

VD LUDKOVICE

Posudek bezpečnosti VD za povodní I. revize



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

Telefon 221 408 111* Fax 224 212 803 www.vdtbd.cz
Pracoviště Studená 2, 638 00 Brno (útvár 403 - vodní díla na Moravě a Slezsku)
Telefon 544 525 120* Fax 544 525 121

Ředitel	Ing. Miloš Sedláček
Vedoucí útvaru 403	Ing. Jiří Hodák, Ph.D.
Vedoucí projektu	Ing. Stanislav Žatecký
Vypracoval	Ing. Stanislav Žatecký, Ing. Tomáš Kantor
Spolupráce	Ing. Ondřej Černý, Lucie Štěpánová

VD LUDKOVICE

POSUDEK BEZPEČNOSTI VD ZA POVODNÍ - I. REVIZE

Objednatel	Povodí Moravy, státní podnik
Číslo projektu	P1514/11
Archivní číslo	2279/403
Vypracováno	V Brně, prosinec 2011

OBSAH

1	ÚVODNÍ ČÁST	5
2	ÚČEL A POPIS VD	6
2.1	Umístění	6
2.2	Účel	6
2.3	Rozdělení prostoru nádrže	6
2.4	Základní údaje	6
2.5	Geologické poměry	8
2.6	Průtoky v toku pod nádrží	8
2.7	Stupně povodňové aktivity za hydrologických povodní	8
2.8	Stupně povodňové aktivity za zvláštních povodní	9
3	ZÁKLADNÍ ÚDAJE A PODKLADY	10
3.1	Požadovaná míra bezpečnosti VD za povodní	10
3.2	Hydrologické a klimatologické podklady	10
3.2.1	Základní údaje	10
3.2.2	M-denní průtoky	10
3.2.3	N-leté průtoky a objemy k nim příslušných PV	10
3.2.4	Průběh teoretické návrhové povodňové vlny (NPV _{1 000})	11
3.2.5	Větrná růžice	11
3.3	Technické parametry a podklady	12
3.3.1	Geodetické podklady	12
3.3.2	Geotechnické podklady	12
3.4	Okolnosti ovlivňující bezpečnost VD za povodní	12
4	STANOVENÍ MEZNÍ BEZPEČNÉ HLADINY	14
4.1	Stanovení mezní bezpečné hladiny bez zahrnutí větrové vlny /MBH/	14
4.2	Stanovení výběhu větrové vlny /hv/	14
4.3	Globální stabilita hráza při MBH	15
4.3.1	Úvod	15
4.3.2	Výpočet proudění podzemní vody	15
4.3.3	Stabilita vzdušního líce	17
4.3.4	Parametry materiálů ve výpočtu	17
4.3.5	Výpočtové stavy	19
4.3.6	Výsledky	19
4.3.7	Závěr	19
5	STANOVENÍ KONTROLNÍ MAXIMÁLNÍ HLADINY V NÁDRŽI	21
5.1	Hydraulické výpočty	21
5.1.1	Měrná křivka bezpečnostního přelivu – dokonalý přepad	21
5.1.2	Měrná křivka spodních výpustí	22

5.1.3	Kapacita výpustné chodby.....	22
5.1.4	Souhrnná měrná křivka převedení povodní.....	22
5.2	Podmínky a předpoklady řešení transformace.....	22
5.2.1	Varianta „1“ – neovladatelný odtok a 2x spodní výpust	22
5.2.2	Varianta „2“ - neovladatelný odtok a 1x spodní výpust.....	23
5.2.3	Varianta „3“ – neovladatelný odtok	23
5.3	Výsledky řešení transformace.....	23
5.3.1	PV 1000.....	23
5.3.2	PV 500.....	23
5.3.3	PV 200.....	23
5.3.4	PV 100.....	24
6	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ	24
7	NÁPRAVNÁ A NOUZOVÁ OPATŘENÍ, NÁMĚTY NA ZLEPŠENÍ	25
8	POUŽITÉ PODKLADY	26
9	SEZNAM PŘÍLOH	27

1 ÚVODNÍ ČÁST

Předkládaný posudek je vyhotoven souladu se smlouvou o dílo (č. objednatele PM029355/2011-405; č. zhotovitele A978/11). Je zpracován (smluvní požadavek) jednak dle oborové normy TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních (08/2003) a současně také dle vyhlášky Ministerstva zemědělství o technických požadavcích pro vodní díla č. 590/2002 Sb. (12/2002) novelizovaná vyhláškou č. 367/2005 Sb. (09/2005).

Předmětem je na podkladě základních kritérií prověřit bezpečnost díla za povodní na základě aktuálních hydrologických podkladů s předpokladem, že v případě nedostatečné zabezpečení bude proveden rozbor s návrhem nápravných a nouzových opatření.

Hlavními podklady předkládaného posudku byl jednak platný (1.3.2010) Manipulační řád VD Ludkovice [1] a zejména pravděpodobné schematizované průběhy N-letých povodňových vln na Ludkovickém potoce v profilu Ludkovice pro $N = 1$ až 1 000 údaje ČHMÚ [3].

V roce 1982 byl vypracován posudek „Hydraulická zabezpečení“ s výsledkem, že **přehrada je z hlediska kapacity objektu na převedení povodní přijatelně zabezpečena** [5]. Další „Posudek bezpečnosti za povodní“ provedený v roce 1997 s výsledkem, že **provozní spolehlivost a míra ochrany VD za povodní je přijatelně zabezpečena** [6].

Veškeré výškové údaje uváděné dále v posudku a v přílohách jsou ve výškovém systému **Balt po vyrovnání**

2 ÚČEL A POPIS VD

2.1 Umístění

VD je situováno na toku Ludkovický potok v ř. km 6,250. Leží na katastru obce Ludkovice, ve Zlínském kraji. Přehledné situace jsou uvedeny na přílohách č. 1.1. (1 : 25 000) a č. 12 (1 : 5 000).

2.2 Účel

Účely vodního díla jsou uvedeny v pořadí dle důležitosti dle [1]:

- Akumulace pro dodávku surové vody do úpravny Ludkovice
- Ochrana před velkými vodami na toku Ludkovický potok s částečnou ochranou pozemků pod přehradou
- Akumulace k nalepšení průtoků pro:
 - zajištění trvalého minimálního průtoků pod přehradou ($MQ = 0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),

2.3 Rozdělení prostoru nádrže

Následující členění prostorů nádrže bylo převzato z [1]:

Účel prostoru	Hladina min.-max.	Objem Prostoru	Zatopená plocha při max. hladině
	[m n. m.]	[tis.m ³]	[ha]
prostor stálého nadržení	270.35-277.05	85.140	1,8
prostor zásobní	277.05-284.15	498.228	10,8
prostor retenční neovladatelný	284.15-285.05	106.635	15,0
prostor celkový	270.35-285.05	690.003	15,0

2.4 Základní údaje

Umístění jednotlivých objektů je zachyceno v příloze č.1.2. Skladba vlastního tělesa hráze je zachycena v přílohách. č. 1.3 a. 1.4. Následující údaje byly převážně převzaty z [1].

VZDOUVACÍ OBJEKT (HRÁZ)

Přehradní těleso je nasypáno ze zeminy z výkopů objektů s návodním těsněním ze svahových hlín a vzdušní část z lomového kamene. Svahové hlíny jsou kryty kamenným záhozem. Vzdušní líc je ohumusován a oset. Odvodnění hráze je provedeno šikmým plošným drénem při vzdušní patě hráze. Utěsnění podloží hráze je provedeno injekční clonou. Koruna hráze není upravena pro veřejný provoz, zpevnění povrchu vyhovuje pouze občasnému průjezdu vozidel v souvislosti s provozem díla. Na návodní straně koruny hráze je zídka s funkcí vlnolamu (dle MŘ). Sdružený manipulační objekt slučuje základové výpusti, přeliv a odběrné zařízení. Nehrazený kašnový přeliv o vnitřním poloměru 4,4 m, ze kterého voda odtéká skluzem do odtokové štolky o volné hladině.

Pod přelivem je manipulační prostor spodních výpustí, které jsou rovněž zaústěny do odtokové chodby. V odtokové chodbě je na stropě zavěšen vodovodní odběr DN 300. Dvě základové výpusti DN 600 jsou na návodní straně chráněny hrubými česlicemi.

Vypouštění asanačního průtoku je zajištěno odtokovým potrubím DN 200. Pro měření úrovně hladiny v nádrži byl instalován limnigraf, jehož plováková šachtice je umístěna v rohu schodišťové šachty.

Na odtokovou chodbu, která převádí veškerou vodu profilem hráze, navazuje vývar a odpadní koryto.

Výškový systém – Balt po vyrovnání

Nejnižší místo koruny hráze	285,55 m n.m.
Nejvyšší místo koruny hráze	287,12 m n.m.
Výška hráze nade dnem údolí (MŘ)	15,15 m
Koruna vlnolamu	
- na nejnižší místo	286,30 m n.m.
- na nejvyšší místo	288,14 m n.m.
Šířka koruny hráze (MŘ)	4,7 m
Převýšení koruny hráze nad hladinu zásob. prostoru (MŘ)	1,30 m
Délka hráze v koruně (MŘ)	181,16 m
Sklon návodního líce hráze (MŘ)	1:3,3

FUNKČNÍ OBJEKTY

Přeliv je nehrazený kašnového typu (půdorys přelivné hrany je část kružnice o poloměru 4,4 m a střed. úhlu $254^{\circ}42'$) s kruhovým spadištěm rozděleným betonovým stabilizačním prahem, ze kterého odtéká voda do odpadní štoly. Skluz je ukončen noskem, pod kterým vyúsťují spodní výpusti. Pod noskem jsou zaústěna dvě zavzdušňovací potrubí o průměru 500 mm.

Kóta přelivné hrany	284,15 m n.m.
Délka přelivné hrany (vypočtená, ve vrcholu přelivné hrany)	21,33 m
Kapacita přelivu při max. hl. na kótě 285,05 dle výpočtu	42,3 m ³ /s

VÝPUSTI

Dvě shodné samostatné symetricky uspořádané spodní výpusti, na které je napojena odbočkami samostatná výpust pro vypouštění asanačních průtoků. Spodními výpustmi nelze regulovat průtok vody.

Kapacita výpustí průměru DN 600 mm

Při hladině	277,05 m n.m.	2 x 2,212 m ³ /s
Při hladině	284,15 m n.m.	2 x 3,356 m ³ /s
Při max. hladině	285,05 m n.m.	2 x 3,45 m ³ /s

Kapacita asanační výpusti průměr 200 mm

Při hladině	277,05 m n.m.	0,197 m ³ /s
Při hladině	284,15 m n.m.	0,284 m ³ /s

ODBĚRNÉ ZAŘÍZENÍ

Voda pro úpravnu vody se odebírá ve dvou etážích. Odběry jsou umístěny nad vtoky do spodních výpustí a to horní etáž nad levou výpustí na kótě 274,14 m n.m, dolní etáž nad pravou výpustí na kótě 280,00 m n.m. Na obou větvích jsou umístěna šoupátka Js 300. Za šoupátka se obě větve spojují a je zde další regulační šoupátko DN 300. Potrubí pokračuje odpadní chodbou, ve které je zavěšeno pod stropem.

Před vývarem odbočuje vlevo a je vedeno pod zemí po levém břehu do úpravní vody.

ODPADNÍ CHODBA

Je společná pro vodu odtékající přelivem i spodními výpustmi. Chodba je půlkruhovitého profilu dimenzovaná tak, aby veškeré v úvahu přicházející průtoky (předpokládá se přepadové množství odpovídající návrhové n - leté vodě a plně otevřeným spodním výpustem) převedla při volné hladině tj. $42,3 + (2 \times 3,35) = 49,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vývar - je umístěn při vzdušné patě a je dimenzován na průtok 50-leté vody. Je tvořen betonovým dnem, zdmi, nad stálou hladinou vývaru je obložen kamenem. Zdi mají poměrný sklon líc od 1:10 u vyústění štoly až po 1:1 na prahu vývaru.

Celková délka 26,28 m, délka vodorovného dna 9,10 m, šířka ve dně 5,00 m, hloubka 3m (údaje dle MŘ).

2.5 Geologické poměry

Skalní prostor celé nádrže náleží po geologické stránce magurské sérii karpatského flyše. Skalní podloží přehradního profilu tvoří jílovce a pískovce synklinálního pásma senického. Nejsvrchnější vrstvu v údolní nivě tvoří náplavové hlíny o mocnosti 2,5 až 3 m. Pod touto vrstvou jsou černošedé písčité štěrky s proměnlivým stupněm zahlinění. Mocnost štěrku kolísá v rozmezí 1,2 až 2,5 m.

2.6 Průtoky v toku pod nádrží

Minimální hygienický průtok MQ v profilu Ludkovický potok pod přehradou je stanoven v množství $MQ = 5 \text{ l.s}^{-1}$.

Neškodný průtok v toku pod nádrží je $6,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (kapacita neregulované části Ludkovického potoka pod přehradou).

2.7 Stupně povodňové aktivity za hydrologických povodní

I. stupeň PA (stav bdělosti)

a) při odtoku nad $3,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

Vodní stavy se odečítají 2x denně, při rychlém nástupu povodně s větší četností dle pokynů vodohospodářského dispečinku.

II. stupeň PA (pohotovost)

a) při odtoku nad $6,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

Obsluha vodního díla nastupuje nepřetržitou službu od dosažení II. stupně povodňové aktivity. Vodní stavy se odečítají po 6 hodinách nebo v četnosti dle pokynů vodohospodářského dispečinku.

III.stupeň PA (ohrožení):

- a) při dosažení hladiny 284,85 m.n m
- b) při odtoku z nádrže nad $14,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Vodní stavy se odečítají od dosažení přelivu po 1 hodině, nebo s četností dle pokynů dispečinku. V dohodnuté četnosti (min. po 3 hod.) hlásí hrázný stavy vodohosp. dispečinku.

Pokud by v průběhu povodně mohla být dosažena hladina 285,05 m n. m., tak hlásí tuto situaci na adresy (MŘ) jako při II. stupni povodňové aktivity a dále na VODNÍ DÍLA – TBD, a.s., pracoviště Brno. Všechny zjištěné stavy v rámci povinného odečtu hrázný zapisuje do provozního deníku.

2.8 Stupně povodňové aktivity za zvláštních povodní

Údaje o parametrech zvláštních povodní a stupně povodňové aktivity na VD Ludkovice při nebezpečí vzniku zvláštních povodní upravuje samostatný dokument, který byl zpracován v 12/2000 jako dodatek k Programu TBD a v roce 2004 byl zahrnut do revize Programu TBD pro trvalý provoz [7]. V něm je ve členění do tří kapitol proveden výčet a kvantifikace jednotlivých typů zvláštních povodní, přehled rozhodných skutečností pro stanovení vlastních stupňů povodňové aktivity při nebezpečí vzniku těchto povodní a příklady adekvátních nápravných a nouzových opatření při nich.

3 ZÁKLADNÍ ÚDAJE A PODKLADY

3.1 Požadovaná míra bezpečnosti VD za povodní

Vodní dílo Ludkovice je na základě § 61 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách v platném znění a jeho prováděcí vyhlášky č. 471/2001 Sb. v platném znění (příloha č.1 vyhlášky) podle svého významu a stupně ohrožení území pod dílem zařazeno pro potřeby technicko-bezpečnostního dohledu do **III. kategorie**.

Na základě tabulky 1 – „Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni“ uvedené v oddíle 7.1.1. TNV 75 2935 (odvětvová technická norma vodního hospodářství - Posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní z 08/2003) [8] se vodní dílo Ludkovice řadí do skupiny vodních děl „B“ s označením výše škod při jeho porušení jako „VYSOKÉ“. Tato tabulka byla pak přejata jako příloha i do novelizované vyhlášky Ministerstva zemědělství o technických požadavcích pro vodní díla č. 590/2002 Sb. z 12/2002 (novelizovaná vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 367/2005 Sb. z 09/2005) [9]. Při porušení hráze VD Ludkovice z důvodu dlouhodobého přelévání by ke ztrátám na životech v území pod dílem určitě došlo. Z tohoto pohledu je pro **VD Ludkovice stanovena míra zabezpečení N = 1 000 let**.

3.2 Hydrologické a klimatologické podklady

3.2.1 Základní údaje

Následující základní údaje byly převzaty z [1] a z [3].

• název toku, kilometráž v místě hráze	Ludkovický potok, 6,250 km
• číslo hydrologického pořadí	4 - 13 - 01 – 106
• list vodohospodářské mapy ČR (1 : 50 000)	25 – 34
• plocha povodí	13,10 km ²
• dlouhodobý průměrný roční průtok	0,096 m ³ .s ⁻¹
• průměrný roční úhrn srážek	774 mm

3.2.2 M-denní průtoky

Jedná se o průtoky překročené v rámci jednoho roku průměrně po dobu M-dní. Stanovil je ČHMÚ Brno v 11/1996 ([1]).

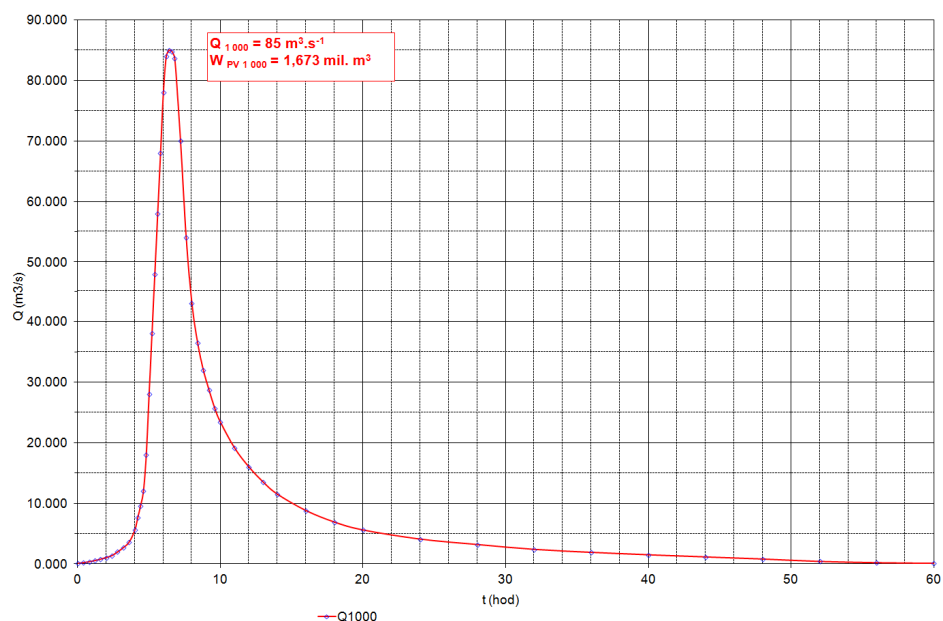
M-dní	30	90	180	270	330	355	364
Q - m ³ .s ⁻¹	0,250	0,096	0,044	0,023	0,011	0,006	0,0025

3.2.3 N-leté průtoky a objemy k nim příslušných PV

Revize těchto hydrologických údajů pro profil hráze VD Ludkovice byla provedena ČHMÚ Brno 011/2009

N – roků	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1 000
Q - m ³ .s ⁻¹	3,4	6,1	11,2	16,3	22,5	32,7	42,0	52,9	69,9	85,0
W- mil.m ³	0,08	0,15	0,27	0,38	0,53	0,74	0,90	1,09	1,35	1,67

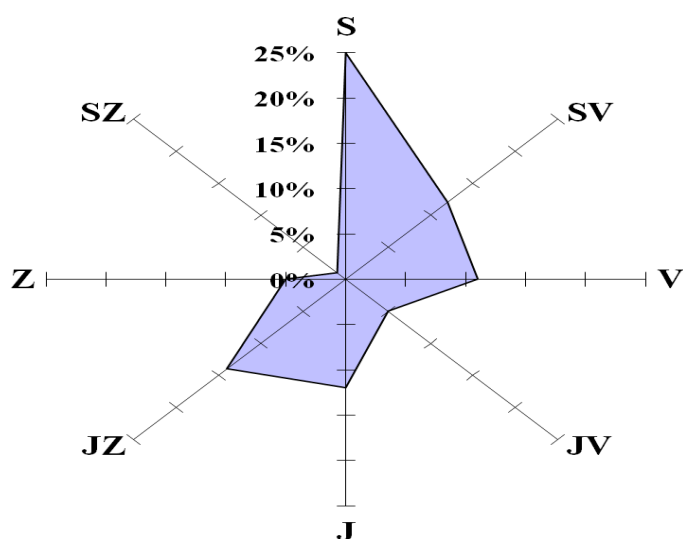
3.2.4 Průběh teoretické návrhové povodňové vlny (NPV_{1 000})



3.2.5 Větrná růžice

Větrnou růžici zpracoval ČHMÚ pobočka Brno 01.12.2012 ([4]).

SMĚR	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	KLID
100.0%	25.0%	12.0%	11.0%	5.0%	12.0%	14.0%	5.0%	1.0%	15.0%



3.3 Technické parametry a podklady

3.3.1 Geodetické podklady

Následující geodetické podklady byly prověřeny zaměřením společností VODNÍ DÍLA-TBD, a.s. v srpnu 2011:

- prům. kóta koruny přelivu	284,15 m n.m.,
- min. kóta koruny hráze v ose	285,55 m n.m.,
- min. kóta koruny vlnolamu	286,30 m n.m. .

Ostatní podklady pro výpočet provedený v kapitole 4 uvedené v následujícím odstavci byly převzaty z elaborátu „VD Ludkovice - hydraulická zabezpečení“ [2] a původní PD díla.

3.3.2 Geotechnické podklady

Provedení průzkumných vrtů z koruny hráze bylo provedeno v září 2011, byly provedeny vrty v ose koruny hráze do hloubky 2 m, rozborů vzorků a ověřena hloubka těsnícího jádra, které bylo zastiženo v hloubce 0,6 m.

3.4 Okolnosti ovlivňující bezpečnost VD za povodní

Při daném konstrukčním typu hráze je nepřípustné její přelití. Těsnící prvek je ukončen cca 0,60 m (viz. kapitola 3.3.2.) pod korunou hráze (tzn. v nejnižším místě hráze kóta ukončení prvku je cca 284,95 m n.m.). Prvek by neměl být dlouhodoběji přeléván, s ohledem na konstrukční uspořádání – vlnolam zapuštěný přímo do těsnícího jádra lze krátkodobě (max. 2 hodiny) připustit zvýšení hladiny na úroveň koruny hráze, tj. 285,55 m n.m. .

Vodní dílo má trvalou obsluhu, hrázňý i jeho zástupce bydlí prakticky přímo na VD a v době jeho nepřítomnosti jsou stanoveny zálohy.

Manipulace za povodní na VD probíhá podle schváleného manipulačního řádu z r. 2010 a to dle oddílů C.4.4 a C.4.5., jejichž plné znění je uvedeno v následujících odstavcích.

C.4.4. Manipulace při převádění povodní

Při příchodu povodně se nejdříve plní předpouštěný zásobní prostor nádrže. Při přítocích do $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je otevřena asanační výpust (cca $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), zbytkem přítoků se plní zásobní prostor a s přechodem na přeliv přes něj přepadá.

Jakmile přítoky stoupnou nad $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, uzavře se nejdříve asanační výpust a otevře se jedna spodní výpust na plnou kapacitu. Pokud lze očekávat po vyhodnocení aktuální hydrologické a meteorologické situace prudký nárůst přítoků, je možné asanační výpust uzavřít a jednu spodní výpust otevřít i dříve.

Je-li přítok vyšší než cca $6,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a plní se předpuštěný zásobní prostor, otevře se i druhá spodní výpust na plnou kapacitu. Přebytkem přítoku nad množství rovnající se plné kapacitě obou spodních výpustí se plní zásobní prostor až po korunu přelivu. Pokud by během plnění zásobního prostoru začaly přítoky klesat, spodní výpusti se uzavrou, aby se zajistilo naplnění zásobního prostoru.

Při neočekávaném příchodu povodně, kdy není předpouštěním vytvořen volný zásobní prostor pro zachycení povodní, se manipuluje následovně:

Při přítocích do $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je otevřena asanační výpust (cca $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zbytek přítoků přepadá přes přeliv.

Jakmile přítoky stoupnou nad $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (cca 18 cm přes přeliv), uzavře se nejdříve asanační výpust a otevře se na plnou kapacitu jedna spodní výpust. Pokud lze očekávat po vyhodnocení aktuální hydrologické a meteorologické situace prudký nárůst přítoků, je možné asanační výpust uzavřít a jednu spodní výpust otevřít i dříve.

Jsou-li přítoky vyšší než cca $6,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a voda začne znovu přepadat přes přeliv, otevře se i druhá spodní výpust na plnou kapacitu.

Jsou-li obě spodní výpusti v plném provozu a přítoky dále stoupají, nastává neovladatelná retence - plní se prostor nad korunou přelivu. Žádná další manipulace se neprovádí. Voda odtéká současně spodními výpustmi otevřenými na plnou kapacitu a přelivem. Spodní výpusti zůstávají otevřené po celou dobu, kdy je při převádění povodní ve funkci přeliv.

Tento způsob manipulace je předepsán na základě doporučení VRV TBD Brno, a to na podkladě řešení Hydraulické zabezpečení vodního díla Ludkovice z června 1982. Hladina ve štole je značně neustálená vzhledem k pulsaci proudu a neuzavření odpadní štol, zejména za výtokovým profilem ze skluzu štol a vzniká nebezpečí ohrožení funkce odběrného potrubí, jehož trasa ve štole značně zhoršuje průtokové poměry.

Při vyšších průtocích (nad $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) by mohlo docházet k přechodnému jevu mezi zahlcenou a nezahlcenou štolou, kdy při nezavzdušněné štole vznikají u její klenby podtlaková pásma umožňující vznik vzduchových pytlů, které postupně vyráží v určitých intervalech ze štol. Kritická hodnota pro bezpečnost díla je průtok $59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a jemu odpovídající hladina 285,20 m n.m. Otevření spodních výpustí zároveň s funkcí přelivu by mělo zmírnit uvedené negativní účinky.

C.4.5. Manipulace při opadávání povodně

Při opadávání povodně se prázdní retenční prostor přelivem a spodními výpustmi otevřenými na plnou kapacitu. Jakmile klesne hladina až na kótu přelivu 284,15 m n.m., uzavře se nejdříve jedna spodní výpust. Klesá-li hladina dále pod kótu přelivu, uzavře se i druhá spodní výpust. Otevřením asanační výpusti se hladina udržuje na kótě přelivu. Další manipulace se řídí podle oddílu C.3. - manipulace v zásobním prostoru nádrže.

4 STANOVENÍ MEZNÍ BEZPEČNÉ HLADINY

4.1 Stanovení mezní bezpečné hladiny bez zahrnutí větrové vlny /MBH/

V elaborátu „Mírové poruchy“ [21] byla jako nejpravděpodobnější z hlediska narušení přehradní hráze uvažována porucha vnitřní erozí v oblasti zavázání tělesa hráze do pravého údolního svahu na styku materiálů tělesa hráze a jejího podloží.

Méně pravděpodobnou příčinou porušení hráze se pak jeví povrchová eroze hráze za povodně při přelévání její koruny resp. za dlouhodobějšího přelévání hlinitého těsnícího prvku v její koruně.

Jako výchozí úroveň pro stanovení mezní bezpečné hladiny v nádrži bez zahrnutí větrové vlny je s ohledem na skutečnosti uvedené v předchozím textu voleno nejnižší místo na koruně hráze dle skutečného zaměření 08/2011 [23], tj. 285,55 m n.m. Přičemž na koruně hráze je provedena vozovka z makadamu prolitého asfaltem. Celková tloušťka všech vrstev vozovky je max. 0,6 m. Pod vozovkou se potom nachází vlastní těsnící prvek hráze. Toto pak bylo prověřeno v rámci vrtných prací při provádění průzkumných vrtů. Z uvedeného plyne minimální kóta ukončení těsnícího prvku v koruně hráze na kótě cca 284,95 m n.m. Při zohlednění úrovně tohoto ukončení, způsobu založení vlnolamové zídky stanovujeme mezní bezpečnou hladinu bez zahrnutí větrové vlny (MBH) v úrovni 285,55 m n.m.

4.2 Stanovení výběhu větrové vlny /hv/

Výběh a výška vln jsou stanoveny podle ČSN 75 0255 – Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích. Podle větrné růžice (ČHMÚ, 2012) je dominantní směr větru severní, vzhledem k orientaci hráze je určen převládající směr větru severovýchodní (SV). Výpočet výběhu a výšky vlny byl proveden pro nejhorší variantu, tj. se základním nejdelším možným rozběhem vlny.

mezní bezpečná hladina (MBH):	285,55 m n.m.
minimální kóta koruny vlnolamu:	286,30 m n.m.
minimální kóta paty vlnolamu u návodního líce:	285,28 m n.m.
efektivní délka rozběhu vlny:	333 m
charakteristická výška vlny (pro Pp 13 %):	0,642 m
výška výběhu vlny na návodní svah hráze	
při max. hladině 285,05 m.n m (Pp 13%):	1,279 m
min. nutná výška svislé části vlnolamu:	0,32 m (285,60 m.n m)
při max. hladině 285,46 m.n m (Pp 13%):	0,669 m
min. nutná výška svislé části vlnolamu:	0,85 m (286,13 m.n m)

Rozhodujícím faktorem pro stanovení MBH byla skutečná poloha koruny těsnícího jádra hráze a konstrukční řešení vlnolamu. Se snížením úrovně MBH o vypočítanou výšku větrové vlny nebylo s ohledem na propojení vlnolamu s těsnícím jádrem, které zajišťuje těsnící účinek minimálně do úrovně koruny hráze uvažováno.

4.3 Globální stabilita hráze při MBH

4.3.1 Úvod

Součástí studie je také posouzení stability vzdušního líce hráze VD Ludkovice při mezní bezpečné hladině. V souladu se SOD bylo posouzení provedeno v jednom údolním profilu. Výpočet proudění podzemní vody i stability byl vyhotoven pro stávající stav.

Cílem bylo pomocí matematického modelování proudění podzemní vody zjistit, zda je stávající řešení hráze vhodné a dostatečně spolehlivé při zatížení při průchodu teoretické kontrolní povodňové vlny s dobou opakování $N = 1\,000$ let a dále, zda vzdušní líc hráze vykazuje stupeň bezpečnosti při mezní bezpečné hladině (MBH) v souladu s ČSN 75 2310 a TNV 75 2935.

Všechny výškové kóty uvedené v textu i v přílohách jsou ve výškovém systému Balt po vyrovnání (B.p.v.).

Použité podklady

1. VODNÍ DÍLA-TBD a.s. - Posudek rychlosti prázdnění nádrží Povodí Moravy, Brno, leden 1998.
2. POVODÍ MORAVY, s.p. - Manipulační řád pro VD Ludkovice, Brno, 2009.
3. TOPGEO BRNO, spol. s r.o. - VD Ludkovice, IG, Technická zpráva o provedeném inženýrskogeologickém průzkumu v koruně hráze VD Ludkovice, Hubenov, Bojkovice, za účelem stanovení koeficientu filtrace těsnící zeminy, Brno, září 2011
4. INGSTAV, n.p. - Výpočet sedání kubatury při sypání hráze VD Ludkovice vlivem stlačení vlastního násypu, květen 1968.
5. INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝ A HYDROGEOLOGICKÝ PRŮZKUM, n.p. - Žilina závod Brno, Závěrečná zpráva o pokusném hutnění kamenitého a těsnícího materiálu na stavbě hráze na Ludkovickém potoce u Ludkovic, Brno, listopad 1966.
6. HYDROPROJEKT v Praze, pobočka Brno - Nádrž na Ludkovickém potoce u Ludkovic, Řešení stability – vzdušní svah, Brno, duben 1966
7. Seepage modeling with SEEP/W 2007, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE International Ltd., Second Edition, May 2007.
8. Stability modeling with SLOPE/W 2007, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE International Ltd., Second Edition, May 2007.
9. ČSN 73 6850 – Sypané přehradní hráze (1977).
10. ČSN 75 2310 – Sypané hráze (2005).
11. TNV 75 2935 – Posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní (2003).

4.3.2 Výpočet proudění podzemní vody

Jako podklad pro posouzení stability vzdušní části hráze při MBH v nádrži byly provedeny výpočty pro neustálené proudění podzemní vody tělesem hráze.

Mezní bezpečná hladina (MBH) je dosažena pomocí simulace průběhu teoretické povodňové vlny s dobou opakování $N > 10\,000$ let. Tento předpoklad odpovídá realitě, jelikož v průběhu povodně, bude hladina v nádrži na úrovni MBH po krátký časový interval (řádově max. jednotky hodin).

Výpočet proudění podzemní vody byl proveden v programu GeoStudio 2007, modul SEEP/W.

Model hráze VD Ludkovice pro výpočet proudění podzemní vody a pro navazující výpočet stability byl sestaven na základě dostupných geometrických podkladů. V rámci nezbytného zjednodušení a nutné schematizace je proveden jako dvourozměrný (2D) ve vertikální rovině, přičemž byl proveden v jednom údolním řezu.

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.

Hydraulická vodivost zeminy v horizontálním a vertikálním směru je různá, byl přijat předpoklad anizotropního filtračního prostředí. Hydraulická vodivost byla u vybraných materiálů uvažována různá v horizontálním a vertikálním směru.

Model proudění podzemní vody SEEP/W je schopen simulovat proudění jak v nasycené, tak v nenasycené zóně. Je tedy modelováno jak tlakové proudění pod hladinou podzemní vody v nasycené zóně, tak proudění nad hladinou podzemní vody v nenasycené 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 2007 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 2007 vygenerovány na základě znalosti křivek zrnitosti, objemové vlhkosti při nasyceném stavu a meze tekutosti.

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 2007 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 cca 1810. Čtyřúhelníkové elementy v drtivé většině v modelu převažují, trojúhelníkové elementy jsou použity jen minimálně, pro optimalizaci výpočtové sítě v důsledku netriviálního geometrického tvaru regionů.

Model proudění podzemní vody hrází byl podroben kontrole pomocí porovnání celkového vypočteného průsaku hrází na 1 bm se skutečně měřenými hodnotami na díle v rámci provádění TBD. Pro další kalibraci, resp. ověření výsledků výpočtů proudění, byly výsledky srovnány také se skutečnými hladinami vody, měřenými v pozorovacích vrtech v rámci TBD.

Pro další podrobnosti o výpočtu a teorii ustáleného i neustáleného proudění podzemní vody lze použít teoretický manuál k modulu SEEP/W programu GeoStudio 2007, který lze nalézt na www.geo-slope.com.

4.3.3 Stabilita vzdušního líce

Standardním způsobem posouzení stability vzdušního líce zemní hráze je výpočet stability jejího tělesa proti usmýknutí 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 usmýknutí zemního tělesa a sil/momentů, které se snaží usmýknutí, 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.

Model příčného řezu hráze je, jak již bylo zmíněno, po geometrické stránce identický s modelem pro proudění podzemní vody. Pro výpočty stability vzdušního líce 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 hráze byl proveden v programu GeoStudio 2007, modul SLOPE/W, který je určen pro výpočty stability zemních konstrukcí. Výpočet je proveden pomocí metody mezní rovnováhy sil a momentů na kinematicky možných smykových plochách.

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 GLE (General Limit Equilibrium), 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.

Stabilita byla posuzována pro vzdušní část hráze. Vliv podzemní vody v tělese hráze na její stabilitu, není, jak prokázaly výpočty, velmi významný. Před výpočtem stability byl proveden výpočet neustáleného proudění podzemní vody hrází v modulu SEEP/W a jeho výsledky, tedy pole pórových tlaků, použity ve výpočtu stability tělesa hráze v modulu SLOPE/W.

Pro další podrobnosti o výpočtu a teorii výpočtů stability podle mezních stavů podle jednotlivých autorů lze použít teoretický manuál k modulu SLOPE/W programu GeoStudio 2007, který lze nalézt na www.geo-slope.com.

4.3.4 Parametry materiálů ve výpočtu

Protože byla modelována jak nasycená, tak nenasyčená zóna neustáleného proudění podzemní vody, 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 v modelu. Tyto hodnoty a funkce byly převzaty, resp. vygenerovány z dostupných podkladů geotechnického průzkumu a dále podle tabulkových hodnot a zkušeností řešitele. Parametry smykové pevnosti zemín vstupující do výpočtu, objemové hmotnosti a hydraulická vodivost nasycené zeminy jsou uvedeny v následující tabulce. U návodního líce, bylo pro zjednodušení modelu, použit pouze materiál filtru. Bylo zanedbáno opevnění návodního líce kamennou rovnalinou.

Tab. 1 Vybrané parametry zemin použité ve výpočtu

Část hráze	Zemina	Efektivní parametry smykové pevnosti	Hydraulická vodivost nasycené zeminy	Zdroj parametrů
Těsnící část	Jíl hlinitý	$\varphi_{ef} = 19^\circ$	$k_{sat} = 1,53 \cdot 10^{-9}$ m/s	Podklad č. 3 a 4
		$c_{ef} = 10$ kPa		
		$\gamma_n = 19,8$ kN/m ³		
Rokfilová část hráze	Kamenná sypanina	$\varphi_{ef} = 42^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-2}$ m/s	Podklad č. 4 a 6
		$c_{ef} = 0$ kPa		
		$\gamma_n = 18,9$ kN/m ³		
Stabilizační materiál střední části hráze	Písčité hlína se štěrkem	$\varphi_{ef} = 25^\circ$	$k_{sat} = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s	Podklad č. 4, 5 a 6
		$c_{ef} = 9,8$ kPa		
		$\gamma_n = 19,8$ kN/m ³		
Propustné vrstvy (návodní líc, filtry)	Písky, štěrky	$\varphi_{ef} = 30^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s	Podklad č. 6
		$c_{ef} = 0$ kPa		
		$\gamma_n = 18,1$ kN/m ³		
Propustné vrstvy (drenážní prvek)	Kamenopísčité suť	$\varphi_{ef} = 38^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s	Podklad č. 6
		$c_{ef} = 0$ kPa		
		$\gamma_n = 19,6$ kN/m ³		
Podložní náplavové hlíny	Hlína jílovitá	$\varphi_{ef} = 20^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s	Podklad č. 6
		$c_{ef} = 12$ kPa		
		$\gamma_n = 18,1$ kN/m ³		
Podložní štěrky	Hlinité štěrky	$\varphi_{ef} = 38^\circ$	$k_{sat} = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s	Podklad č. 6
		$c_{ef} = 0$ kPa		
		$\gamma_n = 19,6$ kN/m ³		
Podložní jílovce	Jílovce, slínovce, pískovce	$\varphi_{ef} = -^\circ$	$k_{sat} = 4 \cdot 10^{-5}$ m/s	Podklad č. 6 (uvažováno jako pevné podloží)
		$c_{ef} = -$ kPa		
		$\gamma_n = -$ kN/m ³		

kde φ_{ef} je efektivní úhel vnitřního tření zeminy ve stupních, c_{ef} je efektivní koheze (soudržnost) v kPa, γ_{sat} je objemová tíha nasycené zeminy v kN/m³ (pod HPV) a γ_n je objemová tíha zeminy v přirozeném stavu v kN/m³ (nad HPV). U materiálu násypu hráze byla podle zkušeností řešitele redukována hodnota úhlu vnitřního tření φ_{ef} a soudržnosti c_{ef} .

V modelu byla také zohledněna anizotropie hydraulické vodivosti těsnícího materiálu hráze, která byla zadána poměrem k_y/k_x jako 1/10.

4.3.5 Výpočtové stavy

Stavy použité ve výpočtech stability vzdušního líce hráze vycházejí z jedné počáteční hladiny (MBH = 288,55 m n.m.). Rozdíl mezi těmito stavy je následující:

A1) Nádrž plná - hladina v nádrži byla uvažována na kótě mezní bezpečné hladiny MBH = 288,55m n.m. Je počítáno pouze s usmyknutím části koruny hráze (min 1/2).

A2) Nádrž plná - hladina v nádrži byla uvažována na kótě mezní bezpečné hladiny MBH = 288,55m n.m. Je počítáno s usmyknutím vlnolamu s celou korunou hráze.

4.3.6 Výsledky

Pro řešený profil PF jsou na příloze č. 14 zobrazeny vždy smykové plochy s minimálním SB pro daný zatěžovací stav s příslušnou hodnotou SB.

Výsledné minimální SB pro jednotlivé zatěžovací stavy a pro řešený profil jsou souhrnně uvedeny v následující tab. 2.

Tab. 2 Výsledky výpočtů stability, stávající stav

Zatěžovací stav	Část hráze	Hladina	Min. stupeň bezpečnosti (SB)	Požadavek SB dle (8) a (9)
A1) nádrž plná	vzdušní	MBH = 288,55 m n.m.	1,89	1,05
A2) nádrž plná	vzdušní	MBH = 288,55 m n.m.	1,60	1,05

Pro výpočtové stavy A1) a A2) je minimální SB vyšší, než požaduje (9). Hodnocení je uvedeno v kap. 4.3.7.

Ve výpočtech byla nastavena min. hloubka posuzované smykové plochy 2 m pod terénem, a to z důvodu eliminace mělkých smykových ploch, které nejsou z hlediska globální stability hráze důležité. Za smykové plochy ohrožující globální stabilitu jsou považovány hluboké smykové plochy.

Výsledky výpočtů stability vzdušního líce hráze při MBH jsou graficky zobrazeny na příloze č. 14 pro výpočtový stav A1) a pro výpočtový stav A2). Proužkovane je vyznačena smyková plocha s nejnižším SB. Dále je vyznačena ilustrativní poloha středu smykové plochy s uvedenou hodnotou minimálního SB.

4.3.7 Závěr

Posouzení stability vzdušního líce hráze při MBH VD Ludkovice bylo provedeno pro stávající stav. Z dostupných podkladů byl v programu GeoStudio 2007 sestaven numerický model jednoho příčného profilu hráze ozn. PF.

Připomínáme, že podle ČSN 75 2310 je minimální požadavek na stupeň bezpečnosti svahu při MBH 1,05.

Závěr

- Nebyly řešeny mělké smykové plochy. Tyto smykové plochy nejsou z hlediska globální stability nebezpečné. Pokud by došlo k mělké smykové ploše, hráz VD by neměla být ohrožena.
- Byly řešeny dva stavy pro jedinou úroveň hladiny v nádrži (MBH = 288,55 m n.m.). Tyto stavy vycházejí z různého způsobu usmyknutí vzdušního líce koruny hráze. Prvním způsobem je usmyknutí části koruny hráze (stav A1) a druhým způsobem je usmyknutí celé koruny hráze s betonovou konstrukcí vlnolamu (A2).
- Rozdíly ve stabilitě při různých zatěžovacích stavech jsou minimální. Vliv podzemní vody resp. hladiny vody v nádrži je malý. Pro stabilitu vzdušního svahu hráze jsou rozhodující především materiálové charakteristiky stabilizace (kamenná sypanina), filtru a náplavových hlín v podloží hráze.

Provedeným přešetřením stability bylo prokázáno, že vzdušní líc hráze VD Ludkovice za stávajícího stavu je při MBH = 288,55 m n.m. vody v nádrži stabilní v souladu s normovými požadavky [8] a [9].

5 STANOVENÍ KONTROLNÍ MAXIMÁLNÍ HLADINY V NÁDRŽI

5.1 Hydraulické výpočty

Pro bezpečné převedení povodňových průtoků slouží spodní výpusti a kašnový přeliv. Ke snížení povodňových průtoků se využívá neovladatelný retenční prostor. Schopnost převádět povodňové průtoky vodním dílem je charakterizována měrnými křivkami jednotlivých objektů. Pro potřeby tohoto posudku bylo provedeno přešetření jednotlivých měrných křivek a to v níže uvedených kapitolách 5.1.1 až 5.1.6. Výsledné souhrnné křivky převedení povodní na VD pro tři různé varianty odtoku byly následně sestaveny v oddíle 5.1.7.

5.1.1 Měrná křivka bezpečnostního přelivu – dokonalý přepad

Přeliv je nehrazený kašnového typu (půdorys přelivné hrany je část kružnice o poloměru 4,4 m a střed. úhlu 254°42') s kruhovým spadištěm rozděleným betonovým stabilizačním prahem, ze kterého odtéká voda do odpadní štol. Skluz je ukončen noskem, pod kterým vyústí spodní výpusti. Pod noskem jsou zaústěna dvě zavzdušňovací potrubí o průměru 500 mm.

Kóta přelivné hrany	284,15 m n.m.
Délka přelivné hrany(vypočtená, ve vrcholu přelivné hrany)	21,33 m
Kapacita přelivu při max. hl. na kótě 285,05 dle výpočtu	42,3 m ³ /s

Hodnota součinitele přepadového součinitele m pro vypočtenou část měrné křivky byla vypočtena dle Kramerova vzorce:

$$Q = m.b.(2g)^{1/2}.h^{3/2},$$

kde

- Q.. přepadové množství,
- b.. délka přelivu 21,33 m [2],
- m.. přepadový součinitel, $m_{\max} = 0,5$,
- h.. přepadová výška (proměnná veličina).

POZNÁMKA: První úsek - spadiště přelivu hluboké 3,8 m přechází na skluz, na který navazuje odpadní chodba, ve které je pod stropem zavěšeno vodovodní potrubí. Chodba je společná pro vodu odtékající přelivem i spodními výpustmi. Chodba je půlkruhovitého profilu, podle projektu dimenzovaná tak, aby veškeré v úvahu přicházející průtoky (předpokládá se přepadové množství odpovídající návrhové n - leté vodě a plně otevřeným spodním výpustem) převedla při volné hladině tj. $42,3 + (2 \times 3,35) = 49,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Po provedení výpočtů a posouzení kapacity odpadní chodby (výpočet zvláštní povodně – 12/2000), bylo zjištěno, že lze předpokládat, že dojde k zahlcení vtoku na skluz, neboť vypočtená výška hladiny vody na počátku skluzu s předpokládaným provzdušněním (25%) je cca 3,8 m. Při tom by došlo k zahlcení vtoku a vzniku pulzací v celého objektu. Pro zlepšení odvádění povodňových průtoků je využíváno sacího vlivu průtoku vody při plně otevřených spodních výpustích.

5.1.2 Měrná křivka spodních výpustí

Dvě shodné samostatné symetricky uspořádané spodní výpusti, na které je napojena odbočkou samostatná výpust pro vypouštění asanačních průtoků. Spodními výpustmi nelze v současné době regulovat průtok vody.

Kapacita výpustí průměru DN 600 mm

Při hladině	277,05 m n.m.	2 x 2,212 m ³ /s
Při hladině	284,15 m n.m.	2 x 3,356 m ³ /s
Při max. hladině	285,05 m n.m.	2 x 3,45 m ³ /s

5.1.3 Kapacita výpustné chodby

Spodní výpusti odpad od přelivu zaústí do výpustné chodby pod tělesem hráze, která je podkovovitého tvaru o šířce 4,0 m a výšce 2,8 m. Chodba délky 40,3 m vyústí do vývařště.

Měrná křivka pro odtok chodbou byla přešetřena. Výpočty bylo zjištěno, že chodba je dostatečně kapacitní pro převedení návrhových průtoků, nebyl uvažován vliv podvěšeného vodovodního potrubí. Současně však výpočet prokázal, že při překročení průtoku 55 m³/s dojde k postupnému zahlcování odtoku ze spadiště bezpečnostního přelivu na skluz a dále do odpadní chodby. Hrozí výskyt pulzací, které by mohly vést k poškození objektu.

5.1.4 Souhrnná měrná křivka převedení povodní

Je ve své tabelární i grafické podobě uvedena na příloze č. 7. Byly řešeny tři možné varianty převedení povodní:

- 1) Odtok nehrazeným přelivem a plnou kapacitou dvou spodních výpustí
- 2) Odtok nehrazeným přelivem a plnou kapacitou jedné spodní výpusti
- 3) Odtok nehrazeným přelivem

5.2 Podmínky a předpoklady řešení transformace

Dle požadavku Směrnice byl posuzován průběh průchodu nádrží povodně s pravděpodobnou dobou opakování 1 x 1 000 let (kontrolní povodeň).

Vzhledem k záměru dokumentovat transformační účinek nádrže pro širší spektrum povodňových vln (ve vazbě na mezní bezpečnou hladinu), byl posouzen i průchod povodní s dobou opakování $n = 100, 200$ a 500 let.

Vlastní řešení průchodu uvedených povodňových vln je provedeno ve třech variantách.

5.2.1 Varianta „1“ – neovladatelný odtok a 2x spodní výpust

- po celou dobu povodně odtéká voda z nádrže **bezpečnostním přelivem a dvěma spodními výpustmi**
- **počáteční hladina před příchodem povodně je uvažována na kótě 284,15 m n.m.**, což je kóta maximální zásobní hladiny (dle MŘ),
- při nástupu povodně se uvažuje s postupným otevřením jedné výpusti při přítoku a později obou spodních výpustí dle manipulace popsané v MŘ
- nepředpokládá se snížení kapacity přelivu vlivem částečného ucpání plaveninami.

5.2.2 Varianta „2“ - neovladatelný odtok a 1x spodní výpust

- po celou dobu povodně odtéká voda z nádrže **bezpečnostním přelivem a jednou spodní výpustí**
- **počáteční hladina před příchodem povodně je uvažována na kótě 284,15 m n.m.**, což je kóta maximální zásobní hladiny (dle MŘ),
- při nástupu povodně se uvažuje s otevřením jedné výpusti
- nepředpokládá se snížení kapacity přelivu vlivem částečného ucpání plaveninami.

5.2.3 Varianta „3“ – neovladatelný odtok

- po celou dobu povodně odtéká voda z nádrže pouze **bezpečnostním přelivem** bez odtoku spodními výpustmi
- **počáteční hladina před příchodem povodně je uvažována na kótě 284,15 m n.m.**, což je kóta maximální zásobní hladiny (dle MŘ),
- při nástupu povodně se neuvažuje s otevřením výpustí
- nepředpokládá se snížení kapacity přelivu vlivem částečného ucpání plaveninami.

5.3 Výsledky řešení transformace

Výpočet byl pro soubor prošetřovaných PV (PV_{1 000}, PV₅₀₀, PV₂₀₀, PV₁₀₀ proveden ve třech variantách odtoku z nádrže.

5.3.1 PV 1000

• Q _{1 000} =	85,0 m ³ .s ⁻¹ ,		
• W _{PV 1 000} =	1,673 mil.m ³ ,		
• t _{PV 1 000} =	60,0 hod. ,		
	Var 1	Var 2.	Var.3
• MAXO _{1 000} =	79,63 m ³ .s ⁻¹ ,	79,8 m ³ .s ⁻¹	82,20 m ³ .s ⁻¹
• MAXH _{1 000} =	285,46 m n.m.	285,50 m n.m.	285,54 m n.m.

5.3.2 PV 500

• Q ₅₀₀ =	69,9,0 m ³ .s ⁻¹ ,		
• W _{PV 500} =	1,353 mil.m ³ ,		
• t _{PV 500} =	56,0 hod. ,		
	Var 1	Var 2.	Var.3
• MAXO ₅₀₀ =	66,8 m ³ .s ⁻¹ ,	64,0 m ³ .s ⁻¹	66,5 m ³ .s ⁻¹
• MAXH ₅₀₀ =	285,29 m n.m.	285,31 m n.m.	285,38 m n.m.

5.3.3 PV 200

• Q ₂₀₀ =	52,9 m ³ .s ⁻¹ ,		
• W _{PV 200} =	1,092 mil.m ³ ,		
• t _{PV 200} =	52,0 hod. ,		
	Var 1	Var 2.	Var.3
• MAXO ₂₀₀ =	50,4 m ³ .s ⁻¹ ,	48,6 m ³ .s ⁻¹	50,5 m ³ .s ⁻¹
• MAXH ₂₀₀ =	285,08 m n.m.	285,10 m n.m.	285,17 m n.m.

5.3.4 PV 100

• $Q_{100} =$	42,0 m ³ .s ⁻¹ ,		
• $W_{PV 100} =$	0,905 mil.m ³ ,		
• $t_{PV 100} =$	48,0 hod. ,		
	Var 1	Var 2.	Var.3
• $MAXO_{100} =$	39,9 m ³ .s ⁻¹ ,	38,6 m ³ .s ⁻¹	40,3 m ³ .s ⁻¹
• $MAXH_{100} =$	284,92 m n.m.	284,96 m n.m.	285,03 m n.m.

6 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Cílem posudku bylo prověřit bezpečnost a provozní spolehlivost VD za povodní a to zejména určením mezní bezpečné hladiny v nádrži MBH (bez zahrnutí výběhu větrové vlny) a jejím porovnáním s dosaženými maximálními hladinami MAXH ze tří kulminačních hladin za průchodu teoretické KPV.

Maximální hladiny v nádrži při průchodu kontrolní povodňové vlny (PV_{1 000}) stanovené výpočty transformací pro všechny tři výpočtové varianty nedosahují mezní bezpečné hladiny (bez zahrnutí větrové vlny):

Var. 1.	MBH - MAXH _{1 000} = 285,55 – 285,46 = +0,09 m,
Var. 2.	MBH - MAXH _{1 000} = 285,55 – 285,50 = +0,05 m,
Var. 3.	MBH - MAXH _{1 000} = 285,55 – 285,54 = +0,01 m,

Porovnání vypočtené maximální hladiny v nádrži za průchodu návrhové povodňové vlny (PV₁₀₀) stanovené výpočty transformací pro všechny tři výpočtové varianty se současně platnou maximální hladinou v nádrži Hmax (MŘ 2010) vyznívá příznivě:

• Var. 1.	MAXH - MAXH ₁₀₀ = 285,05 – 284,92 = +0,13 m,
• Var. 2.	MAXH - MAXH ₁₀₀ = 285,05 – 284,96 = +0,09 m,
• Var. 3.	MAXH - MAXH ₁₀₀ = 285,05 – 285,03 = +0,02 m,

Výběh vlny je v obou případech zachycen vlnolamem, max. vypočtená výška výběhu vlny při průchodu PV₁₀₀₀ je 286,13 m n.m, výška vlnolamu je 286,30m n.m.

K překročení Hmax nedojde tedy v ani jedné variantě

Podle platných normativů se vodní dílo pokládá za bezpečné pro převedení KPV jestliže platí $KMH \leq MBH$, což je splněno: 285,55 m n.m. \leq 285,46 m n.m.

Vodní dílo Ludkovice je podle tohoto posudku vypracovaného ve smyslu TNV 75 2935 [8] a vyhlášky MZe č. 590/2002 Sb. novelizované vyhláškou č. 367/2005 Sb. [9] bezpečné pro průchod KPV.

Nádrž má prakticky nulový transformační účinek a o bezpečném převedení extrémních povodní rozhoduje téměř jen bezpečnostní přeliv. Předložené výpočty transformací nepředpokládají snížení jeho kapacity vlivem částečného ucpání připlavenými předměty.

Z výsledků výpočtů však vyplývá, že při překročení průtoku 55 m³/s dojde k postupnému zahlcování odtoku ze spadiště bezpečnostního přelivu na skluz a dále do odpadní chodby. Hrozí výskyt pulzací, které by mohly vést k poškození objektu. Dále dojde při těchto průtocích k poškození potrubí surové vody pod stropem chodby. Při hladinách, které by mohly být dosaženy při průchodu kontrolní PV_{1 000} a současného

vlnobití, by docházelo k přelévání objektu, jehož pochůzná část je v úrovni koruny hráze. Výsledkem by byl jednak znemožněný přístup na objekt a dále i zatopení celé technologické části sdruženého objektu.

7 NÁPRAVNÁ A NOUZOVÁ OPATŘENÍ, NÁMĚTY NA ZLEPŠENÍ

Z hlediska námětů na zlepšení doporučujeme:

- Na fyzikálním modelu prověřit kapacity přelivu a odpadní chodby a na základě výsledků provést buď úpravu objektů, nebo doplnit vodní dílo doplňkovým přelivem, který by měl zabezpečit převádění povodní tak, aby současný sdružený objekt nepřeváděl více než návrhový průtok.
- místní opravu zdiva přelivu a skluzu.

V Brně, prosinec 2011

Vypracoval:

Ing. Stanislav Žatecký

Ing. Tomáš Kantor (kapitola 4.3.)

Spolupráce:

Ing. Ondřej Černý
Lucie Štěpánová

Schválil:

Ing. Jiří Hodák, Ph.D.
vedoucí útvaru 403

8 POUŽITÉ PODKLADY

[1]	Manipulační řád VD Ludkovice, schválený 1.3.2010	Povodí Moravy, s.p., vodohospodářský dispečink, Brno
[2]	Projektová dokumentace vodního díla	Archiv PMO a.s.
[3]	Hydrologické údaje VD Ludkovice	ČHMÚ, Brno 12/2009
[4]	Větrná růžice pro VD Ludkovice	dopis ČHMÚ Brno
[5]	VD Ludkovice– hydraulická zabezpečení	VRV úsek TBD, Brno 05/1982
[6]	VD Ludkovice– posudek bezpečnosti vodního díla za povodní	VODNÍ DÍLA – TBD a.s., Brno 12/1997
[7]	VD Ludkovice– Program technickobezp. dohledu pro trvalý provoz, II. revize	VODNÍ DÍLA – TBD a.s., Brno 12/2004
[8]	TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní	MZe Praha, 03/2003
[9]	Vyhláška MZe 590/2002 Sb. „O technických požadavcích pro vodní díla“ (novelizovaná vyhláškou 367/2005 Sb.)	MZe Praha, 12/2002 (12/2005)
[10]	ČSN 75 2310 Sypané hráze	Český normaliz. institut, Praha 06/2006
[11]	ČSN 75 2340 Navrhování přehrad – hlavní parametry a vybavení	Český normaliz. institut, Praha 10/2004
[12]	Provozně-technický rozvoj, úkol č. 806, část B Kritéria pro posuzování rizika přelití sypaných přehrad I.-IV. kategorie	VRV úsek TBD, Praha, 12/1986
[13]	Vyhláška MZe č. 471/2001 Sb. ve znění vyhlášky č. 255/2010 Sb.	MZe, Praha 12/2001 a 08/2010
[14]	Zákon o vodách tj. č. 254/2001 Sb. ve znění zákona č. 150/2010 Sb.	Praha 06/2001 a 05/2010
[15]	Přehrady	J. Kratochvíl, V. Stara, Vysoké učení technické v Brně, 03/1990
[16]	Projektování přehrad, komplexní projekt HT	J. Kratochvíl, M. Janda, V. Stara, Vysoké učení technické v Brně, 06/1988
[17]	Hydraulika – příklady ke cvičení	V. Stara, J. Veselý, Vysoké učení technické v Brně, 12/1988
[18]	Hydraulika a hydrologie	J. Jandora, V. Stara, M.Starý, Vysoké učení technické v Brně, 10/2002
[19]	ČSN 75 0255 Výpočet účinku vln na stavby na vodních tocích a nádržích	Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1987
[20]	Dodatek k Programu TBD pro trvalý provoz	VODNÍ DÍLA – TBD a.s., Brno 12/2000
[21]	VD Ludkovice– Mírové poruchy	VODNÍ DÍLA – TBD a.s., Brno 02/1999
[22]	VD Ludkovice– IG průzkum (z koruny hráze),	TOPGEO Brno a.s., Brno 9/2011
[23]	VD Ludkovice– Polohopisné a výškopisné zaměření přelivu, objektu a koruny hráze	Ing.Karel Bouška, srpen 2011
[24]	VD Ludkovice – Mírové poruchy	VODNÍ DÍLA -TBD a.s., Brno 02/1999

9 SEZNAM PŘÍLOH

- 1.1 Přehledná situace, 1 : 25 000
- 1.2. Situační schéma hráze, 1 : 600
- 1.3. Příčný řez hrází, 1 : 250
- 1.4. Sdružený objekt, schema 1 : 200
2. Křivka objemů a ploch nádrže dle manipulačního řádu (545.60 - 564.10 m n.m.)
3. Souhrnné číselné charakteristiky n-letých PV, profil VD Ludkovice(vývoj v l.1979 - 2009)
4. Hydrogramy povodňových vln - klasický, statistický přístup
- teoret. povodňové vlny PV₁₀ až PV_{1 000} Ludkovický potok, profil hráze VD Ludkovice
5. Měrná křivka bezpečnostního přelivu - souhrnná
6. Měrná křivka spodních výpustí
7. Souhrnné měrné křivky převedení povodní
- 8.1.1. Transformace povodně nádrží - PV_{1 000} (2x výpust + bezpečnostní přeliv)
- neovladatelný odtok
- 8.1.2. Transformace povodně nádrží - PV_{1 000} (1x výpust + bezpečnostní přeliv)
- odtok dle MŘ
- 8.1.3. Transformace povodně nádrží - PV_{1 000} (bezpečnostní přeliv)
- odtok maximální kapacitou
- 8.2.1. Transformace povodně nádrží - PV₅₀₀ (2x výpust + bezpečnostní přeliv)
- neovladatelný odtok
- 8.2.2. Transformace povodně nádrží - PV₅₀₀ (1x výpust + bezpečnostní přeliv)
- odtok dle MŘ
- 8.2.3. Transformace povodně nádrží - PV₅₀₀ (bezpečnostní přeliv)
- odtok max. kapacitou
- 8.3.1. Transformace povodně nádrží - PV₂₀₀ (2x výpust + bezpečnostní přeliv)
- 8.3.2. Transformace povodně nádrží - PV₂₀₀ (1x výpust + bezpečnostní přeliv)
- 8.3.3. Transformace povodně nádrží - PV₂₀₀ (bezpečnostní přeliv)
- 8.4.1. Transformace povodně nádrží - PV₁₀₀ (1x výpust + bezpečnostní přeliv)
- 8.4.2. Transformace povodně nádrží - PV₁₀₀ (2x výpust + bezpečnostní přeliv)
- 8.4.3. Transformace povodně nádrží - PV₁₀₀ (bezpečnostní přeliv)
9. Transformace povodní PV₁₀ až PV_{10 000} - shrnutí pro neovladatelný odtok
10. Fotodokumentace se zákresem kulminačních hladin PV₁₀ až PV_{10 000} - výpustná věž
- 11.1 Fotodokumentace - bezpečnostní přeliv
- 11.2 Fotodokumentace - návodní a vzdušní líc hráze
12. Situace nádrže k výpočtu efektivní délky rozběhu větru podle ČSN 75 0255, 1 : 5 000
13. Výpočet výšky výběhu vlny na návodní líc hráze podle ČSN 75 0255
14. Globální stabilita hráze - vzdušní líc, hladina v nádrži na úrovni MBH (285,55 m n.m.)
- 15.1 Geodetické zaměření 2011 - technická zpráva
- 15.2 Geodetické zaměření 2011 - tabulka zaměřených bodů
- 15.3 Geodetické zaměření 2011 - situace 1 : 500