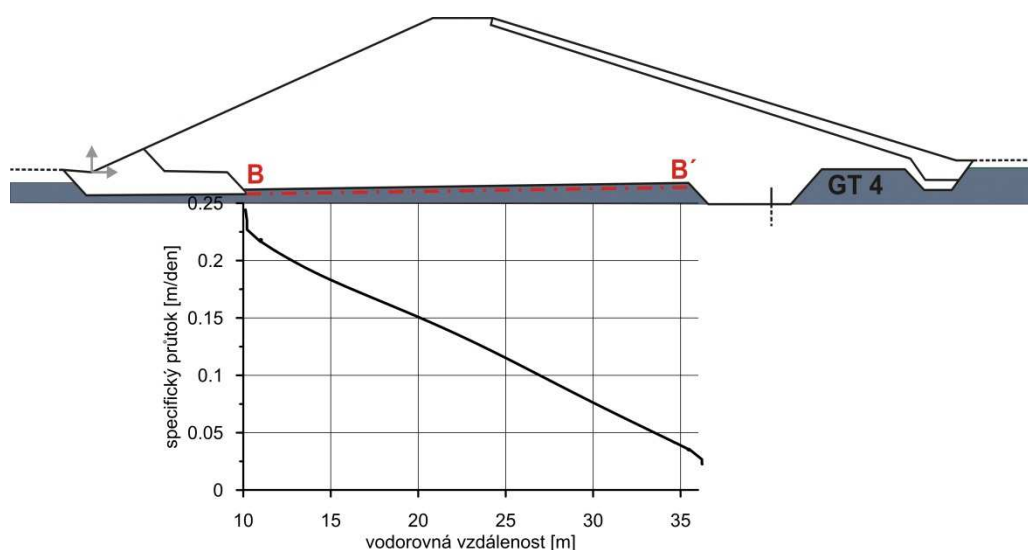
Obr. 15c Izolinie piezometrických výšek, ZS 5 – časově proměnné proudění, neregulovaný pokles



Obr. 15d Izolinie piezometrických výšek, ZS 6 – časově proměnné proudění, regulovaný pokles

Charakter průsaku tělesem SN je významně ovlivněn vrstvou zajiřovaného písčitého šterku (GT 4). Vzhledem k vyšší propustnosti ve srovnání s materiálem tělesa SN a podložní vrstvou GT 6 má tato vrstva drenážní charakter. Snížení koeficientu propustnosti vede k prodloužení dráhy průsaku směrem ke vzdušnému líci, co má negativní dopad na vnější stabilitu vzdušné části. Dle křivky zrnitosti vzorku č. 23512 (J 6) je navíc tento typ zeminy ohrožen vnitřní sufozí. Dle [11] jsou vnitřní erozí ohroženy zeminy s číslem nestejnosrnosti $C_u > 20$. Dle křivky zrnitosti je pro GT 4 $C_u > 90$.

Maximální specifický průtok q_{max} vrstvou GT 4 je pro ZS 4 dle obr. 12 $0,25 \text{ m/den}$ ($2,89 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$).



Obr. 16 Specifický průtok vrstvou GT 4, ZS 4

Dle [12] je možné kritický specifický průtok q_k spočítat podle vztahu (3), kde k je součinitel hydraulické vodivosti. Maximální specifický průtok q_{max} nedosahuje kritické hodnoty q_k .

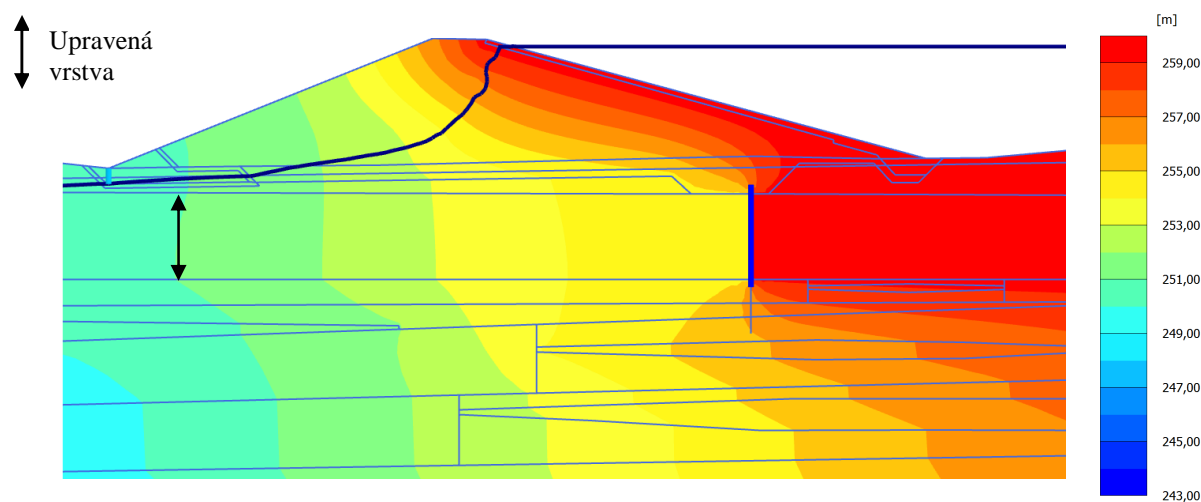
$$q_k = \frac{k^{0,356}}{200} = 6,92 \cdot 10^{-5} > 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (3)$$

Vzhledem k různorodosti kritérií pro posouzení filtrační stability (vnitřní sufoze) bylo přistoupeno k sekundárnímu posouzení s využitím kritických hydraulických gradientů. *DenAdel et al.* [13] zjistili hodnotu kritického hydraulického gradientu pro ustálené horizontální proudění $i_k=0,16$ až $0,17$. Průměrný hydraulický gradient ve vrstvě GT4, v analyzovaném řezu B-B' pro ZS 4 (ustálené proudění) je $i=0,25$. Dle tohoto kritéria je predikovaný hydraulický gradient vyšší než kritický. Komentář k dosaženým výsledkům je uveden v závěrečné kapitole.

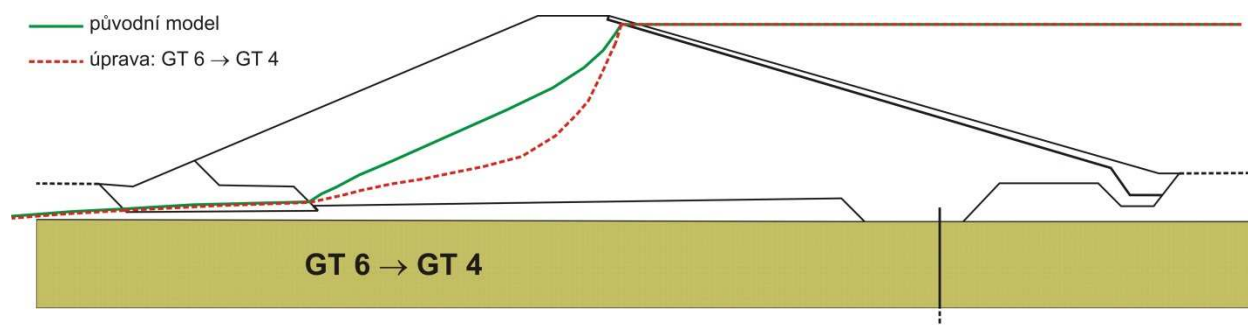
$$i = 0,25 > i_k \rightarrow \text{nevyhovuje} \quad (4)$$

Varianty C:

Na základě požadavku objednatele analýzy byl proveden dodatečný výpočet, ve kterém byla vrstva hlín s vysokou plasticitou (GT 6) nahrazena vrstvou písčitého štěrku uvažován (GT 4) Izolinie piezometrických výšek pro ZS 3 (z hlediska stability a průsaků hrází jde o nejmín příznivý stav) jsou znázorněny na obr. 17. Specifický průtok upravenou vrstvou je vyšší (vyšší hodnota koeficientu hydraulické vodivosti) a podle předpokladu dochází k poklesu čáry průsaku tělesem nádrže. Schematické porovnání obou alternativ je provedeno na obr. 18. Zvýšení mocnosti propustnější zeminy GT4 způsobí pokles specifického průtoku (rychlosti proudění) v této vrstvě (v blízkosti patního drénu). K stanovení konkrétních hodnot specifického průtoku je ale nutné sestavit další inženýrsko-geologický řez v místě s větší mocností vrstvy GT4.

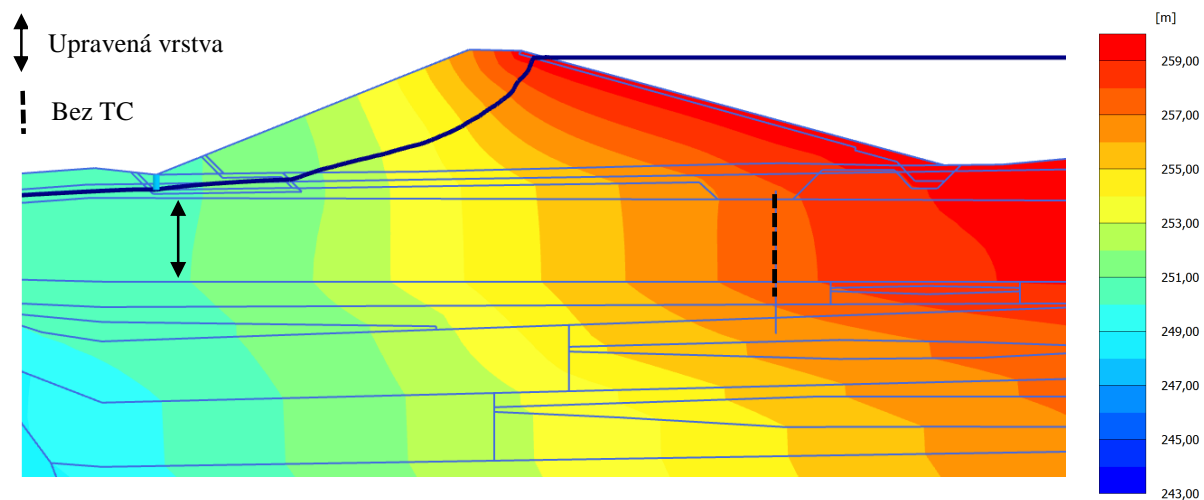


**Obr. 17 Izolinie piezometrických výšek, ZS 3 – ustálené proudění, H=259,5 m n. m.
 úprava: GT 6 → GT 4**

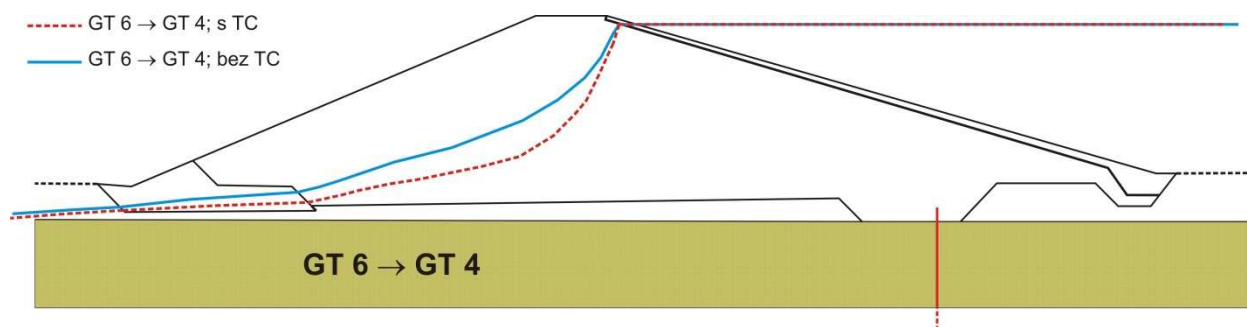


Obr. 18 Srovnání alternativ

Pro ozřejnění funkce těsnící clony byl v rámci *Varianty C* realizován výpočet bez uvažování těsnící clony. Izolinie piezometrických výšek pro ZS 3 jsou znázorněny na obr. 19. Srovnání polohy HPV (čáry průsaku) pro alternativu s a bez těsnící clony je provedeno na obr. 20.



**Obr. 19 Izolinie piezometrických výšek, ZS 3 – ustálené proudění, H=259,5 m n. m.
 úprava: GT 6→GT 4, bez těsnící clony**



Obr. 20 Srovnání alternativ – s a bez těsnící clony

6. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Závěry a doporučení pro jednotlivé oblasti, uvedené dále v této kapitole, vychází z předaných podkladů a z konzultací se zástupcem objednatele (Mgr. L. Hubinger) a zástupcem firmy HG Partner s.r.o. (Ing. B. Procházka), které byly zpracovatelům k dispozici v době zpracování matematického modelu.

Stabilita suché hráze

- Výstavba SN (ZS 1), ukončení konsolidace (ZS 2)
 - Stupeň stability pro ZS 2 je vyšší z důvodu disipace zvýšených pórových tlaků vzniklých v průběhu simulované výstavby v málo propustných zeminách (např. GT 6). Vznik pórových tlaků v důsledku neodvodněného zatěžování snižuje velikost efektivního středního napětí.
 - Smyková plocha je lokalizována na strmější - vzdušné straně tělesa SN.
- Časově ustálené režimy proudění (ZS 3, ZS 4)
 - V obou případech je stupeň stability nižší než v ZS 2. To je způsobeno nárůstem pórových tlaků v tělese SN. Při vyšší hladině vody v SN (ZS 4) je analogicky stupeň stability nižší.
 - Smyková plocha je opět lokalizována na strmější – vzdušné straně tělesa SN.
- Časově proměnné režimy proudění (ZS 5, ZS 6)
 - Při obou poklesech hladin zůstává smyková plocha na vzdušní straně tělesa SN (z důvodu malého sklonu návodního líce). Nejnepříznivější stav je tedy při začátku poklesu hladiny, kdy je HPV v tělese SN nejvyšš.

Pozn: Dosažené stupně stability jsou vztaženy ke koeficientům hydraulické vodivosti dle Tab. 1.

Deformační odezva suché hráze pro různé zatěžovací stavy

- Rychlost konsolidace podloží příznivě ovlivňují propustnější vrstvy GT 4 a GT 6b - větší část svislé deformace vzniká v průběhu výstavby z délkou trvání 1 rok za předpokladu platnosti koeficientů hydraulické vodivosti v Tab. 1. Při jejich snížení dojde ke snížení velikost sednutí hráze po její výstavbě a tedy k zvýšení přírůstku sedání do ukončení konsolidace podloží. Maximální vypočtená deformace v bázi hráze, *Varianta A* (koef. hydraulické vodivosti dle Tab. 1) je po ukončení výstavby – 0,56m (za 1 rok); po ukončení primární konsolidace – 0,64m (3,2 let). Za předpokladu snížené hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti u GT6, GT 6a a GT7 je po ukončení výstavby sedání - 0,46m (1 rok); po ukončení primární konsolidace – 0,68m (17let).
- Z výsledků sedání plyne, že objekty budované současně se sypáním hráze, budou vykazovat stejné hodnoty. Proto je nutné navrhnout opatření, aby byla zajištěna jejich funkčnost. V projektu se uvažuje s nadvýšením a osazením flexibilních rour, které se později vyvložkují navrženým profilem.

Sedání bezpečnostního přelivu

- Analýza sedání bezpečnostního přelivu potvrzuje záměr projektanta hráze, tj. výstavba hráze, následné odtěžení části hráze a vybudování přelivu. Sedání objektu je jednak menší a rovnoměrnější než při budování přelivu spolu s hrází. Velikost a rovnoměrnost sedání přelivu je však v relaci s koeficientem hydraulické vodivosti. Při „k“ dle tabulky 1 je sedání v přijatelných mezích. Při snížení „k“ je sedání nerovnoměrnější a vyšší. Zlepšení situace napomůže provedení časové prodlevy mezi ukončení výstavby hráze a provedením přelivu.

Proudění v tělese hráze a v podloží

- Charakter průsaku tělesem SN je významně ovlivněn vrstvou zajiřovaného písčitého štěrku (GT 4). Vzhledem na vyšší propustnost ve srovnání s materiálem tělesa SN a podložní vrstvou GT 6 má tato vrstva drenážní charakter. Snížení koeficientu propustnosti vede k prodloužení dráhy průsaku směrem ke vzdušnému líci, co má negativní dopad na vnější stabilitu vzdušné části.
- Dle předpokladů je míra zpoždění poklesu pórových tlaků v tělese SN v průběhu snižování hladiny vyšší pro neregulovaný pokles (vyšší rychlost prázdnění), co potvrzuje korektnost vytvořeného matematického modelu.
- Dle geometrických kritérií (křivka zrnitosti) je vrstva GT 4 náchylná k vnitřní sufozi. Pro další posouzení byly aplikovány dvě hydraulické kritéria: a) stanovení kritického specifického průtoku [12] a b) stanovení kritického hydraulického gradientu [13]. Podle prvního kritéria zemina vyhovuje, podle druhého nevyhovuje. Zde je však nutné poznamenat, že kritický hydraulický gradient byl stanoven za předpokladu ustáleného proudění. V případě SN je toto diskutabilní předpoklad.

Závěrečný komentář

- Těsnící clona - v provedených analýzách byla, na základě zaslané výkresové dokumentace, uvažovaná délka clony 6 m. V zadaném inženýrskogeologickém řezu těsnící clona prochází vrstvou málo propustné zeminy GT6. Její vliv na průsakové poměry je tedy v analyzovaném řezu omezený. Zpracovatelům zprávy byl k dispozici geologický model v nejvyšším místě hráze. Vzhledem k složitosti základových poměrů a proměnlivé mocnosti vrstvy málo propustné zeminy GT6 po délce hráze bylo přistoupeno k řešení alternativní varianty (záměna GT6 za GT4), aby bylo možné získat rámcovou představu o chování hráze v jiných částech (s většími mocnostmi propustné vrstvy GT4 pod hrází). Z provedené analýzy vyplývá, že těsnící clonu má význam v případě výskytu větší mocnosti propustnější vrstvy. V našem alternativním řešení *Varianta A* byla vzata dle projektu, 6 m. Při větší mocnosti propustnější bude délka clony větší. Vše je však odvislé od celé geologické skladby. Na závěr je nutné poznamenat, že funkce těsnící clony byla analyzována za předpokladu ustáleného proudění tělesem hráze.
- Stabilitní analýzy byly provedeny za předpokladu výstavby v jednom kroku s dobou trvání 1 rok. Jde o významné zjednodušení. Při posuzování stability hráze (*Varianta A* - za koeficientů hydraulické vodivosti dle Tab. 1), však nebylo dosaženo stupně

stability menší než 1,5. Důvodem je ta skutečnost, že při takto definovaných hodnotách „k“ dojde k disipaci zvýšených pórových tlaků rychle. Při snížení hodnoty „k“ je disipace zvýšených pórových tlaků pomalejší a to znamená, že v podloží hráze zůstávají vyšší pórové tlaky než u předchozího případu. To se samozřejmě negativně podílí na velikosti stupně stability. V tomto případě je vhodné sypat hráz s časovými prodlevami. Jak mají být dlouhé je otázka spojená právě s hodnotou parametru „k“. Početně jde samozřejmě provést parametrickou studii. Její výsledek je však zřejmý. Čím nižší hodnota parametru „k“, tím delší časová prodleva. Proto doporučujeme, vzhledem ke složitým geologickým podmínkám, buď zjistit exaktně hodnotu koeficientu hydraulické vodivosti minimálně u geotypu GT6 a/nebo sledovat změny velikosti pórových tlaků během výstavby hráze prostřednictvím piezometrů osazených do podloží hráze a postup provádění (sypání) hráze upravovat dle pozorované disipace pórových tlaků.

- Ve zprávě není, v rámci přijatých zjednodušení při tvorbě modelu, analyzovaná možnost hydraulického prolomení málo propustné vrstvy GT 3. V tomto ohledu je ale z obr. 15 patrný příznivý vliv patního drénu v podobě snížení piezometrické výšky. Autoři zprávy rovněž upozorňují, že provedenými průzkumnými pracemi byl zastižen tlakový režim podzemní vody. Proto doporučujeme projednat tuto skutečnost s odborníkem přes vodní stavby z firmy HG Partner s.r.o., jaký je význam napjaté hladiny podzemní vody na suchou nádrž.
- Kombinace stabilitní – deformační – průsakové úlohy je komplexní úkol. Všechny výsledky uvedené v této zprávě proto platí pouze za předpokladu platnosti prezentovaných vstupních parametrů a okrajových podmínek. Autoři zprávy si vymezují právo na úpravu výpočtů v případě změny/získání nových vstupů.

V Brně, říjen 2016

Lumír Miča
Juraj Chalmovský