

## ZAJIŠTĚNÍ STABILITY NÁVODNÍHO SVAHU HRÁZE RYBNÍKU JORDÁN V TÁBOŘE

### STABILITY ENSURING OF UPSTREAM SLOPE OF BARRIER BODY OF POND JORDÁN IN TÁBOR

*Petr Smrž*

#### **Abstrakt:**

Příspěvek popisuje důvody přešetření stability návodního svahu rybníka Jordán během probíhající obnovy tohoto historického vodního díla. Jsou popsány výpočetní postupy, jednotlivé zatěžovací stavy a výsledky přešetření stability. Samostatnou kapitolou jsou navržena nápravná opatření, jejich realizace a výsledky technickobezpečnostního dohledu během provádění stavebních prací.

#### **Abstract:**

The text describes reasons of stability investigation of an upstream slope of the barrier body of Pond Jordán during performed restoration of the historical water work. There are described methods of calculation, individual states of loading and results of stability investigation. Remedial measures, their performing and results of technical and safety supervision during reconstruction are an individual chapter.

**Klíčová slova:** povodeň, rybník, stabilita, nápravná opatření.

## 1. ÚVOD

Historické vodní dílo Jordán prochází od roku 2012 rozsáhlou rekonstrukcí (odbahnění zátopy a vybudování spodní výpusti). V červnu 2013 zasáhla VD Jordán povodňová vlna, která způsobila rychlé napuštění nádrže. Následně došlo k neřízenému vypuštění nádrže přes nově vyraženou štolu spodních výpustí. Pokles hladiny v nádrži nebylo možné regulovat, protože ještě nebyl dokončen výpustný objekt a osazeny uzávěry na spodních výpustech. Náhlý pokles hladiny způsobil poměrně rozsáhlé sesuvy návodního svahu tělesa hráze, které byly nejvíce patrné nad původními výpustními objekty. Sesuvy byly také zaznamenány na březích nádrže VD Jordán.

Vzhledem k těmto skutečnostem bylo rozhodnuto staticky přešetřit stabilitu návodního svahu tělesa hráze VD Jordán dle normových zatížení uvedených v ČSN 75 2310 „Sypané hráze“. Zpracování stabilního posudku bylo v srpnu 2013 realizováno organizací pověřenou výkonem technickobezpečnostního dohledu (dále TBD) VODNÍ DÍLA - TBD a.s. Součástí tohoto posudku je také vyhodnocení vlivu poklesů hladin v nádrži na globální stabilitu návodního svahu VD Jordán.

Pro zjištění geotechnických parametrů tělesa hráze a podloží byly v červenci 2013 provedeny na návodním svahu tělesa hráze dva vrty. Z těchto vrtů byly odebrány vzorky zemin pro laboratorní zkoušky.

Výpočty proudění podzemní vody metodou konečných prvků a výpočty stability metodami mezní rovnováhy byly provedeny v programu GeoStudio 2012 (moduly SEEP/W a SLOPE/W). Software GeoStudio je produkován kanadskou společností GEO – SLOPE INT.

## 2. VSTUPNÍ PŘEDPOKLADY ŘEŠENÍ

### 2.1. Vybrané technické údaje

Kategorie VD podle TBD		III
Typ hráze	zonální hráz sypaná a zahliněných písků	především z jílovitých
Mezní bezpečná hladina		427,76 m n.m.
Šířka hráze v koruně		9,7 m
Délka hráze v koruně včetně bezpečnostního přelivu		283 m
Maximální výška hráze nad terénem		20 m
Sklony svahů hráze: - návodní		1 : 1,2 až 1 : 1,85
- vzdušný		1 : 1,25 až 1 : 2,05

Výpočet stability byl prošetřen pro dva příčné profily (PF1 a PF2) vedených v místech vrtů vyhotovených pro ověření geotechnických parametrů tělesa hráze a podloží.

### 2.2. Geotechnické parametry

Protože byla modelována jak nasycená, tak nenasycená zóna neustáleného proudění průsakové vody hrázovým tělesem, bylo nutno v modulu SEEP/W zadat hydraulickou vodivost pro plně nasycený stav zeminy, funkci hydraulické vodivosti na tlakové výšce a retenční křivku pro všechny jednotlivé materiály použité v modelu. Parametry smykové pevnosti zemín vstupující do výpočtu, objemové hmotnosti a hydraulická vodivost nasycené zeminy jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab. 1** Vybrané parametry zemín použité ve výpočtu pro profily PF1 a PF2

Část hráze	Materiál	Efektivní (totální) parametry smykové pevnosti	Hydraulická vodivost nasycené zeminy
Koruna hráze	Štěrk, vozovka	$\varphi_{ef} = 35^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 0 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 22 \text{ kN.m}^{-3}$	
Těleso hráze 1	Hlinitý písek S4 (SM)	$\varphi_{ef} = 28^\circ$	$k_{sat} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 5 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 18 \text{ kN.m}^{-3}$	
Těleso hráze 2	Jílovitý písek S5 (SC)	$\varphi_{ef} = 29^\circ$	$k_{sat} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 10 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 21,5 \text{ kN.m}^{-3}$	
Těleso hráze 3	Písčitý jíl F4 (CS)	$\varphi_{ef} = 27^\circ$	$k_{sat} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 9 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 20,5 \text{ kN.m}^{-3}$	

Těleso hráze 4	Písčitý jíł F4 (CS)	$\varphi_{ef} = 27^\circ$	$k_{sat} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 9 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 20,5 \text{ kN.m}^{-3}$	
Těleso hráze 5	Hlinitý písek S4 (SM)	$\varphi_{ef} = 28^\circ$	$k_{sat} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 5 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 18 \text{ kN.m}^{-3}$	
Podloží 1	Písčitý jíł F4 (CS)	$\varphi_{ef} = 26^\circ$	$k_{sat} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 10 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 19 \text{ kN.m}^{-3}$	
Podloží 2	Jílovitý písek S5 (SC)	$\varphi_{ef} = 17^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 8 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 16 \text{ kN.m}^{-3}$	
Podloží 3	Syenit	-	-
		-	
		$\gamma_n = 23,0 \text{ kN.m}^{-3}$	
Podloží 4	Jíł F8 (CH)	$\varphi_{ef} = 17^\circ$	$k_{sat} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 8 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 20,5 \text{ kN.m}^{-3}$	
Vzdušní přísyp	SW	$\varphi_{ef} = 28^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 0 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 18,0 \text{ kN.m}^{-3}$	
Železobetonové konstrukce	Železobeton	-	-
		$c_{ef} = 500 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 24 \text{ kN.m}^{-3}$	
Kamenný obklad	Kamen do betonu	-	-
		$c_{ef} = 300 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 23 \text{ kN.m}^{-3}$	
Sediment	Sediment	$\varphi_{ef} = 13^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$
		$c_{ef} = 0 \text{ kPa}$	
		$\gamma_n = 18,0 \text{ kN.m}^{-3}$	

Vysvětlivky:

$\varphi_{ef}$  je efektivní úhel vnitřního tření zeminy ve stupních,  $c_{ef}$  je efektivní koheze (soudržnost) v kPa,  $\gamma_n$  je objemová tíha zeminy v přirozeném stavu v  $\text{kN/m}^3$  nad hladinou podzemní vody (HPV).

### 2.3. Zatěžovací stavy

Výpočty ustáleného a neustáleného proudění podzemní vody hrázi a navazující výpočty stability návodní části tělesa hráze byly provedeny pro zatěžovací stavy dle ČSN 75 2310 Sypané hráze. Součástí posudku bylo rovněž stanovení globální stability návodního svahu při poklesech hladiny vody v nádrži.

Uvažovány byly následující zatěžovací stavy:

- 1) Nádrž prázdná.
- 2) Nádrž částečně naplněná – hladina v nádrži na kótě 424,15 m n. m. Tato úroveň odpovídá normální hladině uvedené v platném Manipulačním řádu.
- 3) Nádrž plná – hladina v nádrži na úrovni kontrolní maximální hladiny (KMH) 426,34 m n. m – hladina při převádění kontrolní povodňové vlny s dobou opakování  $N=1000$  let.

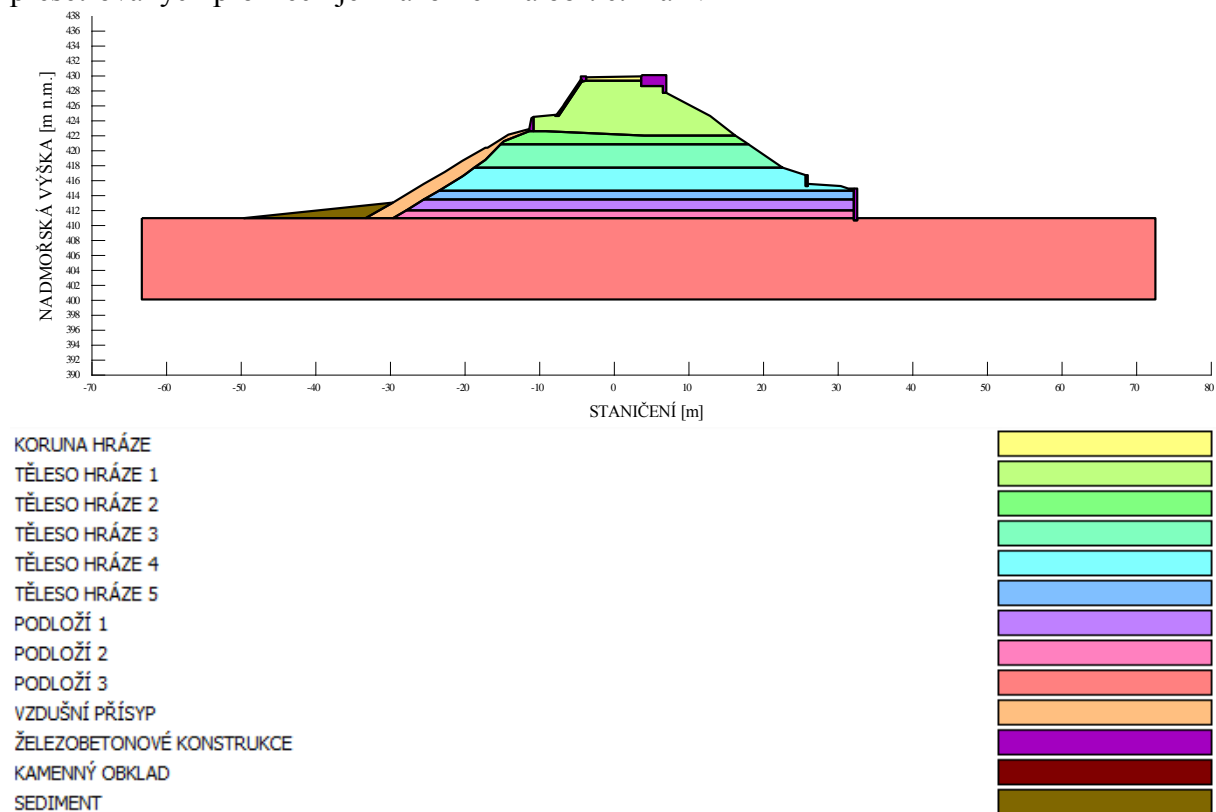
- 4) Náhlý pokles hladiny v nádrži – z úrovně normální hladiny 424,15 m n. m. na hladinu kritickou s limitem poklesu  $0,5 \text{ m.den}^{-1}$ .
- 5) Náhlý pokles hladiny v nádrži – plnou kapacitou bezpečnostního přelivu a spodních výpustí z úrovně kontrolní maximální hladiny 426,34 m n.m. (KMH) na hladinu kritickou.

### 3. VÝPOČET PROUDĚNÍ VODY TĚLESEM HRÁZE

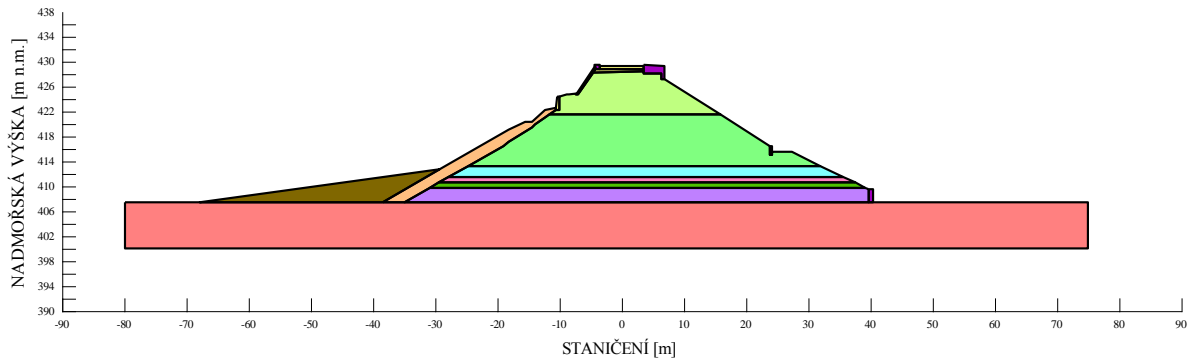
Jako podklad pro posouzení stability vzdušní a návodní části hráze při výše uvedených zatěžovacích stavech byly provedeny výpočty pro ustálené a neustálené proudění průsakové vody tělesem hráze.

V rámci nezbytného zjednodušení a nutné schematizace byl model tělesa hráze proveden jako dvourozměrný (2D) ve vertikální rovině.

Geometrický model tělesa hráze se zobrazením jednotlivých oblastí materiálů ve dvou přeštetřovaných profilech je znázorněn na obr. č. 1 a 2.



**Obr. 1** Materiály tělesa hráze a podloží použité v modelu – PF1



KORUNA HRÁZE	
TĚLESO HRÁZE 1	
TĚLESO HRÁZE 2	
TĚLESO HRÁZE 3	
TĚLESO HRÁZE 4	
TĚLESO HRÁZE 5	
PODLOŽÍ 1	
PODLOŽÍ 2	
PODLOŽÍ 3	
PODLOŽÍ 4	
VZDUŠNÍ PŘÍSYP	
ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE	
KAMENNÝ OBKLAD	
SEDIMENT	

**Obr. 2** Materiály tělesa hráze a podloží použité v modelu – PF2

Dalším předpokladem je princip spojitosti v nasycené zóně proudění. Proudění vody v pórech se aproximuje spojitým fiktivním prouděním vody tímto prostředím, bez ohledu na prostorové rozložení pórů v zemině. Tento princip předpokládá, že voda spojitě vyplňuje celou oblast protékanou vodou a realizuje se tzv. průlinová propustnost.

Úloha je pojata deterministicky. Vychází se z předpokladu, že vstupní i hledané veličiny se realizují s pravděpodobností rovnou jedné. Proudění vody v podloží hráze je považováno za izotermické, teplota tedy nemá na řešený děj vliv. Kapalina se považuje za nestlačitelnou, rovněž její hustota je tedy konstantní. Dále se předpokládá, že prostředí, kterým voda prosakuje, se nedeformuje, tedy, že jeho struktura se silovým a chemickým působením vody nemění.

Model proudění podzemní vody SEEP/W je schopen simulovat proudění jak v nasycené, tak v nenasyčené zóně. Je tedy modelováno jak tlakové proudění pod hladinou podzemní vody v nasycené zóně, tak proudění nad hladinou podzemní vody v nenasyčené zóně. Hladina podzemní vody je pak pro každý časový krok nalezena pomocí iteračního algoritmu. Hydraulická vodivost jednotlivých materiálů v modelu byla proto do programu zadávána jako spojitá funkce hydraulické vodivosti v závislosti na tlakové výšce vody. Tyto funkce hydraulické vodivosti pro různé materiály v modelu nejsou v dostupných podkladech explicitně určeny a byly proto v programu GeoStudio 2012 vygenerovány na základě znalosti hodnoty hydraulické vodivosti plně nasycené zeminy a vygenerovaných retenčních křivek jednotlivých materiálů. Retenční křivka udává závislost objemové vlhkosti na tlakové výšce vody. Retenční křivky nejsou v dostupných podkladech rovněž explicitně určeny a byly proto v programu GeoStudio 2012 vygenerovány na základě znalosti křivek zrnitosti.

Neznámou veličinou je piezometrická výška, která je definována jako součet potenciální a tlakové energie vody příslušející jednotce tíhy, tedy součet geodetické a tlakové výšky. V modelu je udávána jako nadmořská výška v m n. m.

Numerické řešení je v programu GeoStudio 2012 provedeno pomocí metody konečných prvků (MKP). MKP je numerická metoda, založená na řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic, popisujících vlastnosti a chování určité fyzikální soustavy. Modelovaný vertikální řez (náhradní oblast) byl rozdělen na konečný počet sousedících geometrických prvků (elementů). Pro tuto úlohu byly vygenerovány trojúhelníkové a čtyřúhelníkové elementy v celkovém počtu 4034 (PF1) a 3858 (PF2). Čtyřúhelníkové elementy v drtivé většině v modelu převažují, trojúhelníkové elementy jsou použity jen minimálně, pro optimalizaci výpočtové sítě v důsledku netriviálního geometrického tvaru regionů.

U zatěžovacích stavů byl výpočet proudění podzemní vody proveden jak ustáleně, tak i neustáleně. Výpočet neustáleného proudění byl realizován v 50 časových krocích, přičemž v každém z nich pak byl proveden výpočet stability, čímž byla nalezena minimální hodnota stupně bezpečnosti dané smykové plochy během poklesu hladiny v nádrži.

#### **4. GLOBÁLNÍ STABILITA**

Standardním způsobem posouzení stability zemní hráze je výpočet globální stability jejího tělesa proti usmyknutí na kinematicky možné smykové ploše pomocí metod mezní rovnováhy. Míra stability svahu, resp. oblasti nad smykovou plochou je vyjádřena stupněm bezpečnosti SB (nebo také stupněm stability podle ČSN 75 2310), který je definován jako poměr sil/momentů, které brání (kladou odpor) proti usmyknutí zemního tělesa a sil/momentů, které se snaží usmyknutí, resp. pootočení vyvolat. Je-li stupeň bezpečnosti vyšší než 1,0 lze zjednodušeně říci, že těleso nad danou zvolenou smykovou plochou je stabilní. V normě je však obvykle vyžadována hodnota vyšší než 1,0, čímž jsou zohledněny nejistoty ve vstupních datech a ve výpočtu a vnášena jistá bezpečnostní rezerva podle daných kritérií.

Modely příčného řezu hráze jsou, jak již bylo zmíněno, po geometrické stránce identické s modelem pro proudění podzemní vody. Pro výpočty globální stability hráze byly v modulu SLOPE/W doplněny údaje o objemových hmotnostech jednotlivých materiálů a rovněž jejich efektivní parametry smykové pevnosti (úhel vnitřního tření a koheze).

Výpočet stability byl proveden pomocí několika různých metod. Smykové plochy byly voleny jak kruhové, tak polygonální, a také složené, jako kombinace těchto typů ploch. Pro určení SB byla použita metoda Morgenster-price, která zohledňuje jak momentovou tak silovou výminku a přitom také spolupůsobení jednotlivých proužků zeminy mezi sebou. Pokročilý optimalizační algoritmus obsažený v modulu je dále schopen při variacích až 2000 smykových ploch najít smykovou plochu s minimálním stupněm bezpečnosti.

#### **5. VÝSLEDKY**

V rámci posouzení stability návodního svahu byly oba posuzované profily tělesa hráze posouzeny na všech pět zatěžovacích stavů uvedených v kapitole 2.3. Výsledky posouzení jsou patrné z následující tabulky č. 2 a 3.

**Tab. 2** Výsledky výpočtů stability v PF1

Zatěžovací stav	Stupeň bezpečnosti (SB)	Poznámka	Požadavek ČSN 75 2310 na SB
1)	1,12		1,5
2)	1,26		1,5
3)	1,38		1,5
4)	1,26 0,94	počáteční hladina 424,15 m n. m. kritická hladina 414,95 m n. m.	1,5
5)	1,38 0,85	počáteční hladina 426,34 m n. m. kritická hladina 409,23 m n. m.	1,1

**Tab. 3** Výsledky výpočtů stability v PF2

Zatěžovací stav	Stupeň bezpečnosti (SB)	Poznámka	Požadavek ČSN 75 2310 na SB
1)	1,18		1,5
2)	1,35		1,5
3)	1,53		1,5
4)	1,35 1,00	počáteční hladina 424,15 m n. m. kritická hladina 415,05 m n. m.	1,5
5)	1,53 0,91	počáteční hladina 426,34 m n. m. kritická hladina 409,20 m n. m.	1,1

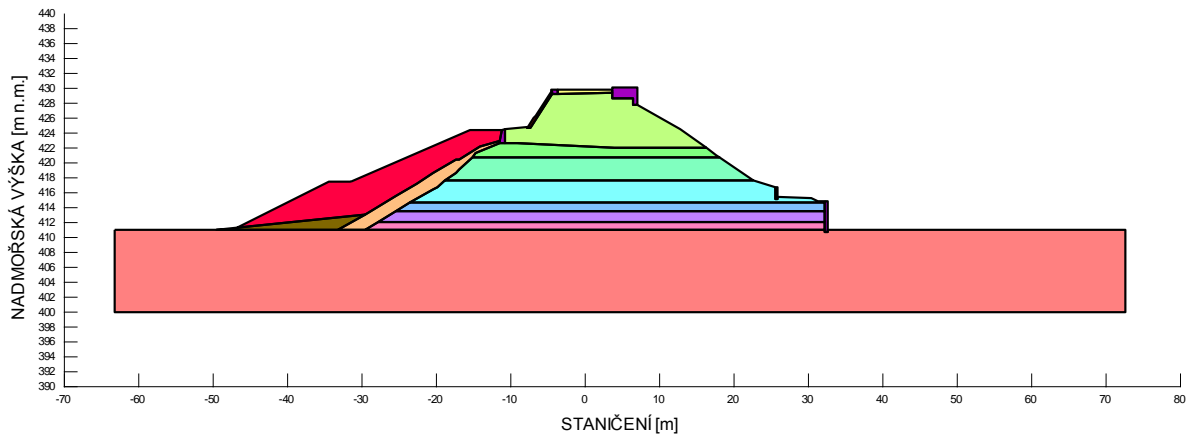
Posouzení stability návodního svahu hráze VD Jordán potvrdilo předpoklad, že při normových zatíženích nejsou téměř ve všech případech splněny požadavky dané ČSN 75 2310.

## 6. NÁPRAVNÁ OPATŘENÍ

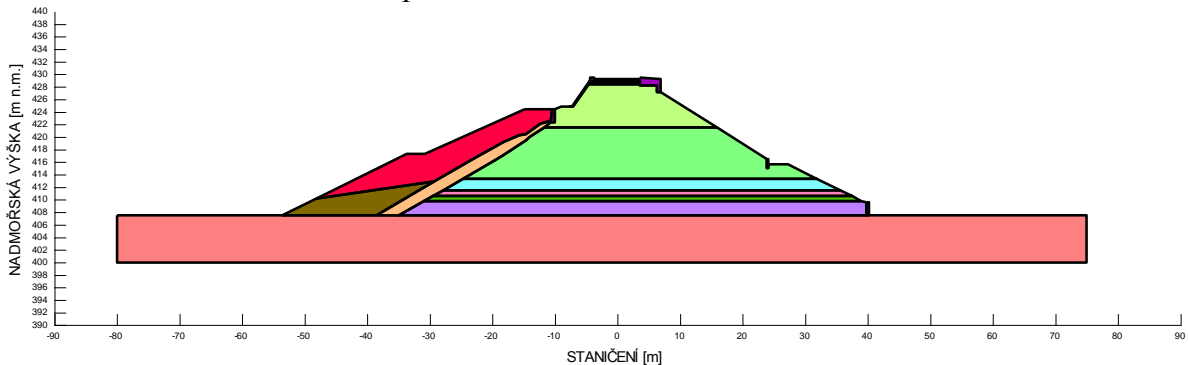
Zvýšení stupně stability svahu bylo možné dosáhnout jeho přitížením vhodnou hutněnou sypaninou. V rámci posudku byla ideově navržena přitěžovací lavice návodního svahu hráze z lomového kamene prosypaného štěrkem. Návrhové geotechnické parametry přísypu jsou uvedeny v následující tabulce č. 4, tvar navržené lavice v obou přešetřovaných profilech je patrný z obr. č. 3 a 4.

**Tab. 4** Geotechnické parametry přísypu

Materiál	Parametry	Maximální odchylka
Kamenná sypanina	$\varphi_{ef} = 40^\circ$	$2^\circ$
	$c_{ef} = 0 \text{ kPa}$	–
	$\gamma_n = 20,0 \text{ kN.m}^{-3}$	$0,5 \text{ kN.m}^{-3}$
	$k_{sat} = \min 0,001 \text{ m.s}^{-1}$	–



**Obr. 3** PF1 – navrhovaná štěrková přitěžovací lavice.



**Obr. 4** PF2 – navrhovaná štěrková přitěžovací lavice.

Oba profily byly znovu posouzeny na všechny uvažované zatěžovací stavy. Nejnepříznivější výsledky byly zjištěny v profilu 2 při zatěžovacím stavu 4) pokles hladiny vody v nádrži z normální hladiny na hladinu kritickou, který má minimální stupeň stability 1,52. Návodní svah VD Jordán po realizaci přitěžovací lavice tak splňuje normová kritéria.

## 7. REALIZACE NÁPRAVNÝCH OPATŘENÍ, TBD

Přitěžovací lavice byla realizována v období od října 2013 do května 2014. Stavební práce byly rozděleny na dvě etapy - spodní část kamenného stabilizačního přísypu zakončená lavicí šířky 2,9 m na kótě 417,30 m n.m. a horní část přísypu, který je zakončen na kótě 422,70 až 422,90 m n.m.

Pro sledování poklesů kamenného materiálu přísypávky bylo na lavice nainstalováno šest kontrolních výškových bodů (hřebová značka v pažnici zalitá betonovou směsí).

Základní měření na těchto bodech proběhlo dne 18.12.2013. V období od 30.12.2013 do 30.4.2014 bylo provedeno celkem devět etap geodetických měření, s periodou opakování 1× za 14 dnů až za měsíc.

Celkové posuny zhruba čtyři měsíce po nasypání dolní části stabilizace se pohybují v intervalu -16,3 až -48,8 mm. Vzhledem ke konstrukci stabilizačního přísypu a obtížným základovým poměrům v zátopě rybníku jsou naměřené svislé posuny z hlediska TBD hodnoceny jako příznivé. Je pravděpodobné, že i v dalším období budou na kontrolních bodech dále měřeny mezietaповé přírůstky posunů kontrolních bodů v řádu jednotek až desítek milimetrů.





**Obr. 5** Realizace přispávky návodního svahu

## 8. ZÁVĚR

Při povodňové situaci (červen 2013) došlo k sesuvu návodního svahu prakticky v celé délce hráze VD Jordán. Závažnost sesuvu potvrdilo i geodetické měření, které provádí společnost VODNÍ DÍLA – TBD a.s. v rámci technickobezpečnostního dohledu během rekonstrukce VD. Poklesy geodetických bodů časově korespondovaly s nastalou povodňovou situací. Výše uvedené skutečnosti byly verifikovány i provedenou matematickou simulací stupně bezpečnosti (stability) v závislosti na rychlosti poklesu hladiny v nádrži.

Posudek stability hráze potvrdil předpoklad, že stupeň stability návodního svahu nesplňuje kritéria daná ČSN 75 2310. Z tohoto důvodu byla navržena a realizována přitěžovací lavice tak, aby návodní svah splňoval normové požadavky a bylo možné manipulovat s hladinou s předpokládanou maximální rychlostí poklesu  $0,5 \text{ m.den}^{-1}$ .

## AUTOR

Ing. Petr Smrž

VODNÍ DÍLA – TBD a. s., Hybernská 1617/40, 110 00 Praha 1

e-mail: [smrz@vdtbd.cz](mailto:smrz@vdtbd.cz)