

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROTECHNIKY

VD LUDKOVICE A VD BOJKOVICE

FYZIKÁLNÍ MODEL PŘELIVU A ODPADNÍ CHODBY



Praha, březen 2015

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky

**VD LUDKOVICE A VD BOJKOVICE –
FYZIKÁLNÍ MODEL PŘELIVU A ODPADNÍ CHODBY**

Modelový výzkum pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu, spadiště, skluzu, odpadní chodby a vývaru

Zpráva o provedeném výzkumu

Odpovědný řešitel: doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.

Spoluřešitelé: Ing. Martin Králík, Ph.D.

Ing. Jitka Kučerová, CSc.

Ing. Milan Zuka, Ph.D.

Ing. Eva Škařupová

Karel Fazekas

Praha, březen 2015

Obsah:

I. Úvod	7
II. Vodní dílo Bojkovice	7
a. VD Bojkovice - identifikační údaje	7
b. Historie VD Bojkovice	7
c. Charakteristika VD Bojkovice	8
d. Posudky bezpečnosti VD Bojkovice	10
III. Vodní dílo Ludkovice	10
a. VD Ludkovice - identifikační údaje	10
b. Historie VD Ludkovice.....	11
c. Charakteristika VD Ludkovice	11
d. Posudky bezpečnosti VD Ludkovice	12
IV. Hydrotechnický modelový výzkum	13
V. Podklady.....	13
VI. Vstupní a modelové podmínky	14
VII. Měřítka podobnosti	15
VIII. Popis fyzikálního modelu	16
IX. Měření veličin na fyzikálním modelu	19
X. Hydraulické výpočty na vodním díle.....	19
XI. Program experimentů	25
a. Ověření současného stavu (měření 1 až 8)	28
Shrnutí 1 – měření 1 až 8 VD Ludkovice.....	33
b. Úpravy přelivu a spadiště (měření 9 až 27).....	35
Shrnutí 2 – měření 9 až 27 VD Ludkovice.....	54
c. Úpravy horní hrany vtokového okna skluzu (měření 28 až 30).....	57
Shrnutí 3 – měření 28 až 30 VD Ludkovice	60
d. Výsledná varianta pro VD Ludkovice (měření 31 až 35).....	62
Shrnutí 4 – měření 31 až 35 VD Ludkovice	67
e. Výsledná varianta pro VD Bojkovice (měření 36 až 40)	69
Shrnutí 5 – měření 36 až 40 VD Bojkovice.....	74
XII. Matematické modelování VD Ludkovice	76
a. Cíl studie.....	76
b. Výpočetní síť	78
c. Nastavení modelu.....	79
d. Výstupy.....	82
XIV. Závěr k modelovému výzkumu	88

Úvod

Vodní dílo Bojkovice na Kolelačském potoce a vodní dílo Ludkovice na Ludkovickém potoce se díky svému významu a stupni ohrožení území pod nimi řadí pro potřeby technicko-bezpečnostního dohledu do III. kategorie. Z hlediska TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní, byla pro VD Bojkovice a VD Ludkovice stanovena kontrolní povodňová vlna $KPV_{1\,000}$. Protože hydraulické výpočty částí sdruženého objektu stávajících bezpečnostních zařízení ukazují na nedostatečnou kapacitu, bylo rozhodnuto o jejich posouzení pomocí fyzikálního a matematického modelu s návrhem rekonstrukce, včetně navazujícího skluzu, odpadní chodby a vývaru.

„V současnosti je omezujícím místem pro průchod povodní odpadní chodba s kapacitou $55\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ “ (posudky bezpečnosti VD za povodní). Proto by, při budoucí rekonstrukci sdruženého objektu a odpadní chodby včetně průtočného profilu, měly být úpravy navrženy tak, aby umožňovaly převedení transformovaného průtoku $Q_{1\,000}$ bez nežádoucích škod na vodním díle.

Cílem provedeného výzkumu je pomocí fyzikálního hydraulického modelu, matematického modelu a zpřesňujících hydraulických výpočtů posoudit stávající stav i navržené úpravy pro zajištění technických opatření k bezpečnému převedení $KPV_{1\,000}$.

Výškové kóty uvedené v této zprávě jsou ve výškovém systému Balt po vyrovnání, (pokud není uvedeno jinak).

I. Vodní dílo Bojkovice

a. VD Bojkovice - identifikační údaje

Název stavby:	Vodní dílo Bojkovice
Provozovatel:	Povodí Moravy, s. p.
Okres:	Uherský Brod
Kraj:	Zlínský
Tok:	Kolelačský potok
Číslo hydrologického pořadí:	4-13-01-087

b. Historie VD Bojkovice

Významným důvodem pro výstavbu vodní nádrže bývá nutnost zajistit dostatek vody pro obyvatele nebo průmysl na území, kde nejsou dostatečné zdroje kvalitní podzemní vody.

Protože nádrž měla sloužit vodárenským účelům, bylo vybráno údolí potoka, jehož povodí je většinou zalesněné a bez soustředěné výstavby.

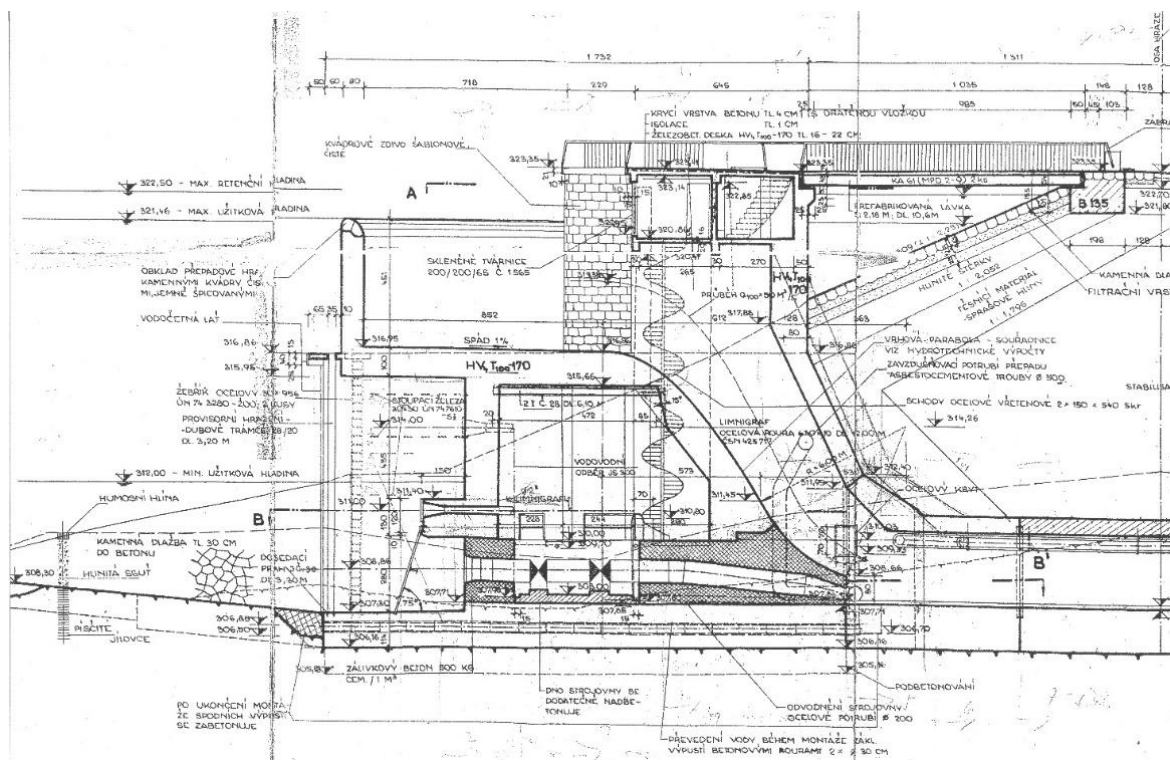
Výstavbu nádrže, jako zdroje vody pro strojírenský průmysl v Bojkovicích, podpořilo na začátku 60. let Ministerstvo všeobecného strojírenství. Investiční záměr byl zpracován v roce 1961 a stavba přehrady byla povolena v roce 1963. Prováděcí projekt vypracoval Hydroprojekt Brno a stavbu realizoval podnik Vodohospodářské stavby Brno ve spolupráci s PSG Gottwaldov. Výstavba probíhala od října 1963 do prosince 1966.

Přehrada byla vybudována jako zemní sypaná z místních štěrkových materiálů s příměsemi hlín. Nepropustnost násypu je zajištěna těsnicí vrstvou ze sprašových hlín při návodním svahu hráze opevněného kamennou dlažbou. Veškerá manipulace s vodou na vodním díle se děje pomocí sdruženého funkčního objektu u pravého břehu.

c. Charakteristika VD Bojkovice

Hlavními účely vodního díla jsou:

- zajištění dodávek vody pro úpravnu vody Bojkovice v množství 40 l.s^{-1} , maximálně 55 l.s^{-1} , 100 tis. $\text{m}^3/\text{měsíc}$, 1,2 mil. m^3/rok ,
- nadlepšení minimálního průtoku v toku pod přehradou na množství $MQ = 4,0 \text{ l.s}^{-1}$ (Q_{355d}),
- nádrž též plní funkci ochrannou před povodňovými průtoky.



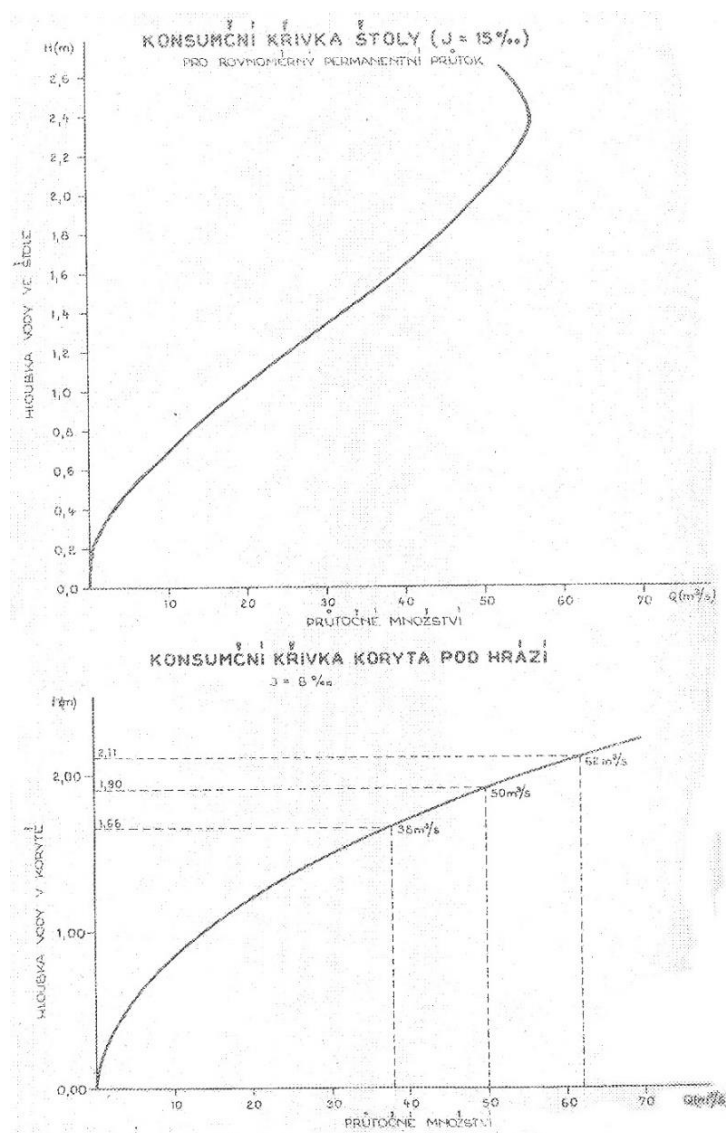
Obr. 1 Původní výkresová dokumentace hráze (místní výškový systém)

Základní výškové parametry vodního díla:

- kóta přelivné hrany 320,86 m n. m.
- maximální hladina v nádrži 321,94 m n. m.
- mezní bezpečná hladina (MBH) 322,68 m n. m.
- kóta koruny hráze 322,74 m n. m.

Hydrologické údaje:

- plocha povodí 13,92 km²
- průměrné dlouhodobé roční srážky 798 mm
- průměrný dlouhodobý roční průtok Q_a 0,075 m³.s⁻¹
- neškodný odtok $Q_{NEŠ}$ 6,0 m³.s⁻¹



Obr. 2 Konzumční křivky dle projektu ze šedesátých let

Tab. 1. m-denní průtoky, ČHMÚ, 2003

m [dny]	30	90	180	270	330	355	364
$Q_{md} [l.s^{-1}]$	0,185	0,074	0,037	0,019	0,009	0,004	0,0006

Tab. 2. N-leté průtoky, ČHMÚ, 2009

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
$Q_N [m^3.s^{-1}]$	3,4	6,5	12,1	17,7	24,4	35,2	45,0	56,3	73,9	89,4

d. Posudky bezpečnosti VD Bojkovice

V roce 1982 byl vypracován posudek „Hydraulická zabezpečení“ s výsledkem, že přehrada je z hlediska kapacity objektu na převedení povodní přijatelně zabezpečena. Další „Posudek bezpečnosti za povodní“ provedený v roce 1997 byl s výsledkem, že provozní spolehlivost a míra ochrany vodního díla za povodní je přijatelně zabezpečena. Údaje o parametrech zvláštních povodní a stupně povodňové aktivity na VD Bojkovice při nebezpečí vzniku zvláštních povodní upravuje samostatný dokument, který byl zpracován v roce 2000 jako dodatek k „Programu TBD pro trvalý provoz“. Doposud poslední posudek je „Posudek bezpečnosti VD za povodní I. revize“ provedený v roce 2011, z jehož výsledků však vyplývá, že při překročení průtoku $55 m^3.s^{-1}$ dojde k postupnému zahlcování odtoku ze spadiště bezpečnostního přelivu na skluz a dále do odpadní chodby. Hrozí proto výskyt pulzací, které by mohly vést k poškození objektu. Dále dojde při těchto průtocích k poškození potrubí surové vody umístěném pod stropem chodby. Při hladinách, které by mohly být dosaženy při průchodu KPV_{1000} a současného vlnobití by docházelo k přelévání objektu, jehož pochůzná část je v úrovni koruny hráze. Z toho plyne, že by byl jednak znemožněný přístup na sdružený objekt a dále by došlo i k zatápní prostoru jeho technologické části.

II. Vodní dílo Ludkovice

a. VD Ludkovice - identifikační údaje

Název stavby:	Vodní dílo Ludkovice
Provozovatel:	Povodí Moravy, s. p.
Okres:	Luhačovice
Kraj:	Zlínský
Tok:	Ludkovický potok
Číslo hydrologického pořadí:	4-13-01-106

b. Historie VD Ludkovice

Jednou z nejmenších nádrží v celém povodí Moravy je vodárenská nádrž Ludkovice, která je příkladem vodního díla vybudovaného během 60. let minulého století pro pokrytí stále rostoucí potřeby pitné vody. Ludkovický potok pramení na jižních svazích kopců mezi Vizovicemi a Luhačovicemi a jeho okolí je převážně zalesněné, jen s minimálním osídlením, což bylo výhodné pro nádrž, u které se předpokládalo zejména vodárenské využití.

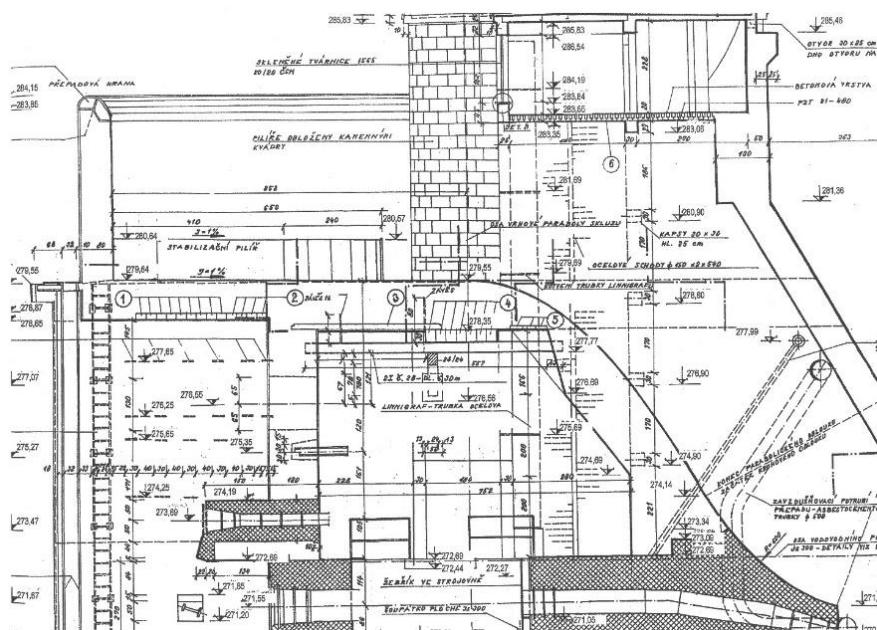
Rozhodnutí o povolení stavby bylo vydáno v prosinci 1962, výstavba probíhala v letech 1965 až 1968 podle projektové dokumentace firmy Hydroprojekt Brno. Dodavatel stavby byl národní podnik Ingstav. Zkušební provoz probíhal relativně dlouho, až do roku 1975.

Hráz je zemní, sypaná z místních hlinitých štěrků. Těsnění hráze zajišťuje jílovitá vrstva na návodní straně, krytá dvojrstevným filtrem a kamenným pohozem. Jílovité těsnění na návodní straně je zavázáno až do vrstev jílovců a pískovců v podloží, kde byla provedena injekční clona do hloubky asi 35 m. Manipulaci s vodou zajišťuje sdružený funkční objekt u pravého břehu.

c. Charakteristika VD Ludkovice

Hlavními účely vodního díla jsou:

- akumulace pro dodávku surové vody do úpravně Ludkovice, v množství do $24,5 \text{ l.s}^{-1}$,
- zásobením města Luhačovic, lázní a přilehlých obcí pitnou a užitkovou vodou,
- zajištění průtoků v Ludkovickém potoce v minimálním množství $MQ = 5,0 \text{ l.s}^{-1}$.



Obr. 3 Původní výkresová dokumentace hráze (místní výškový systém)

Základní výškové parametry vodního díla:

– kóta přelivné hrany	284,15 m n. m.
– maximální hladina v nádrži	285,05 m n. m.
– mezní bezpečná hladina (MBH)	285,55 m n. m.
– kóta koruny hráze	285,50 m n. m.

Hydrologické údaje:

– plocha povodí	13,1 km ²
– průměrné dlouhodobé roční srážky	733 mm
– průměrný dlouhodobý roční průtok Q_a	0,092 m ³ .s ⁻¹
– neškodný odtok $Q_{NEŠ}$	6,7 m ³ .s ⁻¹

Tab. 3. m-denní průtoky, ČHMÚ, 2003

m [dny]	30	90	180	270	330	355	364
Q_{md} [l.s ⁻¹]	0,260	0,103	0,046	0,022	0,010	0,006	0,002

Tab. 4. N-leté průtoky, ČHMÚ, 2009

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Q_N [m ³ .s ⁻¹]	3,4	6,1	11,2	16,3	22,5	32,7	42,0	52,9	69,9	85,0

d. Posudky bezpečnosti VD Ludkovice

V roce 1982 byl vypracován posudek „Hydraulická zabezpečení“ s výsledkem, že přehrada je z hlediska kapacity objektu na převedení povodní přijatelně zabezpečena. Další „Posudek bezpečnosti za povodní“ provedený v roce 1997 byl s výsledkem, že provozní spolehlivost a míra ochrany vodního díla za povodní je přijatelně zabezpečena. Údaje o parametrech zvláštních povodní a stupně povodňové aktivity na VD Ludkovice při nebezpečí vzniku zvláštních povodní upravuje samostatný dokument, který byl zpracován v roce 2000 jako dodatek k Programu TBD a v roce 2004 byl zahrnut do revize „Programu TBD pro trvalý provoz“. Doposud poslední posudek je „Posudek bezpečnosti VD za povodní I. revize“ provedený v roce 2011, z jehož výsledků však vyplývá, že při překročení průtoku 55 m³.s⁻¹ 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, umístěným

pod stropem chodby. Při hladinách, které by mohly být dosaženy při průchodu KPV_{1000} a současného vlnobití, by docházelo k přelévání objektu, jehož pochůzná část je v úrovni koruny hráze. Výsledkem by byl jednak znemožněný přístup na sdružený objekt a dále by docházelo i k zatápění prostoru jeho technologické části.

III. Hydrotechnický modelový výzkum

Předmětem zadaného hydraulického modelového výzkumu, uskutečněného ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze, bylo zpřesnit a ověřit funkci sdruženého objektu, odpadní chodby a vývaru při povodních a navrhnout nápravná opatření pro bezpečné převádění extrémních povodní.

VD Bojkovice a VD Ludkovice byly vybudovány na základě projektu a hydraulického posouzení z šedesátých let. Návrhové parametry jednotlivých částí funkčních zařízení byly odvozovány následovně: bezpečnostní přeliv, spadiště, skluz, odpadní chodba, vývar a koryto pod hrází na průtok Q_{100} , který byl platný v šedesátých letech minulého století. Dnešní návrhový průtok Q_{100} a kontrolní průtok Q_{1000} jsou odlišné. Z hlediska ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní, byla pro VD Bojkovice a VD Ludkovice stanovena kontrolní povodňová vlna KPV_{1000} .

IV. Podklady

Pro ověření hydraulických výpočtů, posouzení navržené úpravy ve studii opatření k bezpečnému převedení KPV_{1000} na VD Bojkovice a VD Ludkovice byly použity následující podklady:

- projektová dokumentace VD Bojkovice (Hydroprojekt Brno), 1962,
- projektová dokumentace VD Ludkovice (Hydroprojekt Brno), 1965,
- dokumentace skutečného provedení (VD-TBD a. s., Brno), 2010,
- manipulační řád pro VD BOJKOVICE na potoce Kolelač v ř. km 2,700, 2010,
- manipulační řád pro VD LUDKOVICE na Ludkovickém potoce v ř. km 6,250, 2010,
- VD Bojkovice, Posudek bezpečnosti VD za povodní, I. revize (VD-TBD, a. s., Brno), 2009,
- VD Ludkovice, Posudek bezpečnosti VD za povodní, I. revize (VD-TBD, a. s., Brno), 2009,
- fotodokumentace VD Bojkovice a VD Ludkovice, 2014,
- hydrologické údaje (ČHMÚ Praha), 2003, 2009,
- místní šetření (Králík, Kučerová), 2014,

- internetové stránky Povodí Moravy, s. p. - www.pmo.cz, 2014,
- Havlík, Marešová: Hydraulika – příklady, 1990,
- Čábelka, Gabriel: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice, 1987,
- Broža a kolektiv: Přehrady Čech, Moravy a Slezska. Liberec: Knihy 555, 2005.

V. Vstupní a modelové podmínky

Model VD Bojkovice a VD Ludkovice (přeliv, spadiště, skluz, odpadní chodba, vývar a koryto pod hrází) byl navržen a vybudován v měřítku M – 1:15. K tomuto měřítku jsme dospěli rozбором geometrických, tíhových, průtokových, časových a kvalitativních podmínek.

U Froudova typu modelové podobnosti jsou vyjádřeny podmínky dynamické podobnosti hydrodynamických jevů za výhradního působení gravitačních sil. Kromě gravitačních sil však mohou zkoumané proudění ovlivňovat i další síly – odpor třením vazké kapaliny, síly kapilární, síly objemové apod. Podle Froudova zákona podobnosti můžeme určitý hydrodynamický jev zkoumat tehdy, jestliže účinky těchto sil jsou zanedbatelné v porovnání s gravitačními silami. Mezní podmínky vymezují oblasti a měřítka, v nichž lze hydrodynamický jev modelovat. Kinematicky podobné jevy, které ovlivňuje výhradně gravitační síla, jsou dynamicky podobné, jestliže ve vzájemně příslušných

průřezech budou stejná Froudova čísla $Fr = \sqrt{\frac{\alpha v^2}{gy}}$,

$$\text{příslušné poměry jsou: } \frac{v_s^2}{gy_s} = \frac{v_m^2}{gy_m}$$

kde v_s ... rychlost ve skutečnosti

y_s ... průměrná hloubka ve skutečnosti

v_m ... rychlost na modelu

y_m ... průměrná hloubka na modelu.

Při modelování jevů proudění podle Froudova zákona se může uplatnit povrchové napětí vody. Povrchové napětí se neuplatní tehdy, pokud je přepadová výška na modelu $h \geq 20$ mm. Pokud je $h \leq 20$ mm pak přechází tvar přepadajícího paprsku vlivem kapilárních sil téměř do přímky. Povrchová rychlost proudu na objektových modelech má být $u \geq 230 \text{ mm.s}^{-1}$, aby kapilární síly nebránily tvoření povrchových vln vlivem gravitačních sil. Při modelování podle Froudova zákona

musí být světlá šířka přelivného pole na modelu $b_0 \geq 60$ mm. Výtokový otvor musí být $a \geq 60$ mm, aby jev výtoku a tvar výtokového paprsku nebyly nepříznivě ovlivňovány drsností dna a stěn účinkem povrchového napětí. Hloubka vodního proudu na modelu musí být $h \geq 15$ mm – důležité hlavně u říčních modelů. Na modelu je nutné zachovat stejný režim proudění jako na skutečném díle. Při modelování otevřených koryt podle Froudova zákona se můžeme setkat s prouděním říčním, u něhož je $Fr < 1$, kritickým u kterého je $Fr = 1$ nebo s prouděním bystřinným s $Fr > 1$. To je možné zajistit především volbou měřítka modelu a také zajištěním redukované drsnosti omáčených ploch.

VI. Měřítka podobnosti

Na základě geometrické podobnosti se určí měřítko délek M_l . Potom pro měřítko rychlostí platí $M_v = M_l^{1/2}$, pro měřítko průtoků platí $M_Q = M_l^{5/2}$ a pro měřítko času platí $M_t = M_l^{1/2}$.

Měřítka modelu je určeno na základě mezních podmínek modelové podobnosti, možností laboratoře, konstrukčních možností a podmínek reprezentativního výzkumu. Z těchto podmínek bylo zvoleno měřítko $M_l = 1:15$. Celý model má délku $L = 7,0$ m, výšku $H = 1,6$ m a šířku $B = 1,0$ m. Voda je k modelu VD Bojkovice a VD Ludkovice přiváděna rozváděcím potrubím v laboratoři, průtok je měřen pomocí indukčních průtokoměrů (samostatně pro přeliv a pro spodní výpusti); voda je uklidněna v uklidňovací nádrži (3 m x 3 m x 1 m). Voda z modelu je odvedena sběrnou nádrží do podzemních prostor vodohospodářské laboratoře, kde je umístěna centrální sběrná nádrž pro akumulaci vody.

Měřítka rychlostí je $M_v = 3,87$, měřítko průtoků je $M_Q = 871$, měřítko pulsací (metry ve skutečnosti) je $M_p = 15$ a měřítko času je $M_t = 3,87$. Převod průtoků ve skutečnosti na průtoky na modelu je uveden v tabulce č. 5 a č. 6.

Tab. 5. Přepočty průtoků ze skutečnosti na model pro VD Bojkovice

roky opakování	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
průtok ve skutečnosti [m^3s^{-1}]	3,4	6,5	12,1	17,7	24,4	35,2	45,0	56,3	73,9	89,4
průtok na modelu [ls^{-1}]	3,9	7,5	13,9	20,3	28,0	40,4	51,6	64,6	84,8	102,6

Tab. 6. Přepočty průtoků ze skutečnosti na model pro VD Ludkovice

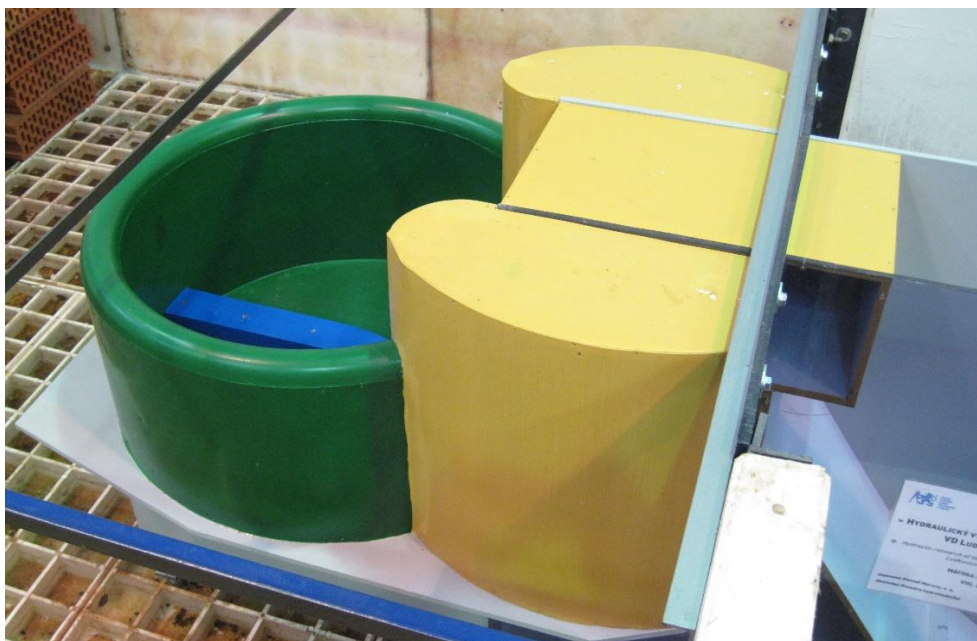
roky opakování	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
----------------	---	---	---	----	----	----	-----	-----	-----	------

Hydraulický model VD Bojkovice a VD Ludkovice je zhotoven převážně z plastových materiálů (PVC – tvrzené, PVC – pěnné, PVC – průhledné), z pozinkovaného plechu, překližkových příčných profilů a ocelových nosníků. Barevné řešení modelu je důležité především pro přehlednou dokumentaci (foto a video). Rozdělení částí modelu do barevných skupin je následující:

- šedá – skluz, levá stěna skluzu a základní konstrukce sdruženého objektu,
- okrová – strojovna, pilíře na přelivu a horní přechodová oblast skluzu a přelivu,
- modrá – vývar, usměrňovací křídlo ve spadišti, rozrážeče a koryto pod vodním dílem,
- bílá – zavzdušňovací potrubí, stěny uklidňovací nádrže a nosné konstrukce částí modelu,
- zelená – přeliv, spadiště a dno odpadní chodby,
- průhledná – pravá stěna skluzu, stěny, strop odpadní chodby a vodárenské potrubí,
- oranžová – rozrážeče,
- žlutá, hnědá, červená, šedá, černá, fialová, růžová, oranžová – úprava sdruženého objektu.

Barevné řešení modelu výrazně ulehčuje orientaci jak ve výkresové dokumentaci, tak na fotodokumentaci i na modelu v laboratoři. Usnadňuje i vyhodnocení každého pokusu a orientaci v pořízené dokumentaci v závislosti na různých variantách úpravy sdruženého objektu a rozrážečů ve vývaru. Vyhodnocení každého pokusu je prováděno na základě podrobné fotodokumentace, video dokumentace, ale především na základě měření poloh hladiny v nádrži, odečtení průtoku a měření pulsací ve spadišti a odpadní chodbě pomocí tlakových sond.

Výrobní tolerance modelu VD Bojkovice a VD Ludkovice byla ± 1 mm – tj. ve skutečnosti ± 15 mm.



Obr. 6 Foto modelu VD Bojkovice a VD Ludkovice – sdružený objekt



Obr. 7 Foto modelu VD Bojkovice a VD Ludkovice – odpadní chodba a vývar

VIII. Měření veličin na fyzikálním modelu

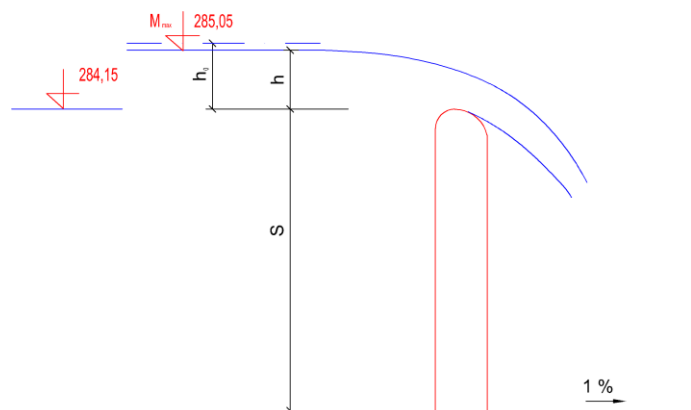
Průtok modelem byl měřen pomocí indukčních průtokoměrů (samostatně pro přeliv a pro spodní výpusti). Přesnost měření průtoků je $\pm 1\%$, rozsah měřených průtoků byl od $3,9 \text{ l.s}^{-1}$ do $102,6 \text{ l.s}^{-1}$. Na ustálení každého průtoku a hladiny bylo potřeba vždy čekat cca 20 minut.

Poloha hladiny v nádrži a v korytě pod hrází byla odečítána pomocí hrotových měřítek a pomocí ultrazvuku. Tlak a tlakové pulzace byly dokumentovány pomocí tlakových sond (spadiště a odpadní chodba). Tlak na dně odpadní chodby neodpovídá hloubce vody, protože odběrné místo není kolmo na proudnice v daném místě (proud vody do odběru vchází šikmo, proto je v měření v tlakové sondě zachycena i část rychlostní výšky). Hladina v odpadní chodbě byla měřena pomocí nalepených měřítek, v průběhu měření byly pořizovány fotografie a video záznam.

Součástí experimentů bylo také vizuální sledování jednotlivých hydraulických jevů na sdruženém objektu, v odpadní chodbě a ve vývaru. Zároveň byla prováděna podrobná fotodokumentace a následné vyhodnocení proudění vody (směr rotace proudu, provzdušnění).

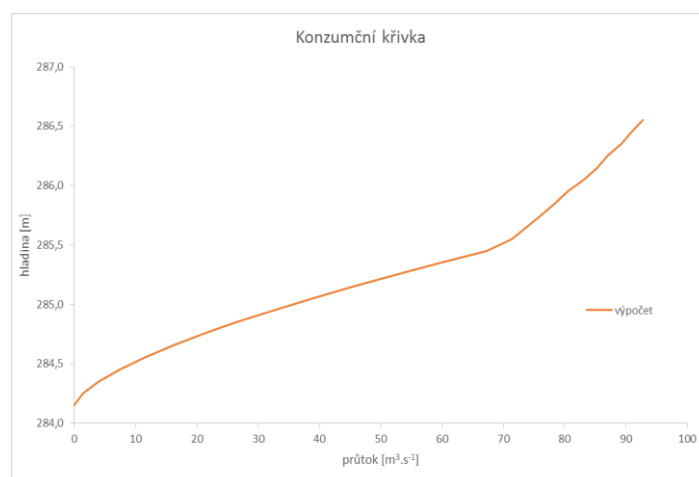
IX. Hydraulické výpočty na vodním díle

Bezpečnostní přeliv



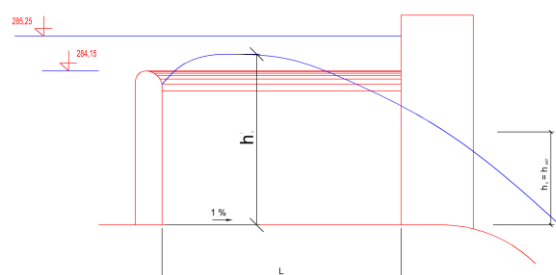
Obr. 8 Schéma bezpečnostního přelivu

Bezpečnostní přeliv je neovlivněný dolní vodou ze spadiště do průtoků cca Q_{500} . Pro vyšší průtoky Q_{500} a Q_{1000} je třeba ve výpočtech uvažovat součinitel zatopení.



Obr. 9 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu

Spadiště

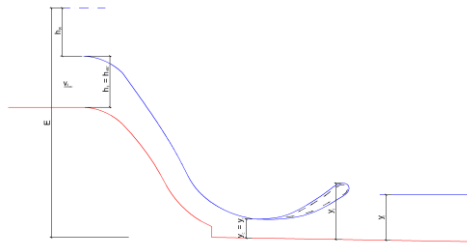


Obr. 10 Schéma spadiště

Tab. 7. Výpočet spadiště

	průtok	kritická hloubka	G	h'_n	h'_n
	$[m^3.s^{-1}]$	$[m]$		$[m]$	$[m]$
	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Q_1	3,4	0,41	0,21	0,66	0,79
Q_2	6,1	0,61	0,14	1,04	1,09
Q_5	11,2	0,92	0,09	1,56	1,68
Q_{10}	16,3	1,18	0,07	2,00	2,10
Q_{20}	22,5	1,46	0,06	2,48	2,63
Q_{50}	32,7	1,87	0,05	3,19	3,30
Q_{100}	42,0	2,21	0,04	3,76	3,94
Q_{200}	52,5	2,57	0,03	4,37	4,61
Q_{500}	69,9	3,11	0,03	5,29	5,59
Q_{1000}	85,0	3,54	0,02	6,02	6,35

Skluz

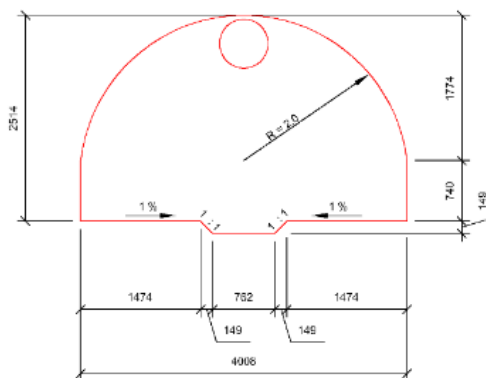


Obr. 11 Schéma skluzu

Tab. 8. Výpočet skluzu

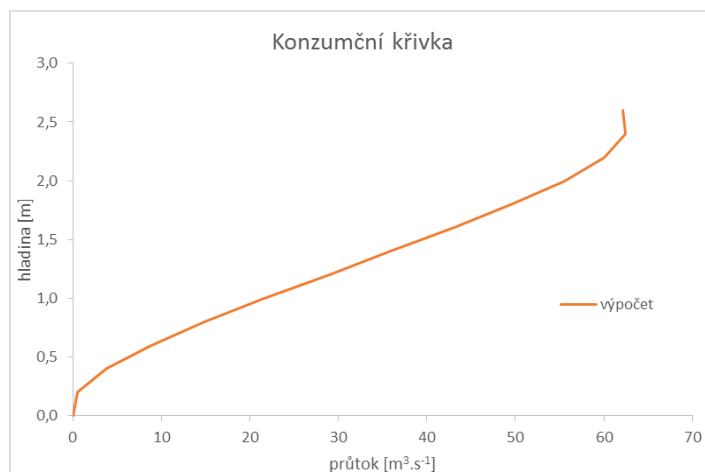
kritická hloubka na začátku skluzu		průtok	rychlost	energetická výška	hloubka na začátku chodby		hloubka na začátku chodby (pomocná)
[m]		[m ³ s ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[m]	[m]		[m]
0,00		0,0	0,00	9,00	0,00		0,00
0,41	Q ₁	3,4	2,02	9,62	0,06		0,06
0,61	Q ₂	6,1	2,45	9,92	0,11		0,11
0,92	Q ₅	11,2	3,00	10,38	0,19		0,19
1,18	Q ₁₀	16,3	3,40	10,77	0,28		0,28
1,46	Q ₂₀	22,5	3,79	11,19	0,38		0,38
1,87	Q ₅₀	32,7	4,29	11,81	0,54		0,54
2,21	Q ₁₀₀	42,0	4,66	12,32	0,68		0,68
2,57	Q ₂₀₀	52,5	5,02	12,85	0,84		0,84
3,11	Q ₅₀₀	69,9	5,52	13,66	1,09		1,09
3,54	Q ₁₀₀₀	85,0	5,90	14,31	1,31		1,31

Odpadní chodba – rovnoměrné proudění



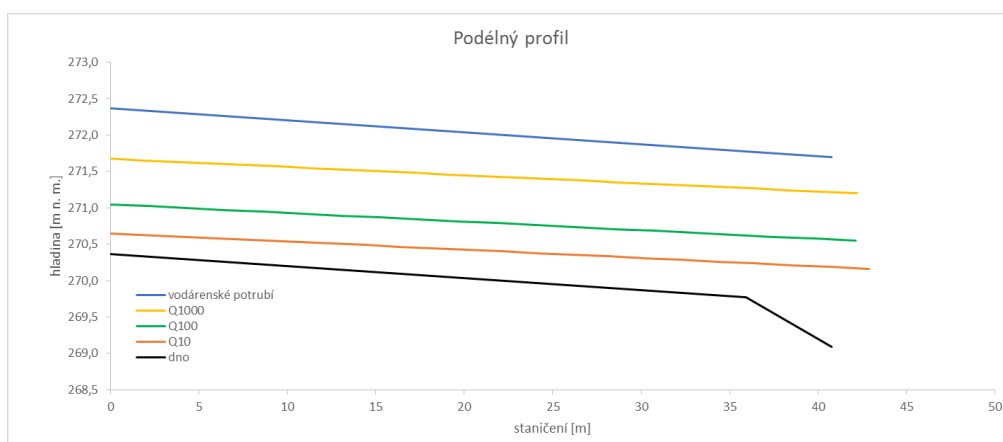
Obr. 12 Schéma odpadní chodby

Podle výpočtu vznikne v odpadní chodbě rovnoměrné proudění po cca 150 m, což znamená, že na délce odpadní chodby u VD Bojkovice 37,179 m a u VD Ludkovice 40,665 m nemůže dojít k rozvoji rovnoměrného proudění. Výpočet proudění vody v odpadní chodbě byl proveden za předpokladu drsnostního součinitele $n = 0,017$.



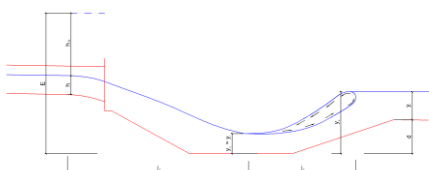
Obr. 13 Konzumční křivka odpadní chodby

Odpadní chodba – nerovnoměrné proudění



Obr. 14 Podélný profil hladin v odpadní chodbě

Vývar



Obr. 15 Schéma vývaru

Předpoklad výpočtů vývaru je, že šířka odpadní chodby je stejná jako šířka vývaru, což není splněno (vývar je širší o 1 m). Proto nevychází zatopení dolní vodou již při průtoku Q_{100} .

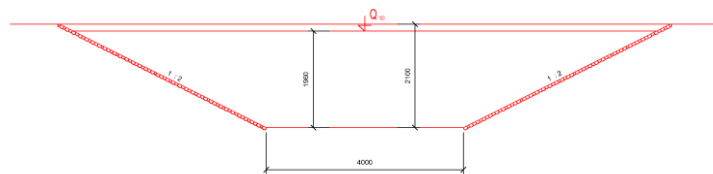
Tab. 9. Výpočet vývaru pro VD Bojkovice

průtok Q_{10}	17,50	$[m^3 s^{-1}]$	průtok Q_{100}	45,00	$[m^3 s^{-1}]$	průtok Q_{1000}	92,00	$[m^3 s^{-1}]$
výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]
rychlost	11,7	$[ms^{-1}]$	rychlost	14,3	$[ms^{-1}]$	rychlost	15,8	$[ms^{-1}]$
délka doskoku	12,07	[m]	délka doskoku	14,83	[m]	délka doskoku	16,39	[m]
šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]
energetická výškov výška	12,68	[m]	energetická výškov výška	16,62	[m]	energetická výškov výška	19,64	[m]
hloubka y_1	0,22	[m]	hloubka y_1	0,51	[m]	hloubka y_1	0,96	[m]
hloubka y_1 (pomocná)	0,22	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,51	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,96	[m]
hloubka y_2	3,23	[m]	hloubka y_2	5,46	[m]	hloubka y_2	8,01	[m]
délka vodního skoku	18,0	[m]	délka vodního skoku	29,7	[m]	délka vodního skoku	42,3	[m]
Y_d	1,1	[m]	Y_d	2,2	[m]	Y_d	3,8	[m]
zatopení	1,27		zatopení	0,95		zatopení	0,85	

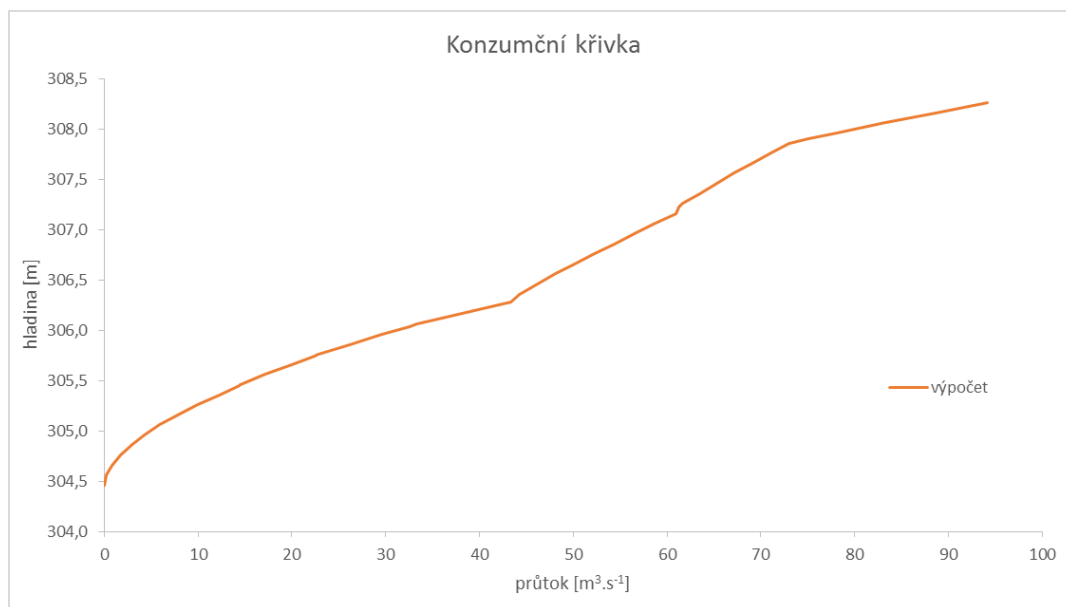
Tab. 10. Výpočet vývaru pro VD Ludkovice

průtok Q_{10}	16,30	$[m^3 s^{-1}]$	průtok Q_{100}	42,00	$[m^3 s^{-1}]$	průtok Q_{1000}	85,00	$[m^3 s^{-1}]$
výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]
rychlost	10,6	$[ms^{-1}]$	rychlost	14,3	$[ms^{-1}]$	rychlost	15,3	$[ms^{-1}]$
délka doskoku	10,95	[m]	délka doskoku	14,78	[m]	délka doskoku	15,83	[m]
šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]
energetická výškov výška	11,46	[m]	energetická výškov výška	16,51	[m]	energetická výškov výška	18,72	[m]
hloubka y_1	0,22	[m]	hloubka y_1	0,47	[m]	hloubka y_1	0,91	[m]
hloubka y_1 (pomocná)	0,22	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,47	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,91	[m]
hloubka y_2	3,03	[m]	hloubka y_2	5,28	[m]	hloubka y_2	7,61	[m]
délka vodního skoku	16,9	[m]	délka vodního skoku	28,8	[m]	délka vodního skoku	40,2	[m]
Y_d	1,2	[m]	Y_d	2,0	[m]	Y_d	2,7	[m]
zatopení	1,4		zatopení	0,9		zatopení	0,7	

Koryto pod vodním dílem Bojkovice

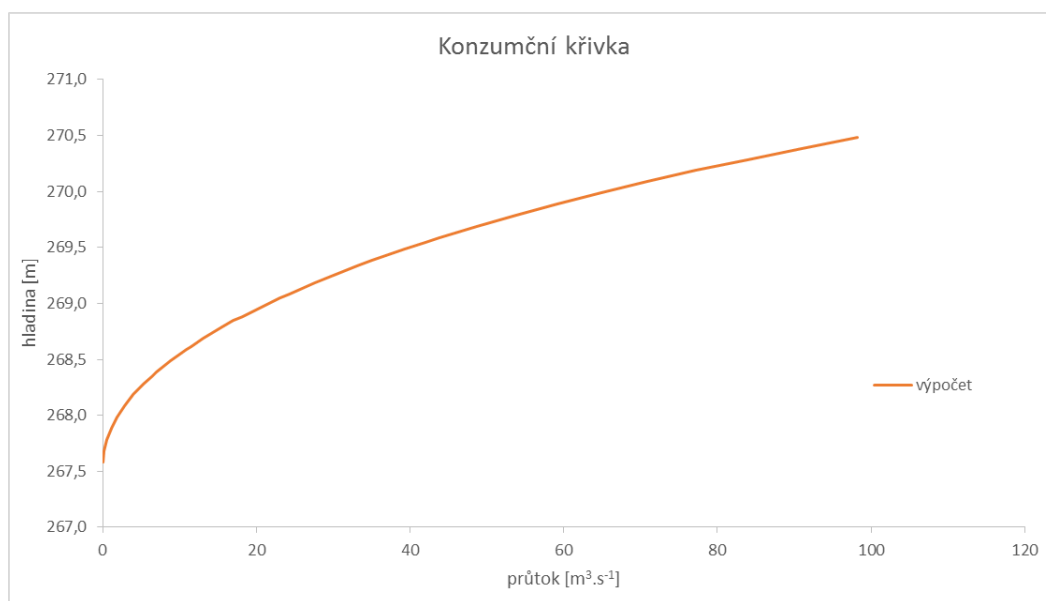


Obr. 16 Schéma koryta pod vodním dílem



Obr. 17 Konzumční křivka koryta pod vodním dílem Bojkovice

Koryto pod vodním dílem Ludkovice



Obr. 18 Konzumční křivka koryta pod vodním dílem Ludkovice

X. Program experimentů

Všechny pokusy byly provedeny za těchto předpokladů:

- model odpovídá dokumentaci skutečného provedení,
- nátok vody na model odpovídá velké nádrži – rychlostní výška je téměř nulová,
- odtok vody z vývaru odpovídá zatopení dolní vodou dle podkladů,
- kapacita spodních výpustí byla převzata z manipulačního řádu,
- ustálení průtoku a hladiny bylo po 20 minutách, po této době se započalo s odečítáním průtoku, hladin a měřením s tlakovými sondami,
- fotodokumentace byla pořizována při každém odečítání hladin a odpovídajícímu průtoku a při každé variantě v počtu cca 5 fotografií,
- video záznam byl pořizován v průběhu měření při průtocích odpovídajících povodňovým průtokům Q_{10} , Q_{100} a Q_{1000} .

Tab. 11. Přehled pokusů a měření na modelu VD Bojkovice

	popis měření
Měření 36	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna
Měření 37	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms
Měření 38	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), levá spodní výpust, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna
Měření 39	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), pravá spodní výpust, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna
Měření 40	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), obě spodní výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

Tab. 12. Přehled pokusů a měření na modelu VD Ludkovice

	popis měření
Měření 1	konzumční křivka, bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, bez spodních výpustí
Měření 2	bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, levá spodní výpust
Měření 3	bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, pravá spodní výpust
Měření 4	bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, obě spodní výpustí

Měření 5	stávající stav (zavzdušnění, vodovodní potrubí) - bez spodních výpustí
Měření 6	stávající stav - obě spodní výpusti
Měření 7	stávající stav - levá spodní výpust - rozrážeče ve vývaru (5ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2)
Měření 8	stávající stav - pravá spodní výpust - rozrážeče ve vývaru (5ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2)
Měření 9	stávající stav bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 10	zkrácená přelivná hrana, ve vývaru 3 rozrážeče (1x1x1 m, 2-1), bez spodních výpustí
Měření 11	zkrácená přelivná hrana, ve vývaru 3 rozrážeče (1x1x1 m, 2-1), bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 12	zavzdušnění, posunuty rozrážeče o 1 m ke konci vývaru, bez spodních výpustí
Měření 13	zavzdušnění, posunuty rozrážeče o 1 m ke konci vývaru, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 14	na přelivné hraně přidány 2 usměrňovací křídla, bez spodních výpustí
Měření 15	na přelivné hraně přidány 2 usměrňovací křídla, bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 16	dno spadiště se sklonem 11,8%, bez spodních výpustí
Měření 17	dno spadiště se sklonem 11,8%, bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 18	žebro - výška 4 m, bez spodních výpustí
Měření 19	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), bez spodních výpustí
Měření 20	2 přímá, šikmě umístěná žebra přímo na přelivné hraně, bez spodních výpustí
Měření 21	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), současné usměrňovací žebro ve spadišti, bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m)
Měření 22	žebro - výška 4 m, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s čas. krokem 1 ms
Měření 23	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 24	2 přímá, šikmě umístěná žebra přímo na přelivné hraně, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms
Měření 25	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), současné usměrňovací žebro ve spadišti, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s čas. krokem 1 ms
Měření 26	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeč ve vývaru (1 ks, 1x1x1 m)
Měření 27	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeč ve vývaru (1 ks, 1x1x1 m) - při Q_{100} změřeny tlaky s čas. krokem 1 ms
Měření 28	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna
Měření 29	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zkosení horní hrany vtokového okna (0,5 m)

Měření 30	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zkosení horní hrany vtokového okna (1 m)
Měření 31	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), <i>bez spodních výpustí</i> , rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna
Měření 32	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), <i>bez spodních výpustí</i> , rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms
Měření 33	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, <i>levá spodní výpust</i>
Měření 34	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, <i>pravá spodní výpust</i>
Měření 35	2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, <i>obě spodní výpusti</i>

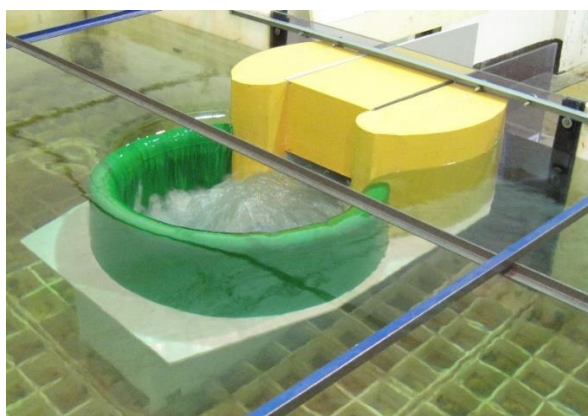
Tab. 13. Přehled variant úprav sdruženého objektu a rozrážečů ve vývaru

číslo	varianta
1	zkrácená přelivná hrana
2	zavzdušnění
3	2 usměrňovací křídla zaoblená
4	dno spadiště se sklonem 11,8%
5	rozdělovací žebro výšky 4 m
6	dvě usměrňovací žebra šířky 0,5 m, výšky 2 m
7	2 usměrňovací křídla rovinná
8	stávající žebro plus dvě usměrňovací žebra šířky 0,5 m, výšky 2 m
9	dvě usměrňovací žebra šířky 1 m, výšky 2 m
10	zaoblení horní hrany vtokového okna
11	zkosení horní hrany vtokového okna (0,5 m)
12	zkosení horní hrany vtokového okna (1 m)
13	rozrážeče ve vývaru (5 ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2)
14	rozrážeče ve vývaru (3 ks, 1x1x1 m, 2-1)
15	rozrážeče ve vývaru posunuty do poslední třetiny vývaru (3ks, 1x1x1 m, 2-1)
16	rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m)
17	rozrážeče ve vývaru (1 ks, 1x1x1 m)

a. Ověření současného stavu (měření 1 až 8)

Měření 1, VD Ludkovice: konzumní křivka, bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, bez spodních výpustí

Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Chybí zde podélné usměrňovací žebro, zavzdušnění a vodárenské potrubí. Při tomto pokusu byly pozorovány nepřípustné pulzace vody ve spadišti, které se propagovaly až do odpadní chodby. Účelem dalšího výzkumu bylo eliminovat pulzace vody ve spadišti.

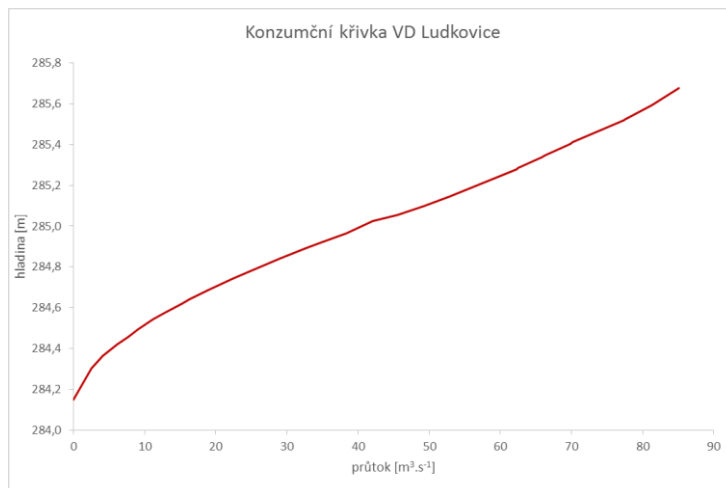


Obr. 19 Foto z měření 1 při Q_{100}

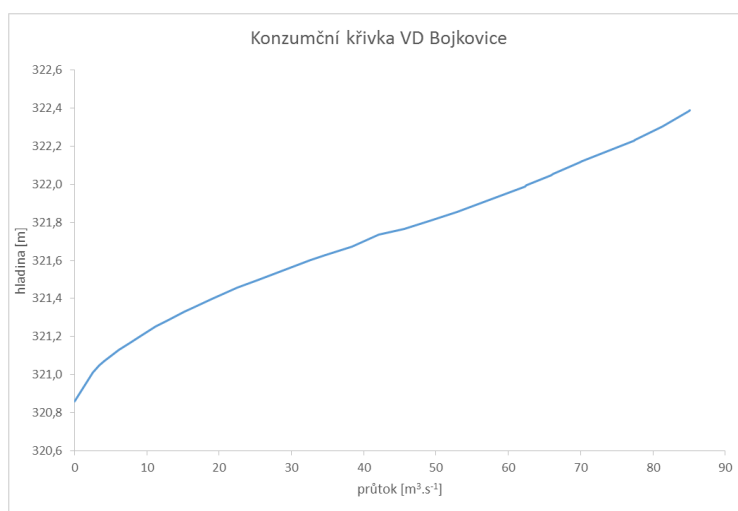
Při průtoku Q_{500} vývar neplní svoji funkci, proto v další části výzkumu jsme se zabývali účinným tlumením kinetické energie vody ve vývaru.



Obr. 20 Foto z měření 1 při Q_{500}

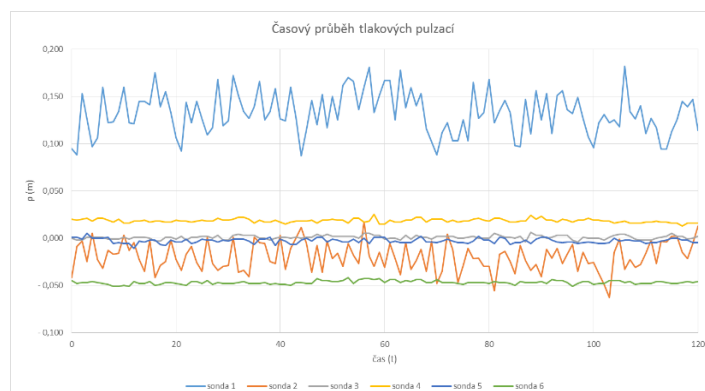


Obr. 21 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu VD Ludkovice



Obr. 22 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu VD Bojkovice

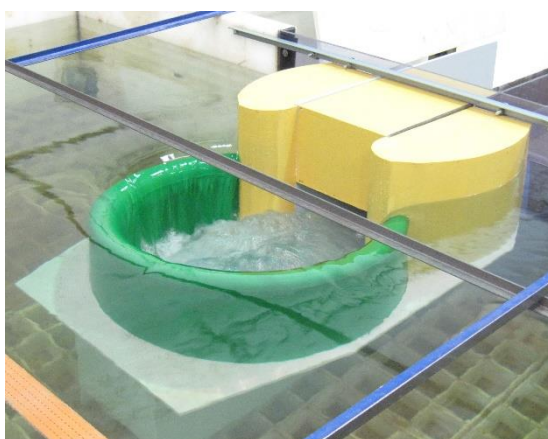
Poznámka: Měření bylo provedeno na modelu VD Ludkovice a výsledky byly následně převedeny do výškového systému VD Bojkovice



Obr. 23 Časový záznam tlakových sond

Měření 2, VD Ludkovice: bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, levá spodní výpust

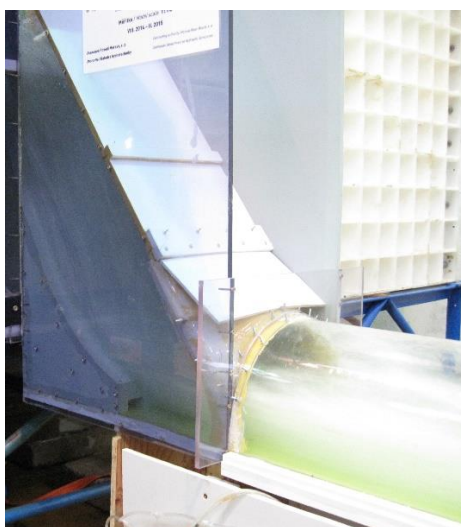
Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Chybí zde stávající podélné usměrňovací žebro, zavzdušnění a vodárenské potrubí. Levá spodní výpust otevřena.



Obr. 24 Foto z měření 2 při Q_{100}

Měření 3, VD Ludkovice: bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, pravá spodní výpust

Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Chybí zde stávající podélné usměrňovací žebro, zavzdušnění a vodárenské potrubí. Pravá spodní výpust otevřena.



Obr. 25 Foto z měření 3 při Q_{100}

Měření 4, VD Ludkovice: bez vodárenského potrubí, bez zavzdušnění, obě výpusti

Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Chybí zde stávající podélné usměrňovací žebro, zavzdušnění a vodárenské potrubí. Obě spodní výpusti otevřeny.



Obr. 26 Foto z měření 4 při Q_{100}

Měření 5, VD Ludkovice: stávající stav (zavzdušnění, vodovodní potrubí) – bez spodních výpustí

Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle.



Obr. 27 Foto z měření 5 při Q_{100}

Měření 6, VD Ludkovice: stávající stav - obě spodní výpusti

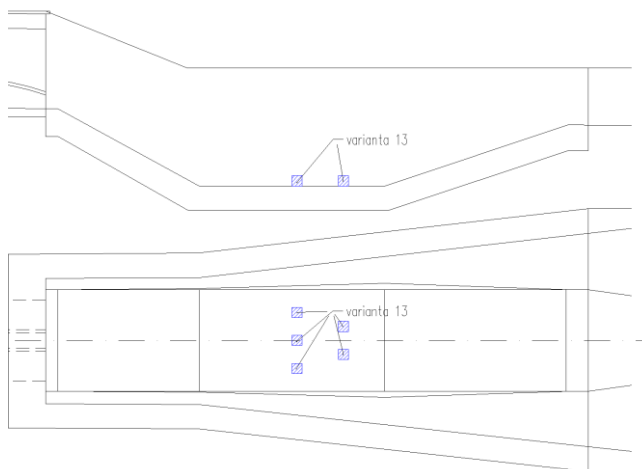
Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Z obrázku je patrné, že vývar neplní funkci při průtoku Q_{500} .



Obr. 28 Foto z měření 6 při Q_{500}

Měření 7, VD Ludkovice: stávající stav - levá spodní výpust - rozrážeče ve vývaru (5ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2)

Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Z obrázku 30 je patrné, že vývar neplní funkci při průtoku Q_{1000} .



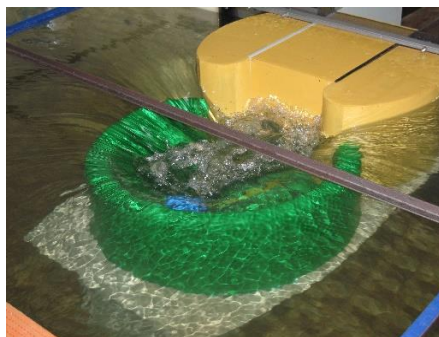
Obr. 29 Výkres rozrážečů ve vývaru



Obr. 30 Foto z měření 7 při $Q_{1\,000}$

Měření 8, VD Ludkovice: stávající stav - pravá spodní výpust - rozrážeče ve vývaru (5ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2)

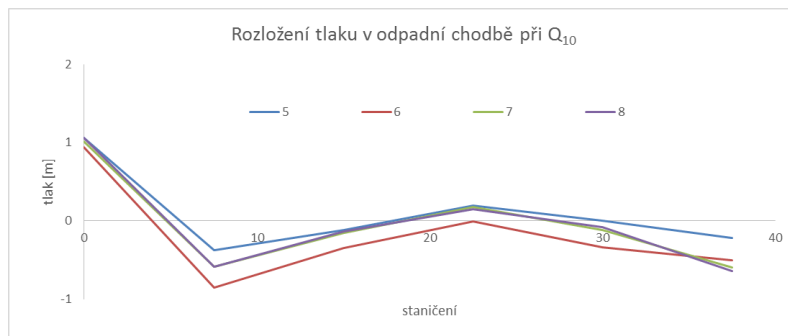
Tato varianta je pro porovnání stávajícího stavu s možnými úpravami na vodním díle. Vizuálním pozorováním se zjistilo, že největší pulzace vody ve spadišti jsou při průtoku Q_{100} až Q_{200} . Tyto pulzace je nutné eliminovat pro zajištění lepší dynamické stability sdruženého objektu.



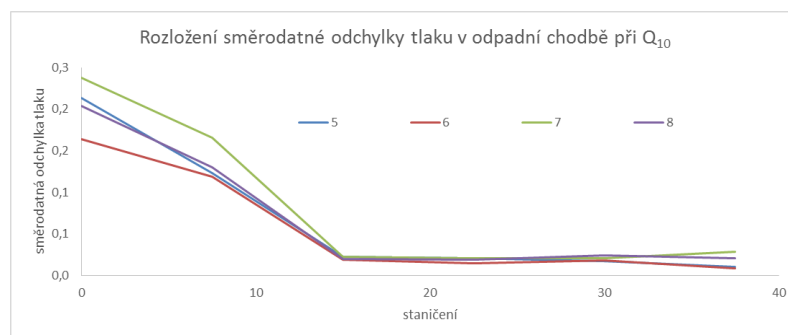
Obr. 31 Foto z měření 8 při $Q_{1\,000}$

Shrnutí 1 – měření 1 až 8 VD Ludkovice

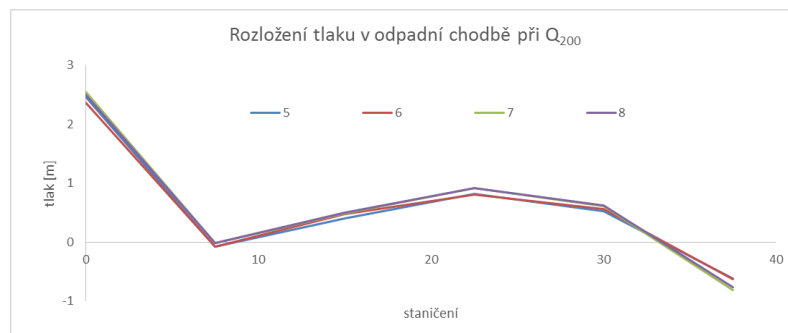
Vyhodnocení vlivu spodních výpustí na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo provedeno na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi, otevřenou levou spodní výpustí, otevřenou pravou spodní výpustí a s otevřenými oběma spodními výpustmi. Shrnutí: spodní výpusti mají malý vliv na tlak a tlakové pulzace v odpadní chodbě.



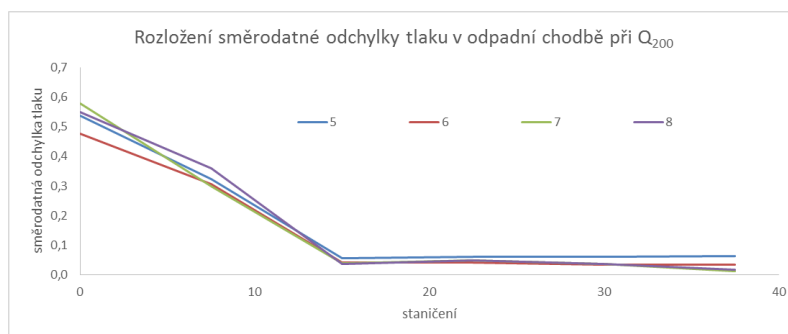
Obr. 32 Porovnání tlaků v odpadní chodbě z měření 5, 6, 7 a 8 při Q_{10}



Obr. 33 Porovnání směrodatných odchylek z měření 5, 6, 7 a 8 při Q_{10}



Obr. 34 Porovnání tlaku v odpadní chodbě z měření 5, 6, 7 a 8 při Q_{200}

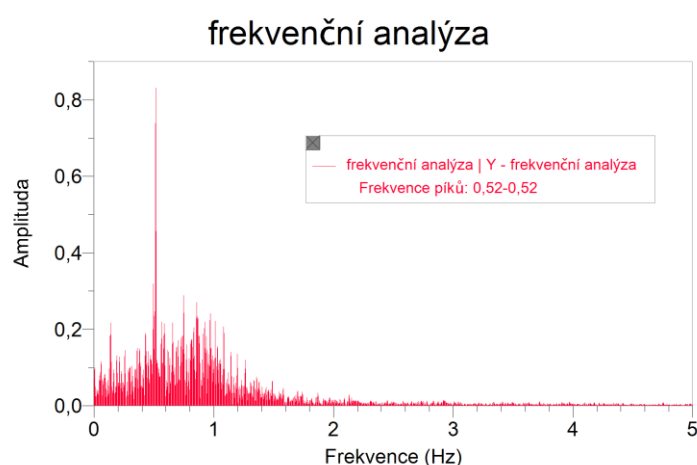


Obr. 35 Porovnání směrodatných odchylek z měření 5, 6, 7 a 8 při Q_{200}

b. Úpravy přelivu a spadiště (měření 9 až 27)

Měření 9, VD Ludkovice: stávající stav bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace jsou s výrazně dominantní frekvencí kmitání, což odpovídá pulzacím ve spadišti. Ve všech měřených místech odpadní chodby je dominantní frekvence 0,52 Hz (nebo její násobky). Z toho plyne, že tlakové pulzace se propagují až do odpadní chodby. Účelem dalších měření bylo zamezit postup pulzací tlaku do odpadní chodby.



Obr. 36 Frekvenční analýza měření 9 při Q_{100}

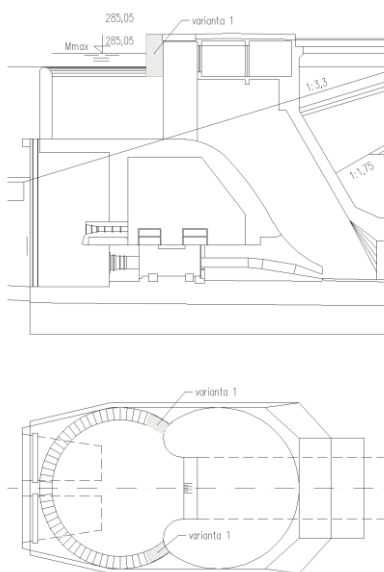


Obr. 37 Foto z měření 9 při Q_{100}

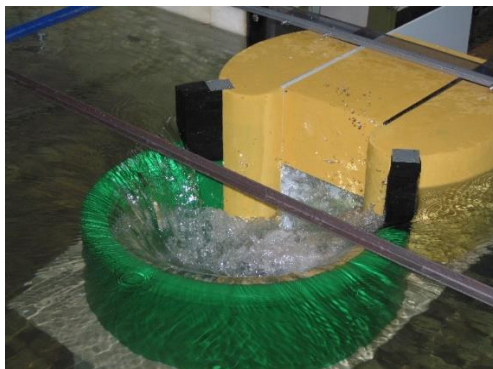
Měření 10, VD Ludkovice: zkrácená přelivná hrana, ve vývaru 3 rozrážeče (1x1x1 m, 2-1), bez spodních výpustí

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti bylo navrženo zkrácení přelivné hrany. Toto zkrácení vyblokuje část průtoku, který naráží proti hlavnímu proudu vody ve spadišti. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace nezmenšily. Negativním jevem této varianty bylo

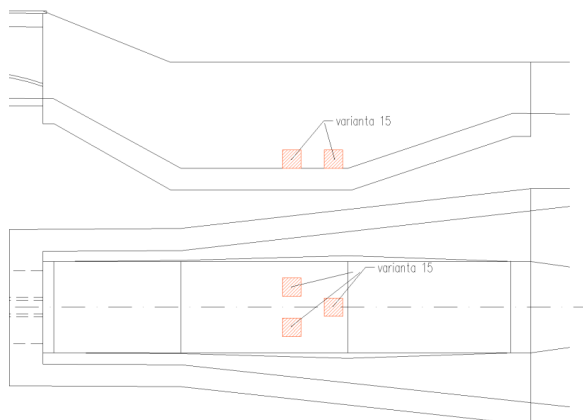
snížení kapacity bezpečnostního přelivu. Ve vývaru byly instalovány tři rozrážeče, které zajistily správnou funkci vývaru i při průtoku Q_{1000} .



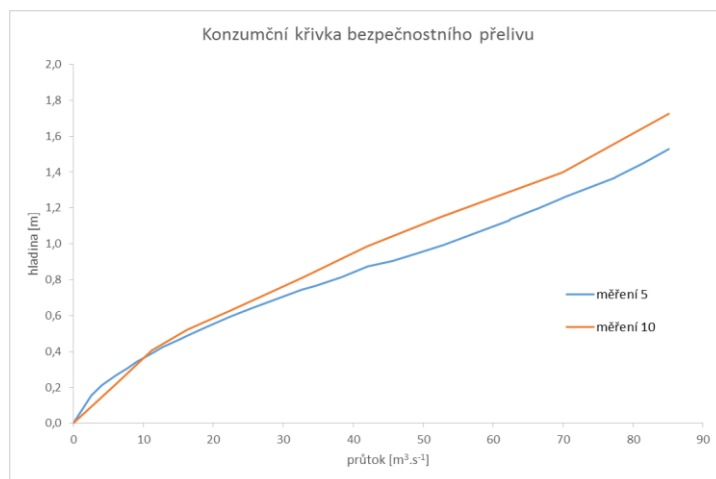
Obr. 38 Výkres zkrácení přelivné hrany



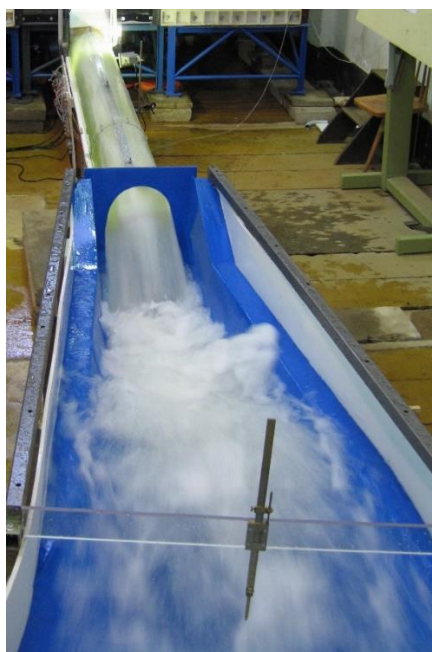
Obr. 39 Foto z měření 10 při Q_{100}



Obr. 40 Výkres rozrážečů ve vývaru



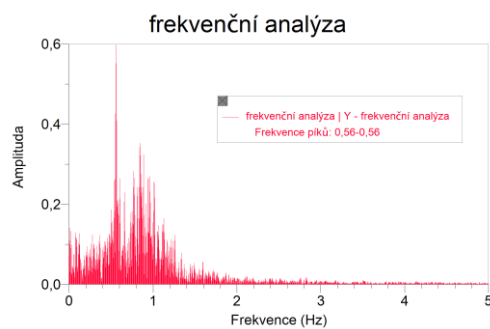
Obr. 41 Konzumční křivka stávajícího stavu (měření 5) a úprava zkrácení přelivné hrany (měření 10)



Obr. 42 Foto z měření 10 při Q_{1000}

Měření 11, VD Ludkovice: zkrácená přelivná hrana, ve vývaru 3 rozrážeče (1x1x1 m, 2-1), bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s čas. krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace jsou s výrazně dominantní frekvencí kmitání, což odpovídá pulzacím ve spadišti. Ve všech měřených místech odpadní chodby je dominantní frekvence 0,56 Hz (nebo její násobky). Z toho plyne, že tlakové pulzace se propagují až do odpadní chodby.



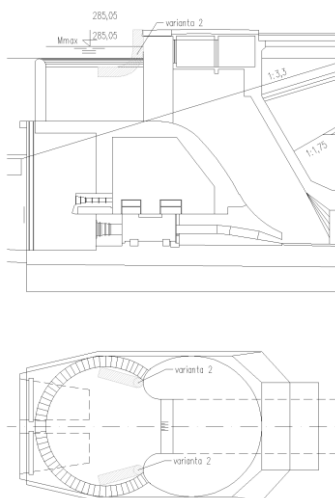
Obr. 43 Frekvenční analýza měření 11 při Q_{100}



Obr. 44 Foto z měření 11 při Q_{100}

Měření 12, VD Ludkovice: zavzdušnění, posunutí rozrážeče o 1 m ke konci vývaru, bez spodních výpustí

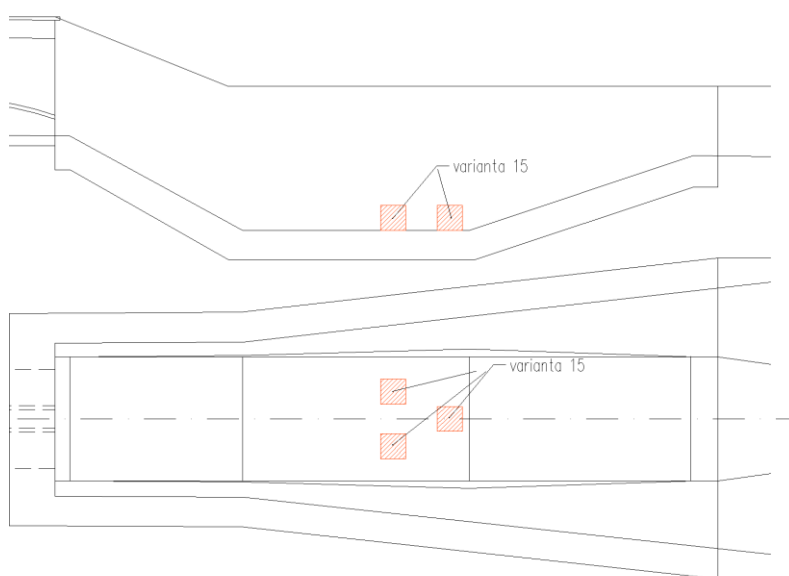
Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti bylo navrženo zavzdušnění přelivu. Tato úprava sníží pulzace přepadajícího paprsku vody, ale bohužel ve spadišti se pulzace neeliminují. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace nezmenšily. Negativním jevem této varianty bylo snížení kapacity bezpečnostního přelivu. Ve vývaru byly instalovány tři rozrážeče posunuté o 1 m ke konci vývaru, které zajistily správnou funkci vývaru i při průtoku Q_{1000} .



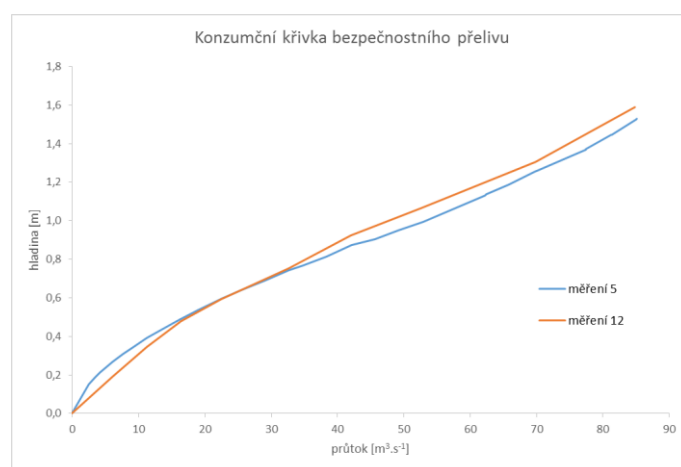
Obr. 45 Výkres zavzdušnění na přelivu



Obr. 46 Foto z měření 12 při Q_{100}



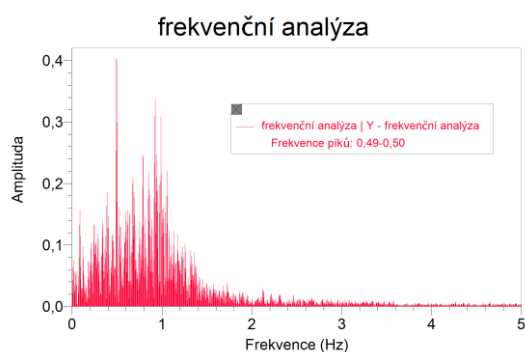
Obr. 47 Výkres rozrážeců ve vývaru



Obr. 48 Konzumční křivka stávajícího stavu (měření 5) a úprava zavzdušnění přelivu (měření 12)

Měření 13, VD Ludkovice: zavzdušnění, posunutý rozrážecí o 1 m ke konci vývaru, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



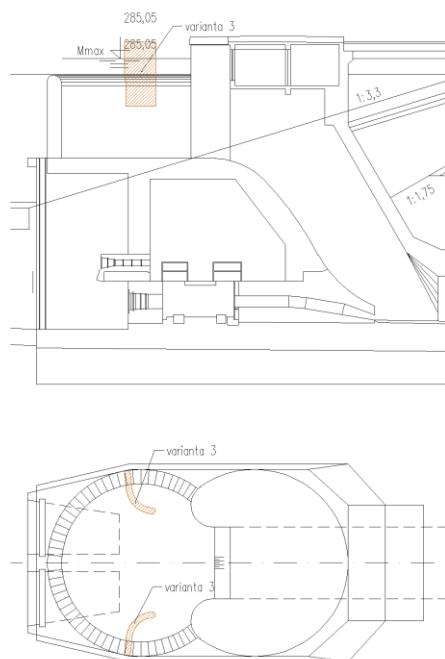
Obr. 49 Frekvenční analýza měření 13 při Q_{100}



Obr. 50 Foto z měření 13 při Q_{100}

Měření 14, VD Ludkovice: na přelivné hraně přidány 2 usměrňovací křídla, bez spodních výpustí

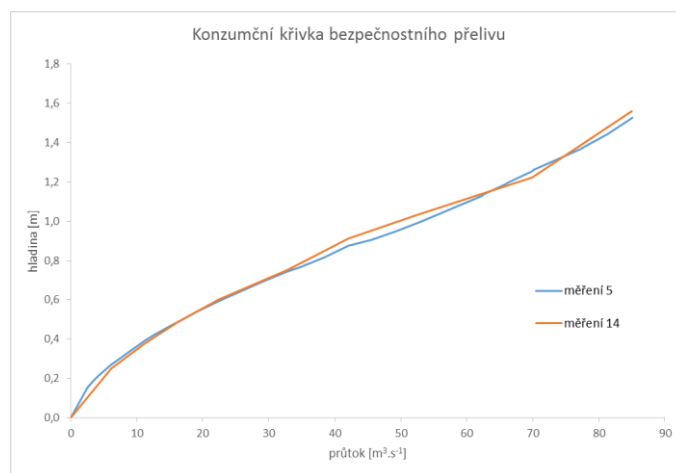
Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byly navrženy hydraulicky vhodná usměrňovací křídla na přelivu. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace nezmenšily. Negativním jevem této varianty bylo mírné snížení kapacity bezpečnostního přelivu při průtoku Q_{50} , Q_{100} a Q_{200} .



Obr. 51 Výkres usměrňovacích křídel na přelivu



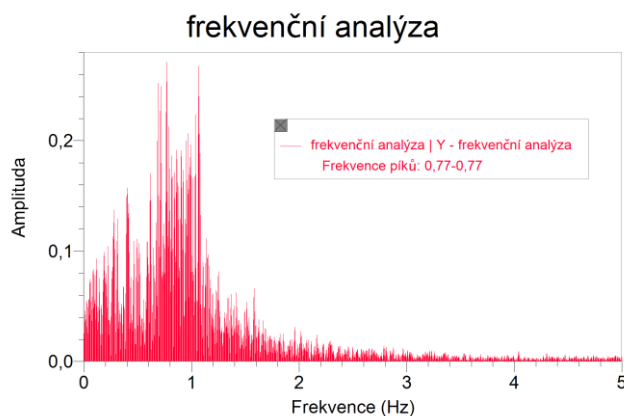
Obr. 52 Foto z měření 14 při Q_{100}



Obr. 53 Konzumční křivka stávajícího stavu (měření 5) a úpravy s 2 usměr. křídly (měření 14)

Měření 15, VD Ludkovice: na přelivné hraně přidána 2 usměrňovací křídla, bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



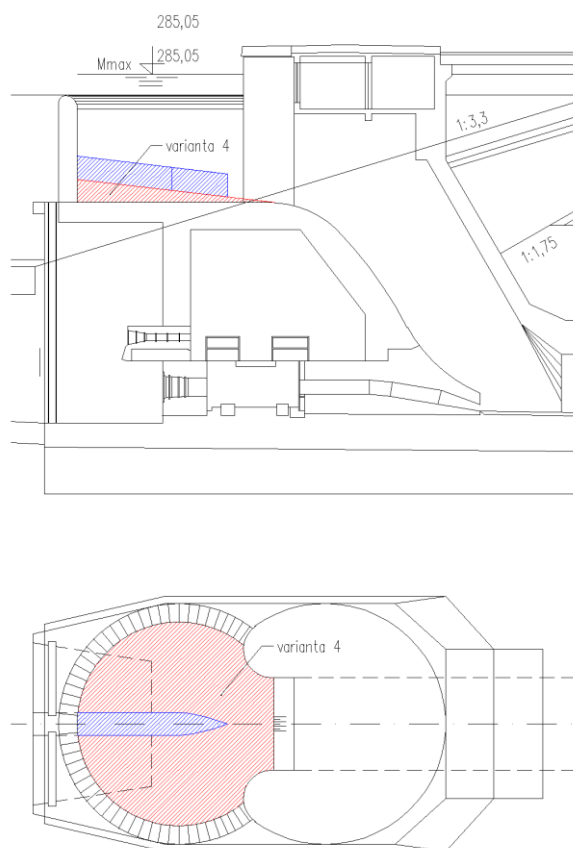
Obr. 54 Frekvenční analýza měření 15 při Q_{100}



Obr. 55 Foto z měření 15 při Q_{100}

Měření 16, VD Ludkovice: dno spadiště se sklonem 11,8%, bez spodních výpustí

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti bylo navrženo spadiště se sklonem 11,8% pro rychlejší odvod vody do skluzu. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace nezmenšily.



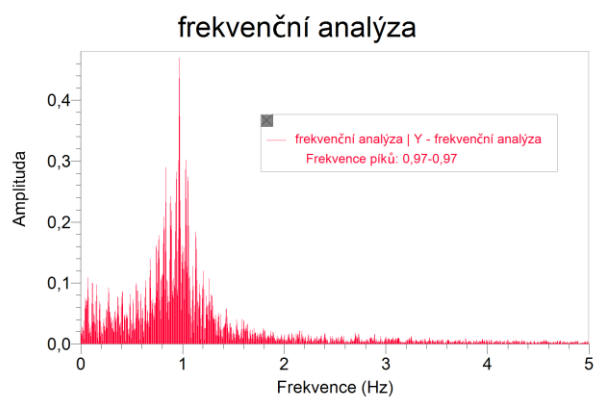
Obr. 56 Výkres spadiště se sklonem 11,8%



Obr. 57 Foto z měření 16 při Q_{100}

Měření 17, VD Ludkovice: dno spadiště se sklonem 11,8%, bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



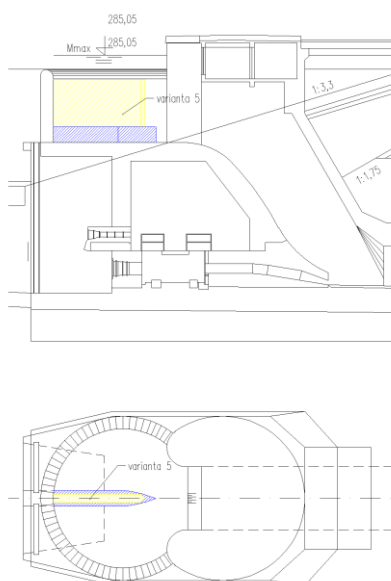
Obr. 58 Frekvenční analýza měření 17 při Q_{100}



Obr. 59 Foto z měření 17 při Q_{100}

Měření 18, VD Ludkovice: žebro - výška 4 m, bez spodních výpustí

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti bylo navrženo usměrňovací žebro ve spadišti o výšce 4 m. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace zmenšily, avšak jen do průtoku Q_{500} .



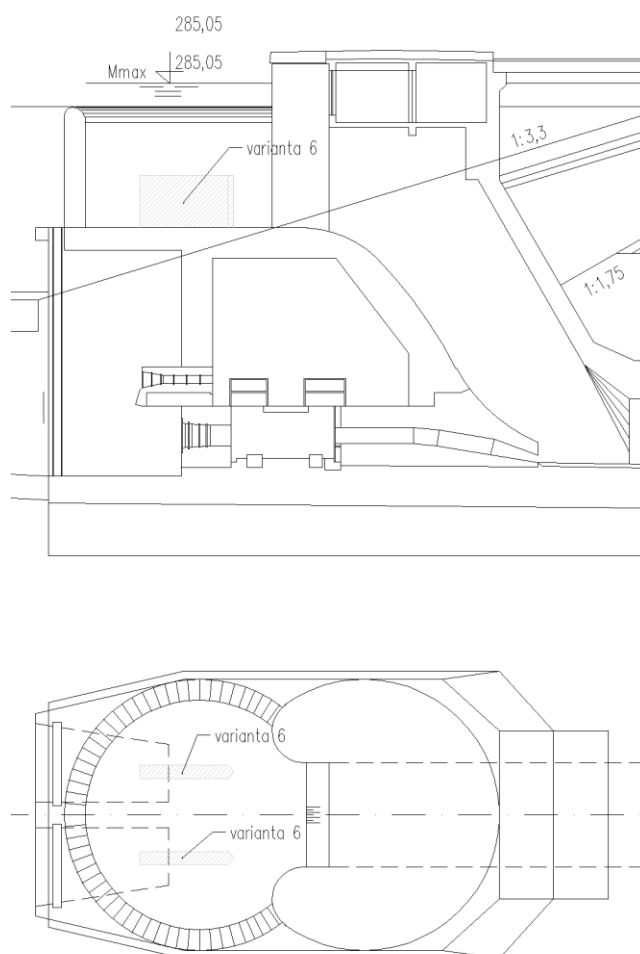
Obr. 60 Výkres spadiště s usměrňovacím žebrem výšky 4 m



Obr. 61 Foto z měření 18 při Q_{100}

Měření 19, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), bez spodních výpustí

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 0,5 m. Podle vizuálního pozorování příčné pulzace ve spadišti při všech průtocích vymizely.



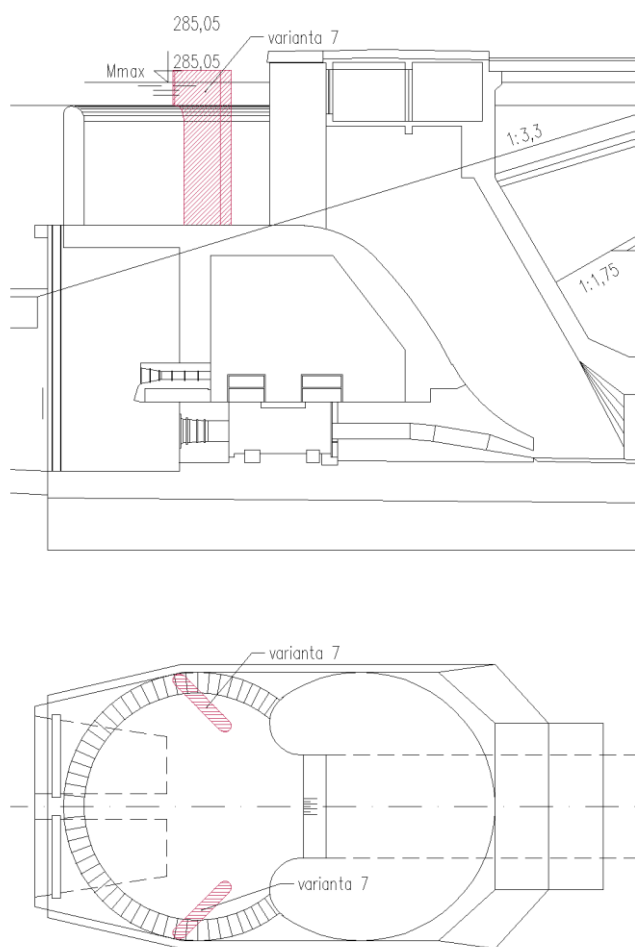
Obr. 62 Výkres rovnoběžných usměrňovacích žebířek ve spadišti



Obr. 63 Foto z měření 19 při Q_{100}

Měření 20, VD Ludkovice: 2 přímá, šikmě umístěná žebra přímo na přelivné hraně, bez spodních výpustí

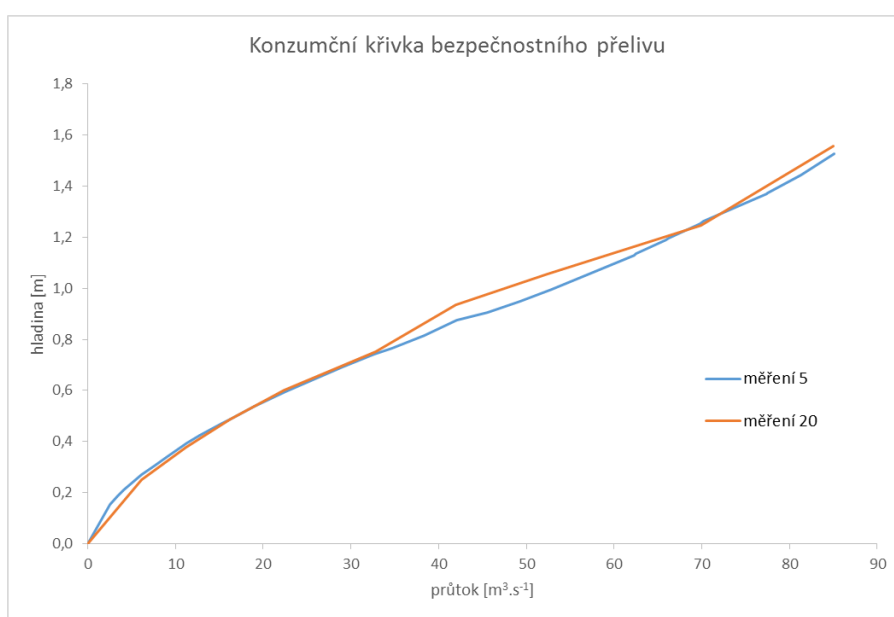
Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena rovinná usměrňovací křídla na přelivu. Podle vizuálního pozorování se příčné pulzace nezměnšily. Negativním jevem této varianty bylo mírné snížení kapacity bezpečnostního přelivu při průtoku Q_{50} , Q_{100} a Q_{200} .



Obr. 64 Výkres usměrňovacích křídel na přelivu



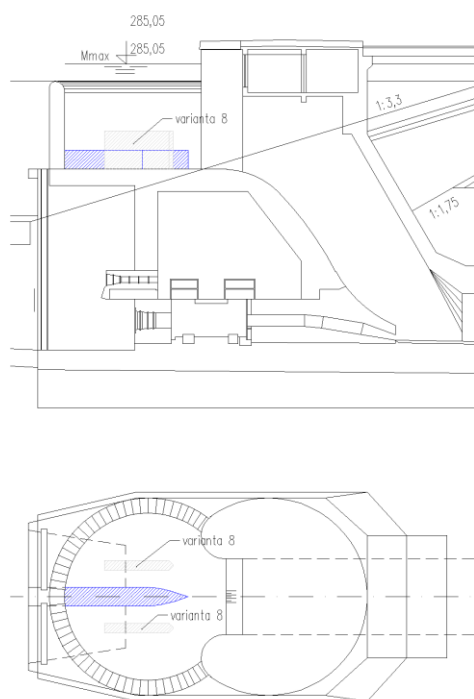
Obr. 65 Foto z měření 20 při Q_{100}



Obr. 66 Konzumční křivka stávajícího stavu (měření 5) a úprava se 2 usměř. rov. křídly (měření 20)

Měření 21, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), současné usměřňovací žebro ve spadišti, bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m)

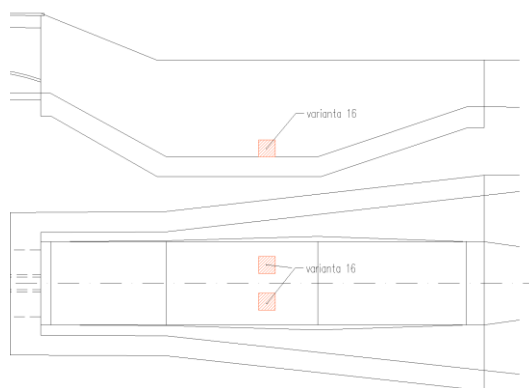
Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměřňovací žebra ve spadišti o šířce 0,5 m s ponecháním stávajícího usměřňovacího žebra. Podle vizuálního pozorování příčné pulzace ve spadišti při všech průtocích vymizely. Ve vývaru byly instalovány dva rozrážeče, které zajistily správnou funkci vývaru i při průtoku Q_{1000} .



Obr. 67 Výkres rovnoběžných usměrňovacích žeber ve spadišti



Obr. 68 Foto z měření 21 při Q_{100}



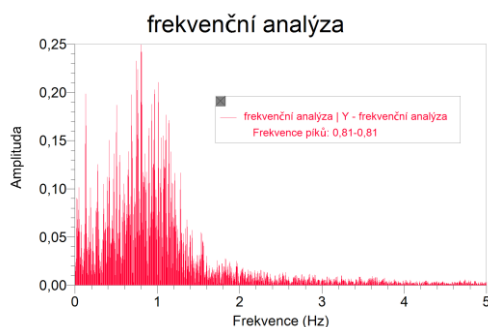
Obr. 69 Výkres rozrážců ve vývaru



Obr. 70 Foto z měření 21 při Q_{1000}

Měření 22, VD Ludkovice: žebro - výška 4 m, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



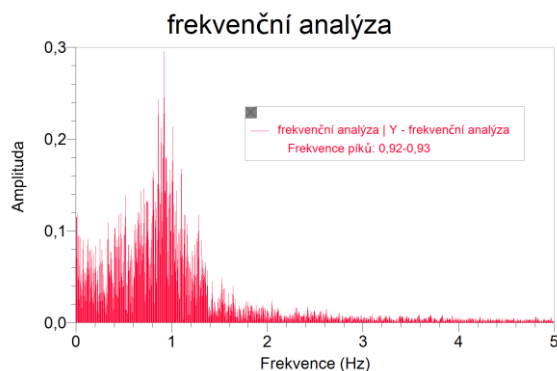
Obr. 71 Frekvenční analýza měření 22 při Q_{100}



Obr. 72 Foto z měření 22 při Q_{100}

Měření 23, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), bez spodních výpustí – při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



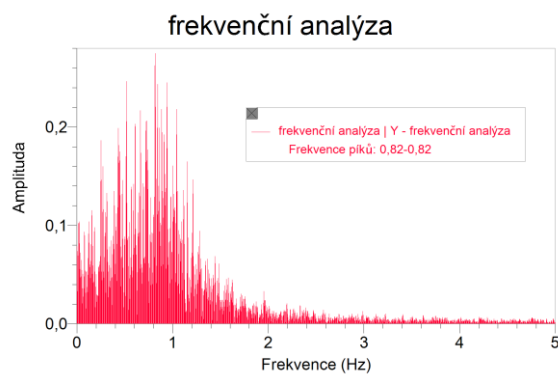
Obr. 73 Frekvenční analýza měření 23 při Q_{100}



Obr. 74 Foto z měření 23 při Q_{100}

Měření 24, VD Ludkovice: 2 přímá, šikmě umístěná žebra přímo na přelivné hraně, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



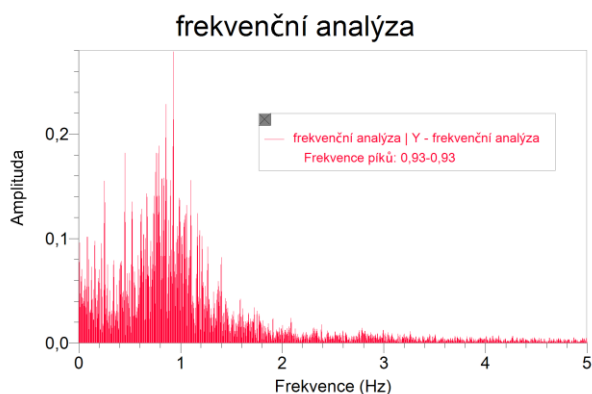
Obr. 75 Frekvenční analýza měření 24 při Q_{100}



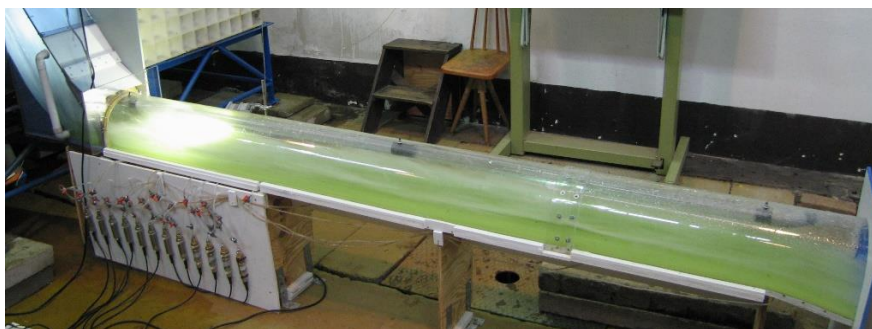
Obr. 76 Foto z měření 24 při Q_{100}

Měření 25, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 0,5 m), současné usměrňovací žebro ve spadišti, bez spodních výpustí - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



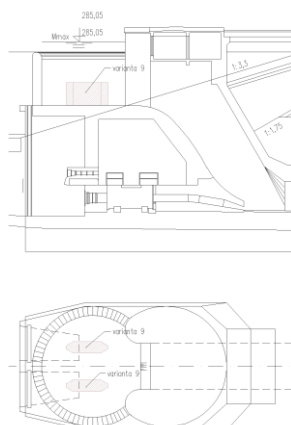
Obr. 77 Frekvenční analýza měření 25 při Q_{100}



Obr. 78 Foto z měření 25 při Q_{100}

Měření 26, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeč ve vývaru (1 ks, 1x1x1 m)

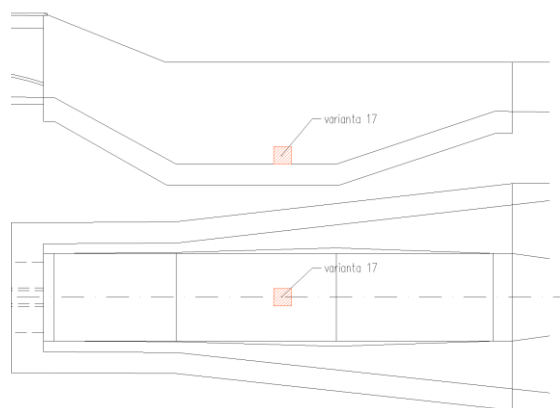
Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m. Podle vizuálního pozorování příčné pulzace ve spadišti při všech průtocích vymizely. Z obrázku 82 je patrné, že vývar neplní funkci při průtoku Q_{1000} .



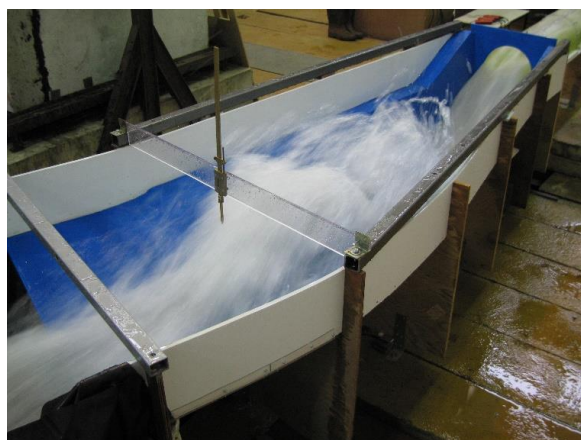
Obr. 79 Výkres rovnoběžných usměrňovacích žebířek ve spadišti



Obr. 80 Foto z měření 26 při Q_{100}



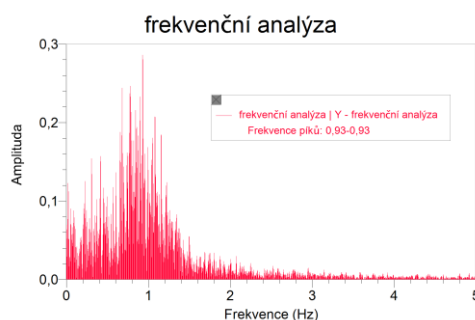
Obr. 81 Výkres rozrážče ve vývaru



Obr. 82 Foto z měření 26 při Q_{1000}

Měření 27, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážec ve vývaru (1 ks, 1x1x1 m) - při Q_{100} změřeny tlaky s krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



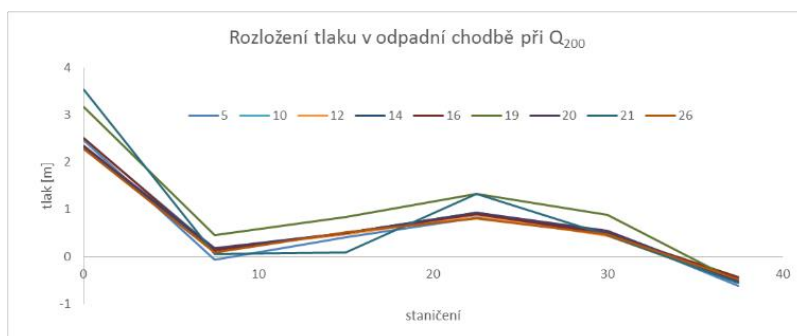
Obr. 83 Frekvenční analýza měření 27 při Q_{100}



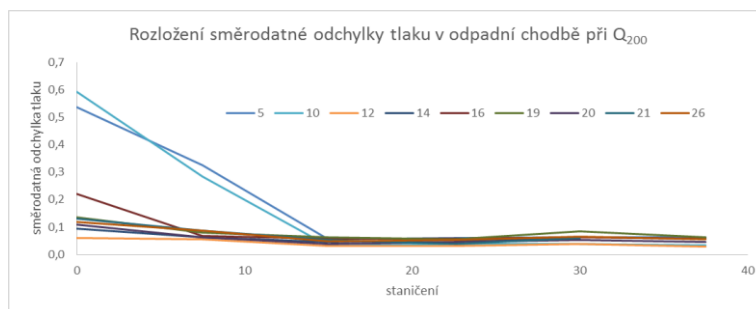
Obr. 84 Foto z měření 27 při Q_{100}

Shrnutí 2 – měření 9 až 27 VD Ludkovice

Vyhodnocení vlivu úprav na přelivu a ve spadišti na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo provedeno na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi. Vyhodnocení úprav na přelivu ve skluzu: pulzace nejvíce eliminuje varianta s dvěma podélnými žebry ve spadišti, která zároveň neovlivňuje kapacitu přelivu (varianta 6 – měření 19 a 23, varianta 8 – měření 21 a 25 a varianta 9 – měření 26 a 27). Názornější přehled pro všechny varianty a průtoky umožňuje srovnávací tabulka 14, kdy **zelená pole** označují ty varianty, kde je směrodatná odchylka nejmenší a **červená pole** označují ty varianty, kde je směrodatná odchylka největší. Pro lepší statickou a dynamickou stabilitu usměrňovacího žebra doporučujeme k realizaci variantu 9 – měření 26 a 27, kdy šířka usměrňovacího žebra je 1 m.



Obr. 85 Porovnání tlaků v odpadní chodbě z měření 5, 10, 12, 14, 16, 18, 19, 21 a 26 při Q_{200}



Obr. 86 Porovnání směrodatných odchylek z měření 5, 10, 12, 14, 16, 18, 19, 21 a 26 při Q_{200}

Tab. 14. Porovnání směrodatných odchylek z měření 5, 10, 12, 14, 16, 18, 19, 21 a 26

staničení [m]		0	7,5	15	22,5	30	37,5
měření	Q	Směrodatná odchylka					
5	2	0,07	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01
	5	0,18	0,11	0,02	0,01	0,02	0,01
	10	0,21	0,12	0,02	0,02	0,02	0,01
	20	0,21	0,14	0,02	0,02	0,02	0,01
	50	0,30	0,16	0,03	0,02	0,03	0,02
	100	0,63	0,36	0,04	0,04	0,04	0,03
	200	0,54	0,32	0,06	0,06	0,06	0,06
	500	0,53	0,24	0,06	0,06	0,08	0,06
	1000	0,42	0,40	0,15	0,10	0,07	0,06
10	2	0,09	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00
	5	0,16	0,09	0,02	0,01	0,02	0,01
	10	0,22	0,14	0,02	0,02	0,02	0,01
	20	0,24	0,24	0,02	0,02	0,02	0,01
	50	0,29	0,14	0,03	0,02	0,02	0,02
	100	0,53	0,26	0,03	0,03	0,03	0,03
	200	0,59	0,28	0,03	0,04	0,04	0,03
	500	0,49	0,27	0,06	0,06	0,07	0,04
	1000	0,60	0,50	0,22	0,15	0,10	0,09
12	2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	5	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
	10	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	20	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
	50	0,07	0,06	0,03	0,02	0,04	0,02
	100	0,07	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02
	200	0,06	0,06	0,03	0,03	0,04	0,03
	500	0,14	0,08	0,05	0,05	0,06	0,05
	1000	0,11	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03
14	2	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
	5	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01
	10	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	20	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
	50	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
	100	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03
	200	0,09	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05
	500	0,12	0,08	0,06	0,05	0,08	0,07
	1000	0,22	0,15	0,10	0,07	0,07	0,07
16	2	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	5	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
	10	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	20	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	50	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	100	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
	200	0,22	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
	500	0,12	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05
	1000	0,13	0,13	0,10	0,06	0,06	0,05
19	100	0,13	0,07	0,04	0,02	0,05	0,05
	200	0,13	0,08	0,06	0,05	0,08	0,06
	500	0,12	0,08	0,05	0,05	0,06	0,07
	1000	0,11	0,06	0,03	0,03	0,05	0,03
20	100	0,07	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
	200	0,11	0,06	0,04	0,04	0,05	0,05
	500	0,21	0,10	0,08	0,07	0,10	0,09
	1000	0,21	0,09	0,07	0,04	0,07	0,06
21	100	0,13	0,08	0,03	0,01	0,05	0,02
	200	0,13	0,09	0,05	0,04	0,06	0,05
	500	0,13	0,09	0,06	0,05	0,08	0,07
	1000	0,11	0,05	0,03	0,01	0,04	0,05
26	2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	5	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
	20	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
	50	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01
	100	0,09	0,06	0,03	0,03	0,05	0,03
	200	0,14	0,09	0,05	0,05	0,07	0,01
	500	0,13	0,11	0,08	0,08	0,11	0,09
	1000	0,10	0,06	0,04	0,02	0,04	0,04

Vyhodnocení úprav ve vývaru: na správnou funkci vývaru mají nejlepší vliv 2 rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m – měření 21 – varianta 16.

Tab. 15. Výpočet vývaru pro VD Bojkovice

průtok Q_{10}	17,50	$[m^3s^{-1}]$	průtok Q_{100}	45,00	$[m^3s^{-1}]$	průtok Q_{1000}	92,00	$[m^3s^{-1}]$
výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]
rychlost	11,7	$[ms^{-1}]$	rychlost	14,3	$[ms^{-1}]$	rychlost	15,8	$[ms^{-1}]$
délka doskoku	12,07	[m]	délka doskoku	14,83	[m]	délka doskoku	16,39	[m]
šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]
energetická výškov výška	12,68	[m]	energetická výškov výška	16,62	[m]	energetická výškov výška	19,64	[m]
hloubka y_1	0,38	[m]	hloubka y_1	0,87	[m]	hloubka y_1	1,66	[m]
hloubka y_1 (pomocná)	0,38	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,87	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	1,66	[m]
hloubka y_2	2,37	[m]	hloubka y_2	3,95	[m]	hloubka y_2	5,67	[m]
délka vodního skoku	11,9	[m]	délka vodního skoku	18,5	[m]	délka vodního skoku	24,1	[m]
Y_d	1,1	[m]	Y_d	2,2	[m]	Y_d	3,8	[m]
zatopení	1,73		zatopení	1,32		zatopení	1,20	

Tab. 16. Výpočet vývaru pro VD Ludkovice

průtok Q_{10}	16,30	$[m^3s^{-1}]$	průtok Q_{100}	42,00	$[m^3s^{-1}]$	průtok Q_{1000}	85,00	$[m^3s^{-1}]$
výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]	výška	5,25	[m]
rychlost	10,6	$[ms^{-1}]$	rychlost	14,3	$[ms^{-1}]$	rychlost	15,3	$[ms^{-1}]$
délka doskoku	10,95	[m]	délka doskoku	14,78	[m]	délka doskoku	15,83	[m]
šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]	šířka vývaru	5	[m]
energetická výškov výška	11,46	[m]	energetická výškov výška	16,51	[m]	energetická výškov výška	18,72	[m]
hloubka y_1	0,37	[m]	hloubka y_1	0,81	[m]	hloubka y_1	1,57	[m]
hloubka y_1 (pomocná)	0,37	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	0,81	[m]	hloubka y_1 (pomocná)	1,57	[m]
hloubka y_2	2,23	[m]	hloubka y_2	3,82	[m]	hloubka y_2	5,39	[m]
délka vodního skoku	11,1	[m]	délka vodního skoku	18,1	[m]	délka vodního skoku	22,9	[m]
Y_d	1,2	[m]	Y_d	2,0	[m]	Y_d	2,7	[m]
zatopení	1,89		zatopení	1,30		zatopení	1,06	

Vyhodnocení frekvence pulzací tlaku v odpadní chodbě: měření 9 a měření 11 ukazuje na dominantní frekvence pulzací v odpadní chodbě. Ostatní výsledky měření ukazují na odstranění těchto dominantních pulzací, což ukazuje na utlumení propagace pulzací tlaku do odpadní chodby.

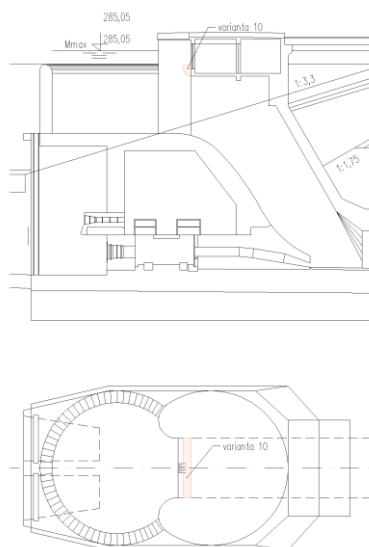
Tab. 17. Dominantní frekvence pulzací tlaku při Q_{100}

frekvence [Hz]							
	staničení odpadní chodby						
měření	0,0	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5	
9	0,52	0,52	0,52	0,26	0,52	0,52	
11	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,56	
13	1,00	0,50	0,49	0,50	0,25	0,50	málo dominantní frekvence
15	1,38	0,90	0,77	0,49	0,44	0,05	málo dominantní frekvence
17	1,15	0,75	0,97	0,06	0,72	0,51	málo dominantní frekvence
22	1,15	0,89	0,81	0,13	0,39	0,14	málo dominantní frekvence
23	1,42	0,69	0,92	0,06	0,57	0,00	málo dominantní frekvence
24	1,09	0,79	0,82	0,17	0,30	0,02	málo dominantní frekvence
25	0,01	0,93	0,93	0,01	0,43	0,03	málo dominantní frekvence
27	1,31	0,79	0,93	0,54	0,01	0,46	málo dominantní frekvence

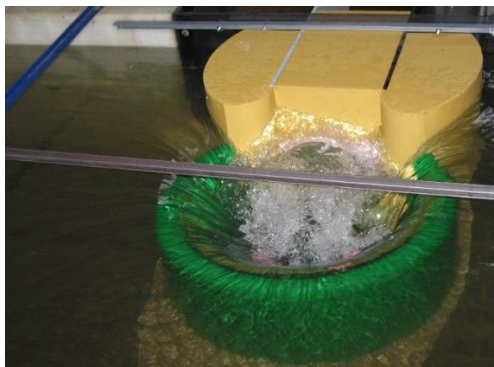
c. Úpravy horní hrany vtokového okna skluzu (měření 28 až 30)

Měření 28, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení vtokového okna horní hrany skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny.



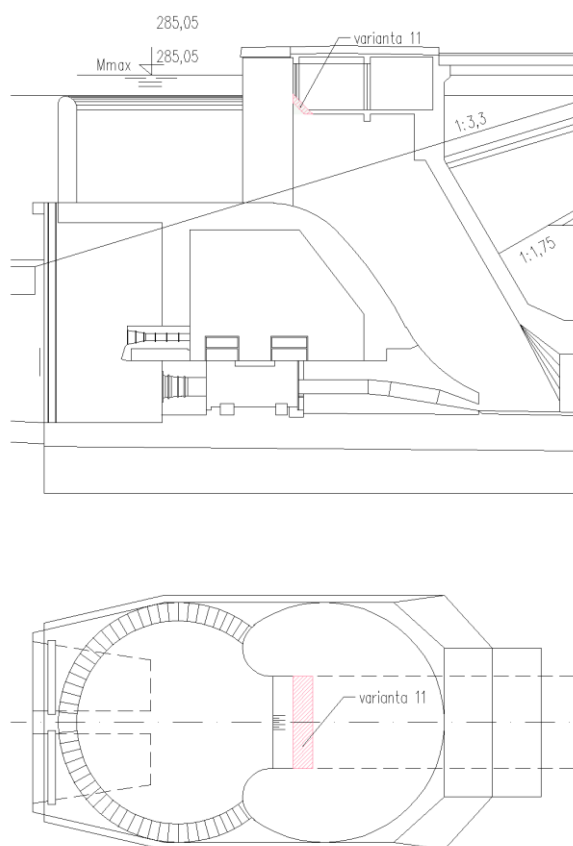
Obr. 87 Výkres zaoblení horní hrany vtokového okna



Obr. 88 Foto z měření 28 při Q_{500}

Měření 29, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zkosení horní hrany vtokového okna (0,5 m)

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m. Tato varianta byla doplněna o zkosení vtokového okna horní hrany skluzu o 0,5 m, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny.



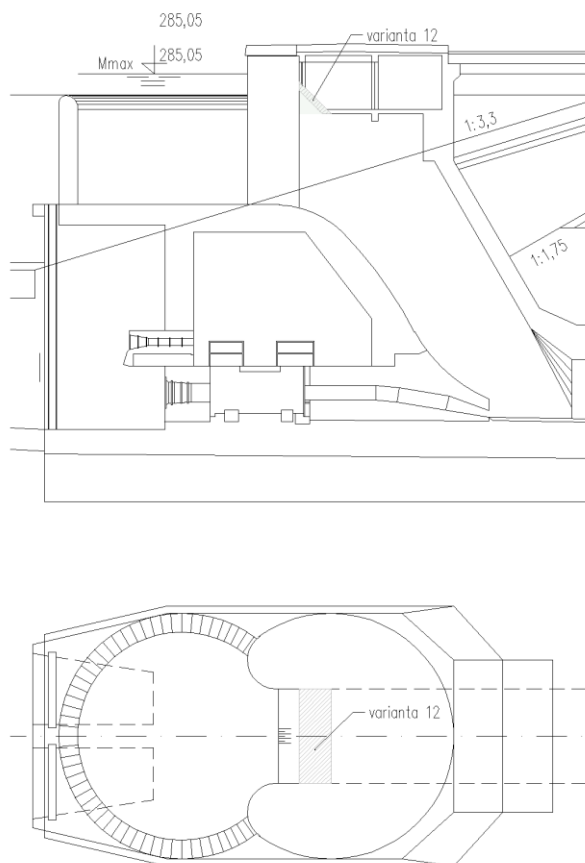
Obr. 89 Výkres zkosení horní hrany vtokového okna



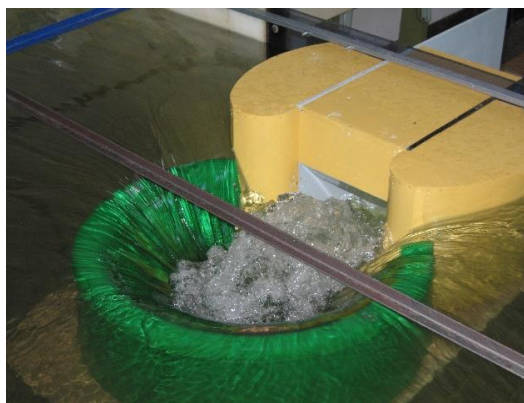
Obr. 90 Foto z měření 29 při Q_{500}

Měření 30, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zkosení horní hrany vtokového okna (1 m)

Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m. Tato varianta byla doplněna o zkosení vtokového okna horní hrany skluzu o 1 m, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny.



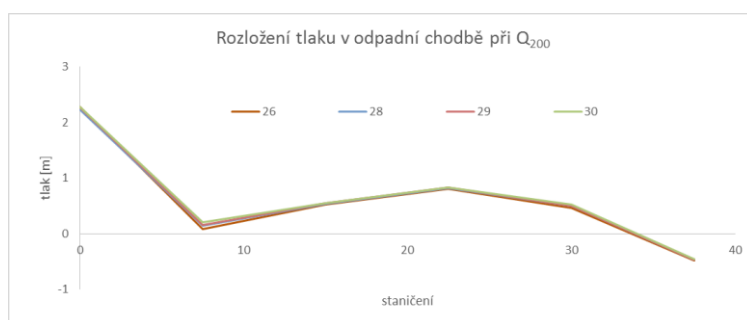
Obr. 91 Výkres zkosení horní hrany vtokového okna



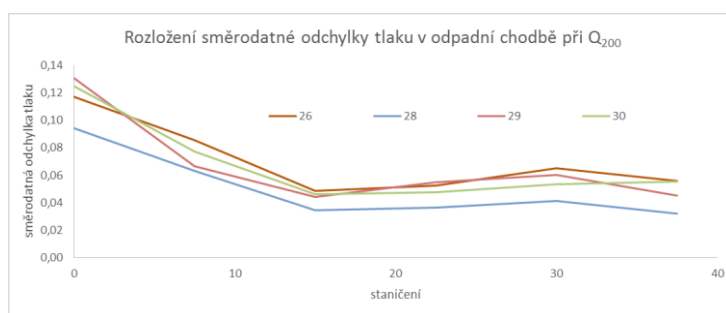
Obr. 92 Foto z měření 30 při Q_{500}

Shrnutí 3 – měření 28 až 30 VD Ludkovice

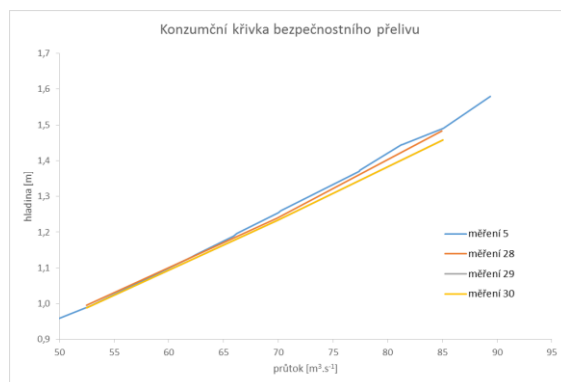
Vyhodnocení vlivu úprav na vtokovém okně do skluzu na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo provedeno na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro průtokové varianty Q_{200} , Q_{500} a Q_{1000} s uzavřenými spodními výpustmi. Zhodnocení úprav na vtokovém okně: žádná z variant neovlivňuje kapacitu přelivu. Názornější přehled umožňuje pro všechny varianty a průtoky srovnávací tabulka 18, kdy zelená pole označují ty varianty, kde je směrodatná odchylka nejmenší a červená pole označují ty varianty, kde je směrodatná odchylka největší. Pro lepší statickou a dynamickou stabilitu spadiště, skluzu a odpadní chodby doporučujeme k realizaci variantu úpravy vtokového okna do skluzu pomocí hydraulicky vhodného zaoblení jeho horní hrany.



Obr. 93 Porovnání tlaku v odpadní chodbě z měření 26, 28, 29 a 30 při Q_{200}



Obr. 94 Porovnání směrodatných odchylek z měření 26, 28, 29 a 30 při Q_{200}



Obr. 95 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu – úpravy horní hrany vtokového okna

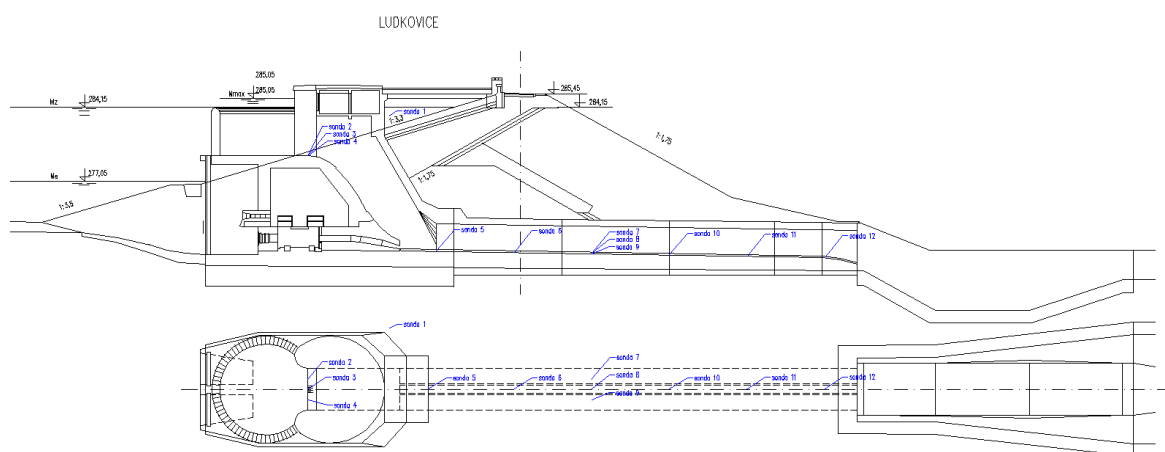
Tab. 18. Porovnání směrodatných odchylek tlaku z měření 26, 28, 29 a 30

staničení [m]		0	7,5	15	22,5	30	37,5
měření	Q	Směrodatná odchylka					
26	2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	5	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
	10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
	20	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
	50	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01
	100	0,09	0,06	0,03	0,03	0,05	0,03
	200	0,14	0,09	0,05	0,05	0,07	0,01
	500	0,13	0,11	0,08	0,08	0,11	0,09
	1000	0,10	0,06	0,04	0,02	0,04	0,04
28	2	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-
	200	0,09	0,06	0,03	0,04	0,04	0,03
	500	0,13	0,08	0,08	0,07	0,10	0,09
	1000	0,24	0,20	0,12	0,08	0,08	0,07
29	2	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-
	200	0,13	0,07	0,04	0,06	0,06	0,05
	500	0,12	0,10	0,05	0,06	0,08	0,07
	1000	0,24	0,23	0,16	0,14	0,11	0,07
30	2	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-
	200	0,12	0,08	0,05	0,05	0,05	0,06
	500	0,12	0,09	0,06	0,06	0,08	0,07
	1000	0,58	0,15	0,12	0,11	0,12	0,10

d. Výsledná varianta pro VD Ludkovice (měření 31 až 35)

Měření 31, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

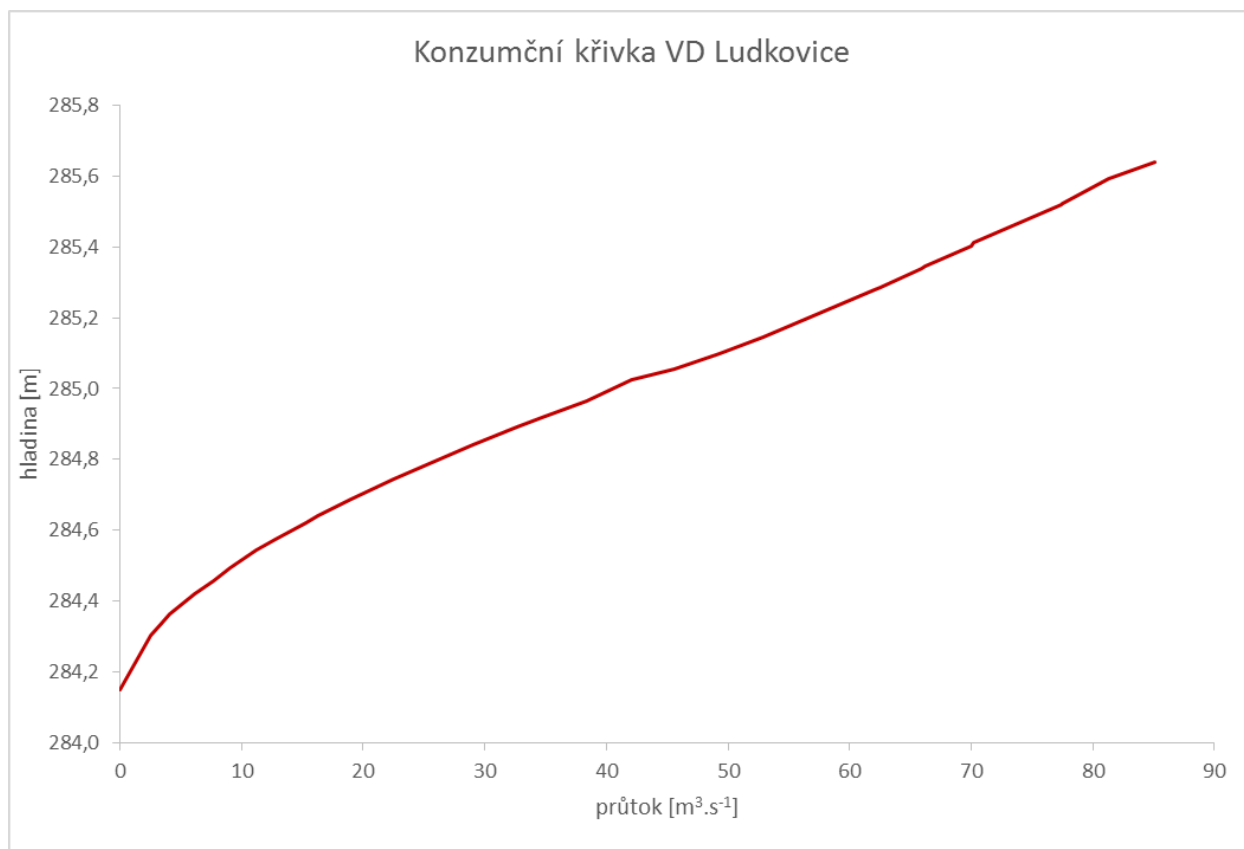
Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Ludkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Poloměr zaoblení horní hrany vtokového okna je 0,5 m. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Měřením hladiny v odpadní chodbě byl opraven rychlostní součinitel pro výpočet hladiny na konci skluzu (začátek odpadní chodby) na hodnotu $\varphi = 0,75$. Hladiny změřené na modelu velice dobře odpovídají výpočtům nerovnoměrného proudění v odpadní chodbě. Výška hladiny v nádrži při maximálním transformovaném průtoku $Q_{1\,000} = 82,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 7,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 285,50 m n. m., přičemž MBH je 285,55 m n. m.



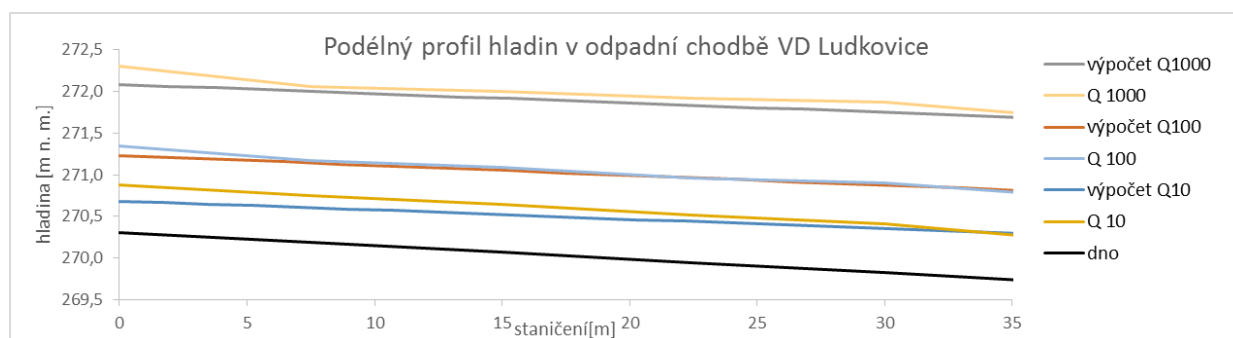
Obr. 96 Rozmístění tlakových sond



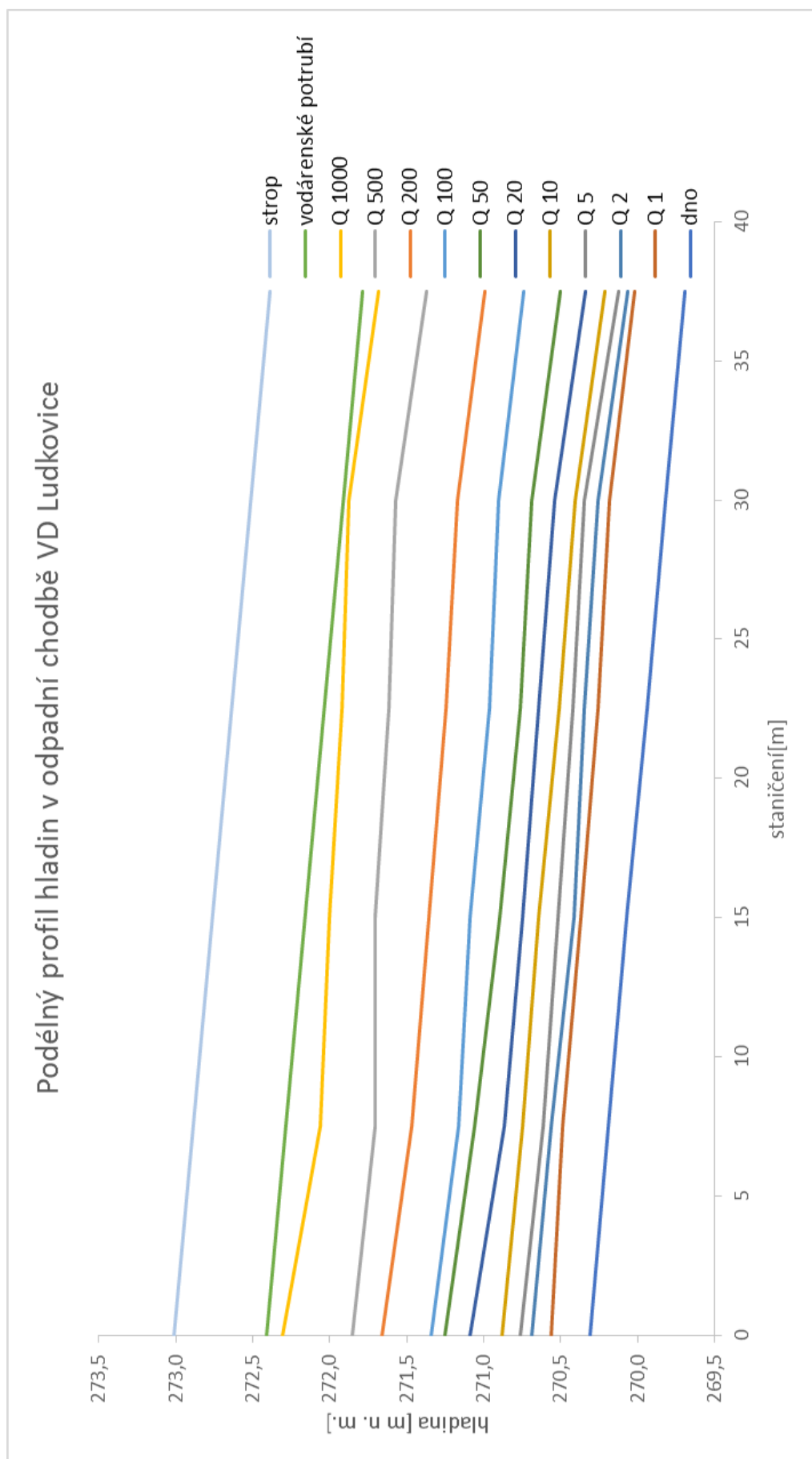
Obr. 97 Foto z měření 31 při $Q_{1\,000}$



Obr. 98 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu na VD Ludkovice



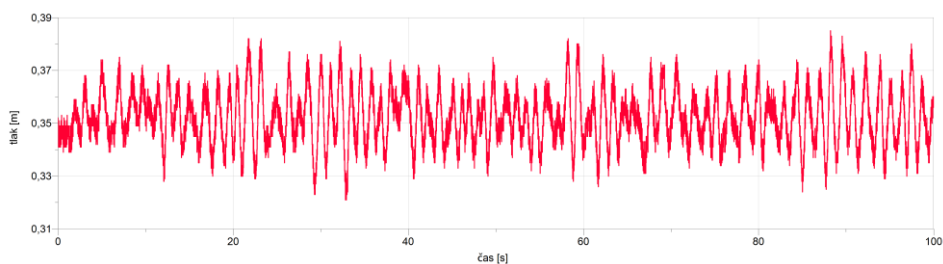
Obr. 99 Podélný profil hladin v odpadní chodbě – porovnání s výpočtem



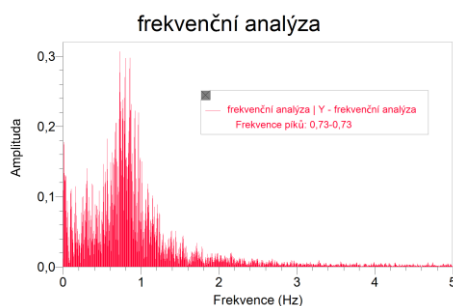
Obr. 100 Podélný profil hladin v odpadní chodbě

Měření 32, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna - při Q_{100} změřeny tlaky s časový krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



Obr. 101 Záznam měření tlaku v odpadní chodbě ve staničení 15 m při Q_{100}



Obr. 102 Frekvenční analýza měření 32 při Q_{100}

Tab. 19. Frekvenční analýza měření 32 při Q_{100}

frekvence [Hz]											
	staničení odpadní chodby										
měření	-12,382	-12,382	-12,382	0,0	7,5	15,0	15,0	15,0	22,5	30,0	37,5
32	0,07	0,87	0,61	0,91	0,80	0,87	0,73	0,78	0,49	0,70	0,65



Obr. 103 Foto z měření 32 při Q_{100}

Měření 33, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, levá spodní výpust

Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Ludkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byla otevřena levá spodní výpust.



Obr. 104 Foto z měření 33 při Q_{10}

Měření 34, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, pravá spodní výpust

Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Ludkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byla otevřena pravá spodní výpust.



Obr. 105 Foto z měření 34 při Q_{10}

Měření 35, VD Ludkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1 m), rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna, obě spodní výpusti

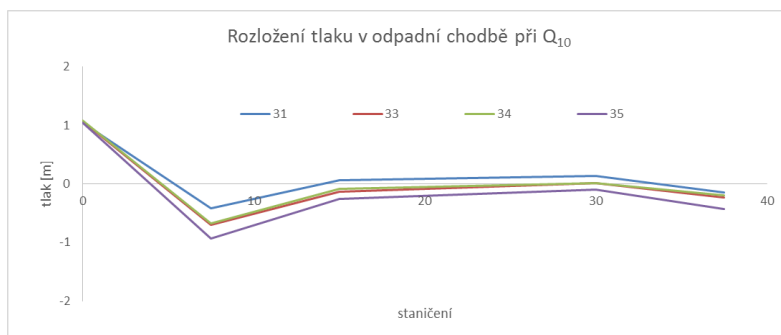
Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Ludkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byly otevřeny obě spodní výpusti.



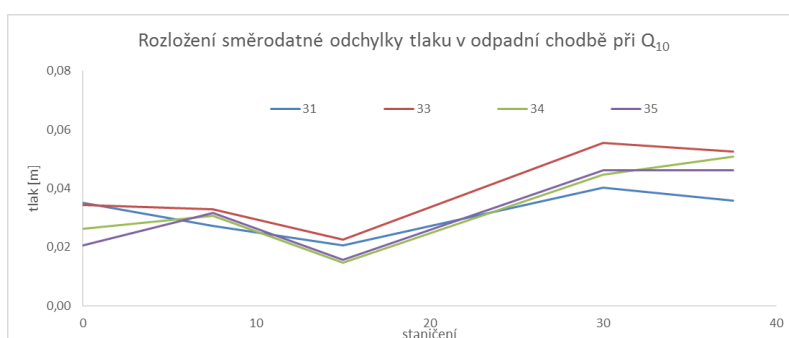
Obr. 106 Foto z měření 35 při Q_{10}

Shrnutí 4 – měření 31 až 35 VD Ludkovice

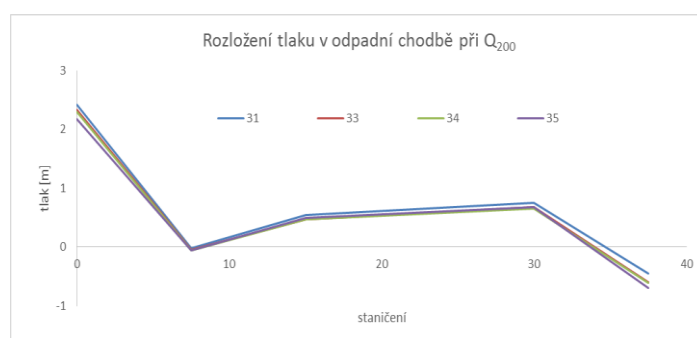
Vyhodnocení vlivu spodních výpustí při výsledné variantě VD Ludkovice na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi, otevřenou levou spodní výpustí, otevřenou pravou spodní výpustí a s otevřenými oběma spodními výpustmi. Zhodnocení: spodní výpusti mají malý vliv na tlak a tlakové pulzace v odpadní chodbě. Výška hladiny v nádrži při maximálním transformovaném průtoku $Q_{1000} = 82,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 7,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 285,50 m n. m., přičemž MBH je 285,55 m n. m.



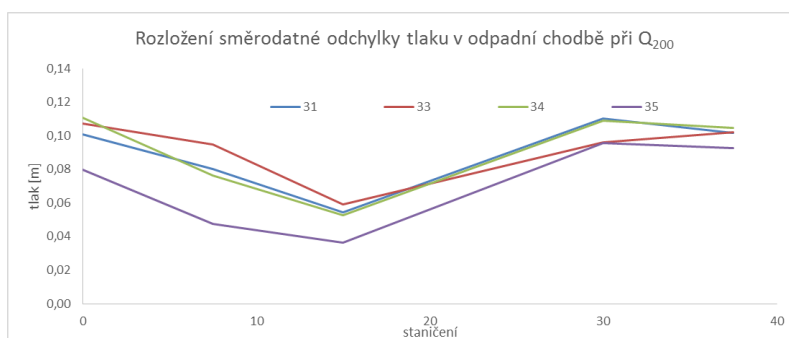
Obr. 107 Porovnání tlaků v odpadní chodbě z měření 31, 33, 34 a 35 při Q_{10}



Obr. 108 Porovnání směrodatných odchylek z měření 31, 33, 34 a 35 při Q_{10}



Obr. 109 Porovnání tlaků v odpadní chodbě z měření 31, 33, 34 a 35 při Q_{200}

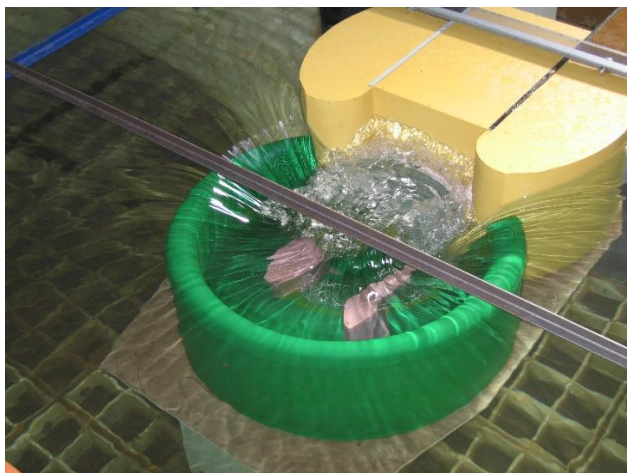


Obr. 110 Porovnání směrodatných odchylek z měření 31, 33, 34 a 35 při Q_{200}

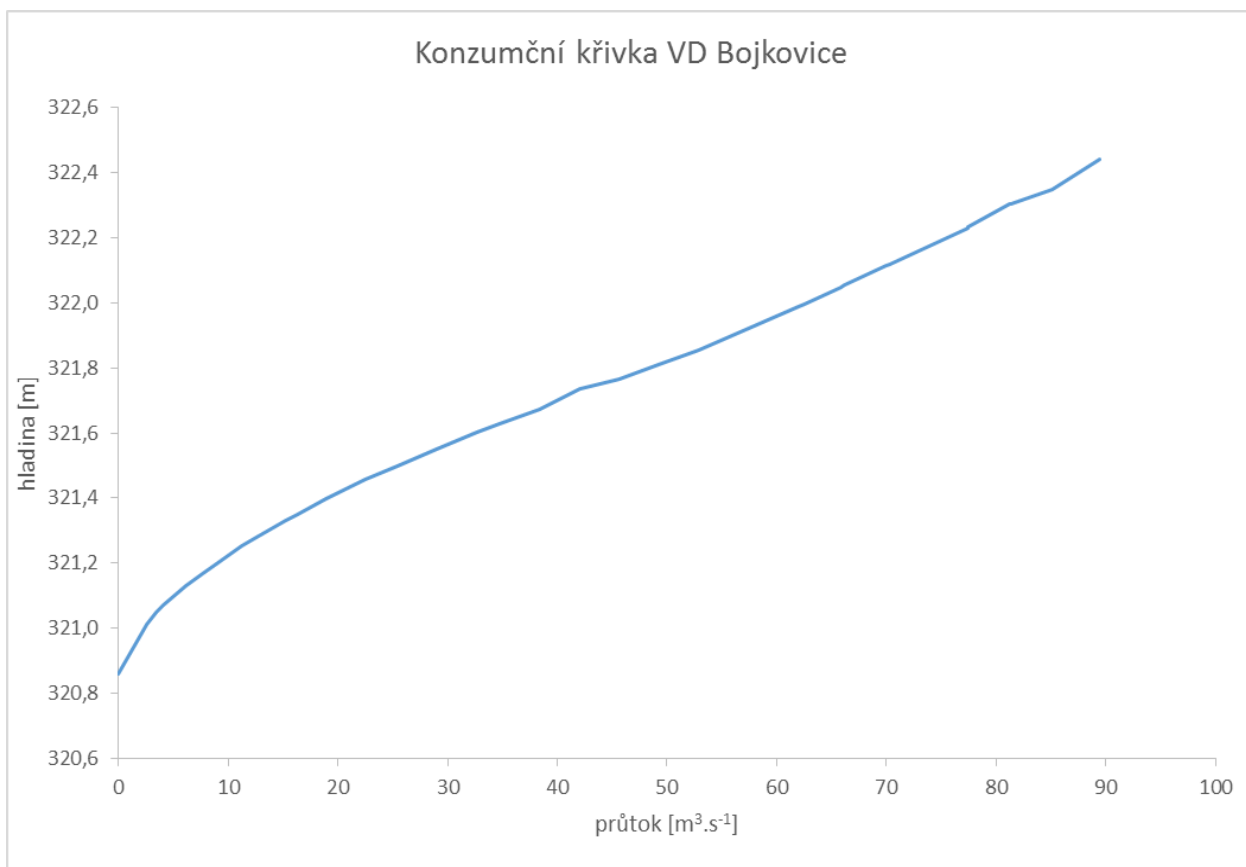
e. Výsledná varianta pro VD Bojkovice (měření 36 až 40)

Měření 36, VD Bojkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

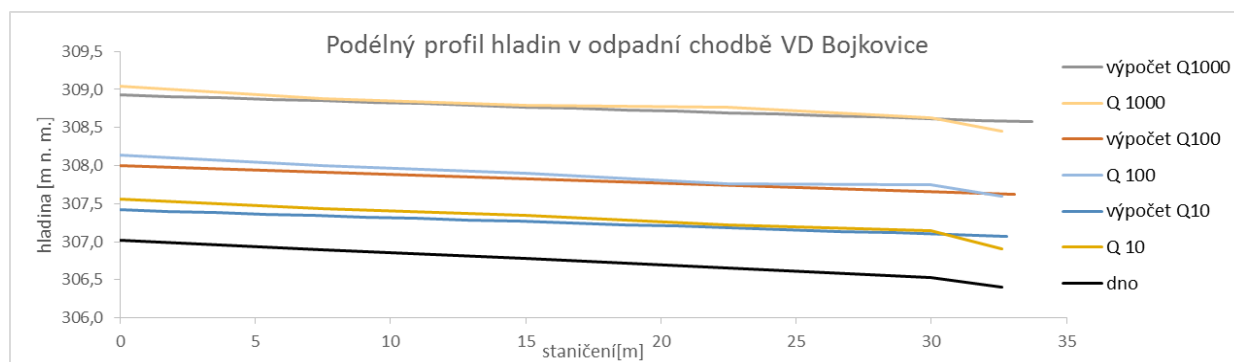
Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Bojkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Měřením hladiny v odpadní chodbě byl opraven rychlostní součinitel pro výpočet hladiny na konci skluzu (začátek odpadní chodby) na hodnotu $\varphi = 0,75$. Hladiny změřené na modelu velice dobře odpovídají výpočtům nerovnoměrného proudění v odpadní chodbě. Výška hladiny v nádrži při maximálním transformovaném průtoku $Q_{1\ 000} = 89,4\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 12,4\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 322,22 m n. m., přičemž MBH je 322,68 m n. m.



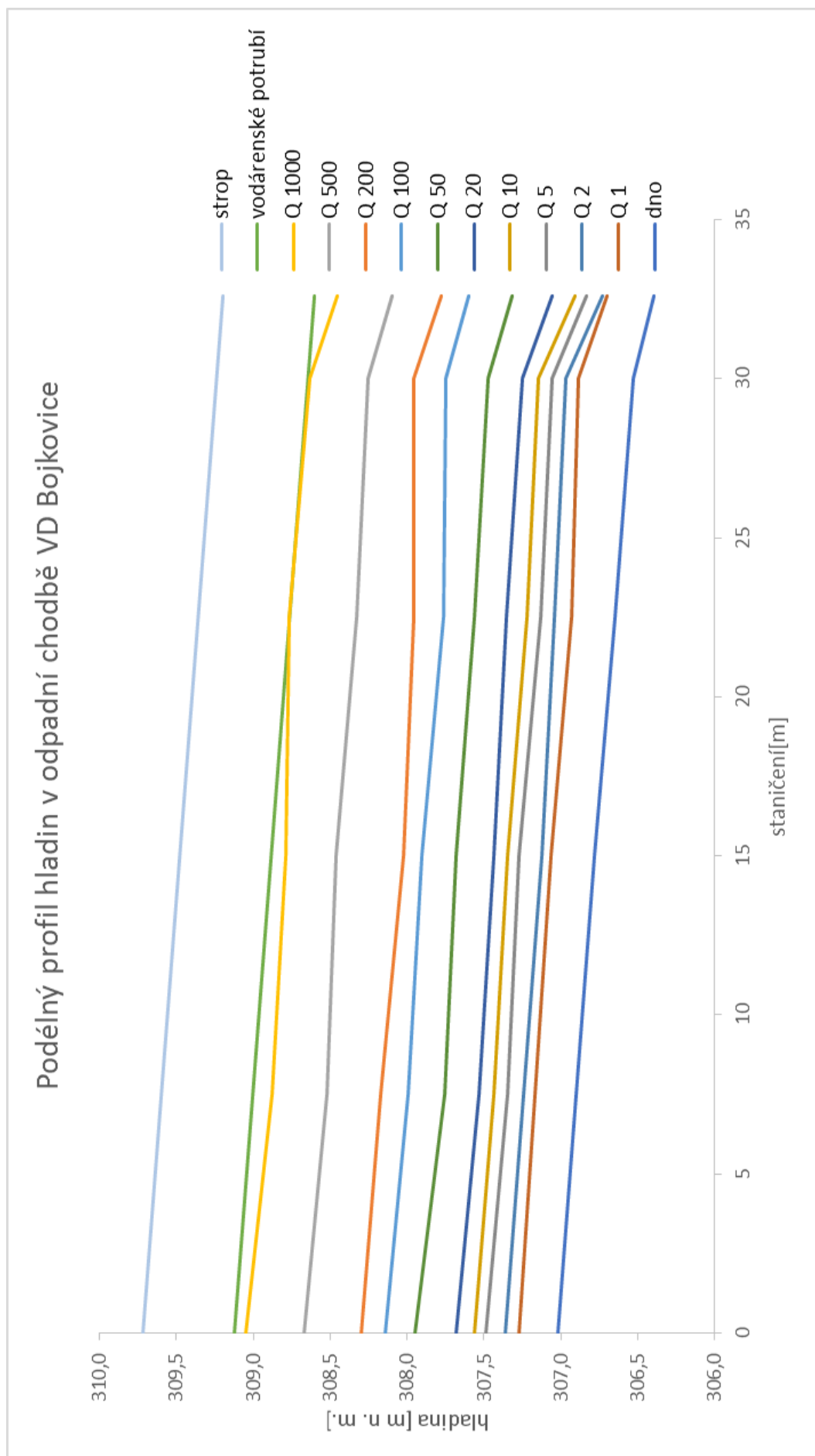
Obr. 111 Foto z měření 36 při $Q_{1\ 000}$



Obr. 112 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu na VD Bojkovice



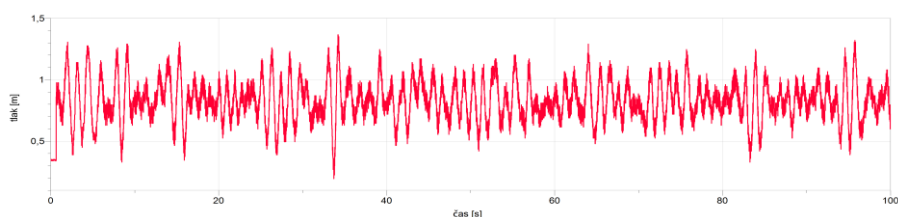
Obr. 113 Podélný profil hladin v odpadní chodbě – srovnání s výpočtem



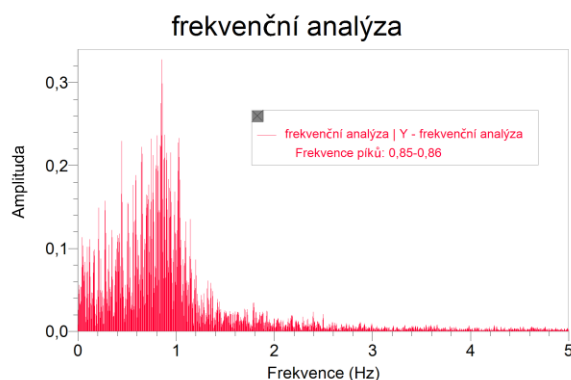
Obr. 114 Podélný profil hladin v odpadní chodbě

Měření 37, VD Bojkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), bez spodních výpustí, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna - při Q_{100} změřeny tlaky s časovým krokem 1 ms

Při tomto měření byla vyhodnocována frekvence pulzací v odpadní chodbě pomocí záznamu tlaku s časovým krokem 1 ms. Na obrázku je frekvenční analýza měření v odpadní chodbě ve staničení 15 m. Je patrné, že tyto tlakové pulzace nemají výrazně dominantní frekvenci kmitání. Z toho plyne, že tlakové pulzace se nepropagují do odpadní chodby.



Obr. 115 Záznam měření tlaku v odpadní chodbě, ve staničení 15 m při Q_{100}



Obr. 116 Frekvenční analýza měření 37 při Q_{100}

Tab. 20. Frekvenční analýza měření 37 při Q_{100}

frekvence [Hz]											
	staničení odpadní chodby										
měření	-12,382	-12,382	-12,382	0,0	7,5	15,0	15,0	15,0	22,5	30,0	37,5
37	0,63	0,01	0,01	0,92	1,00	0,75	0,85	0,86	0,45	0,72	0,52



Obr. 117 Foto z měření 37 při Q_{100}

Měření 38, VD Bojkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), levá spodní výpust, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Bojkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byla otevřena levá spodní výpust.



Obr. 118 Foto z měření 38 při Q_{10}

Měření 39, VD Bojkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), pravá spodní výpust, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Bojkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody

ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byla otevřena pravá spodní výpust.



Obr. 119 Foto z měření 39 při Q_{10}

Měření 40, VD Bojkovice: 2 rovnoběžná žebra ve spadišti (šířka 1,0 m), obě spodní výpusti, rozrážeče ve vývaru (2 ks, 1x1x1 m), zaoblení horní hrany vtokového okna

Toto je výsledná varianta výzkumu na VD Bojkovice. Pro eliminaci příčných pulzací vody ve spadišti byla navržena usměrňovací žebra ve spadišti o šířce 1 m a výšce 2 m. Tato varianta byla doplněna o hydraulicky vhodné zaoblení horní hrany vtokového okna skluzu, aby proudění vody ze spadiště do skluzu nebylo negativně ovlivňováno ostrou hranou konstrukce strojovny. Ve vývaru jsou umístěny dva rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m. Při všech průtocích byly otevřeny obě spodní výpusti.

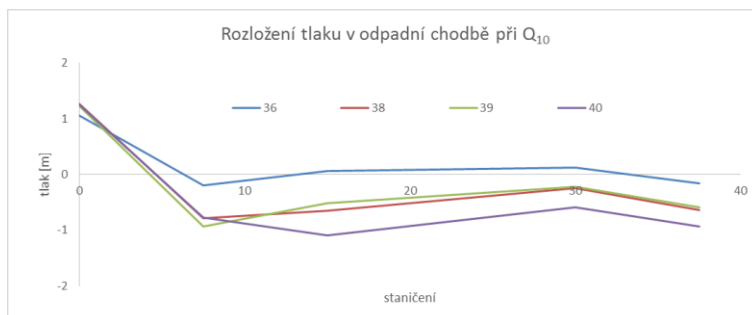


Obr. 120 Foto z měření 40 při Q_{10}

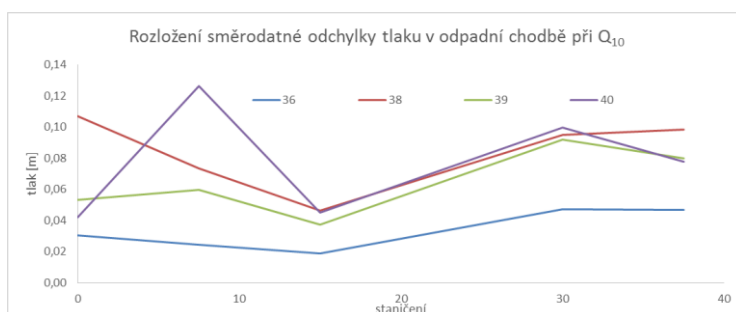
Shrnutí 5 – měření 36 až 40 VD Bojkovice

Vyhodnocení vlivu spodních výpustí při výsledné variantě VD Bojkovice na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi, otevřenou levou spodní výpustí, otevřenou pravou spodní výpustí a s otevřenými oběma spodními výpustmi. Vyhodnocení: spodní výpustě mají malý vliv na tlak a tlakové pulzace v odpadní chodbě. Výška hladiny v nádrži při maximálním transformovaném

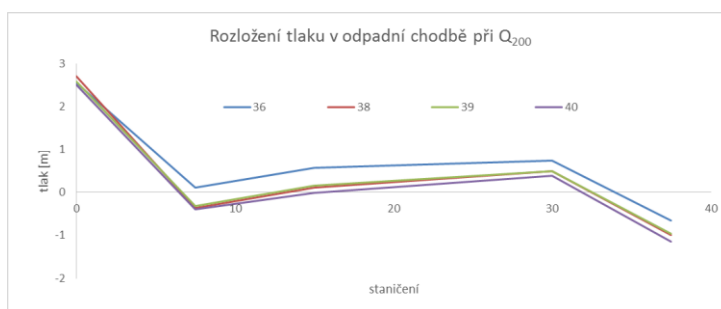
průtoku $Q_{1000} = 89,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 12,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 322,22 m n. m., přičemž MBH je 322,68 m n. m.



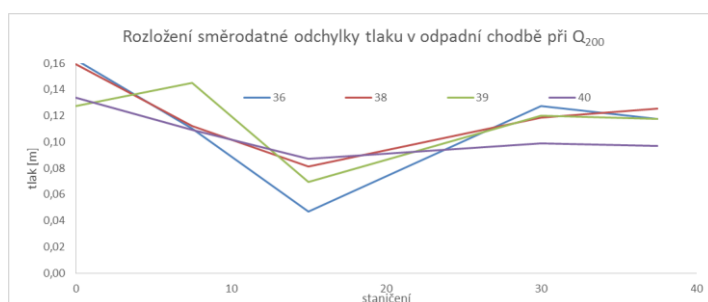
Obr. 121 Porovnání tlaku v odpadní chodbě z měření 36, 38, 39 a 40 při Q_{10}



Obr. 122 Porovnání směrodatných odchylek z měření 36, 38, 39 a 40 při Q_{10}



Obr. 123 Porovnání tlaku v odpadní chodbě z měření 36, 38, 39 a 40 při Q_{200}



Obr. 124 Porovnání směrodatných odchylek z měření 36, 38, 39 a 40 při Q_{200}

XI. Matematické modelování VD Ludkovice

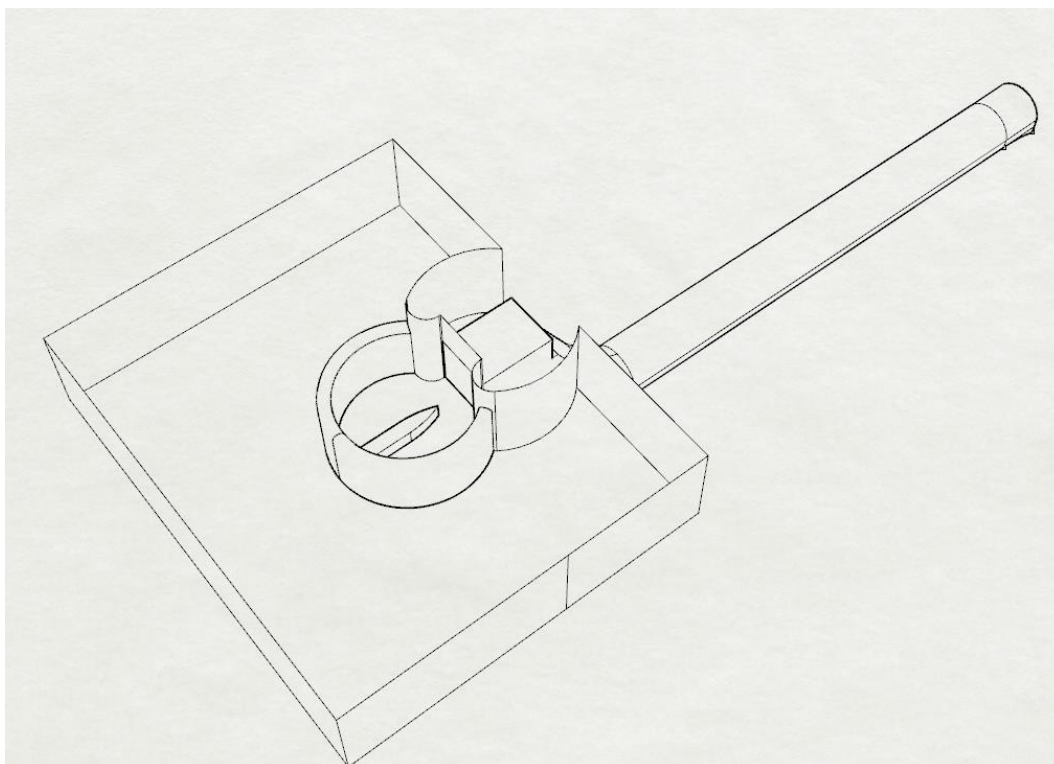
a. Cíl studie

V rámci modelového výzkumu pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu, spadiště, skluzu, odpadní chodby, a vývaru byl sestaven matematický model posuzovaných objektů. Cílem bylo především určení veličin, které jsou na fyzikálním modelu velmi obtížně měřitelné. Na základě měření provedených na fyzikálním modelu byly navrženy vhodné stavební úpravy na jednotlivých objektech. Finální varianta byla opět posouzena i na matematickém modelu.

Výpočetní geometrie

Výchozí geometrie – stávající stav

Základním podkladem pro tvorbu výpočetní geometrie byla výkresová dokumentace předané objednatelem a výstupy z místního šetření (Králík, Kučerová) tj. pořízená fotodokumentace a ověření rozměrů skutečného provedení stavby.



Obr. 125 Model přelivu - výchozí geometrie (stávající stav)

Provedená zjednodušení

Pro modelování proudění je třeba definovat objem, ve kterém se může tekutina pohybovat. V první řadě tedy byly z modelu izolovány obalové plochy (plochy objektů, které přicházející do přímého kontaktu s tekutinou) a zbývající části byly z matematického modelu odmazány. Dále bylo třeba provést některá zjednodušení.

Z obalových ploch byly odstraněny drobné konstrukční detaily (uchycení potrubí v odpadní chodbě apod.) Drobné hranky tvořící přechody mezi konstrukčními kusy byly nahrazeny plynulými přechody. Výstupy spodních výpustí byly z modelu vypuštěny. Tvar odpadní chodby byl zachován včetně kynety ve dně.

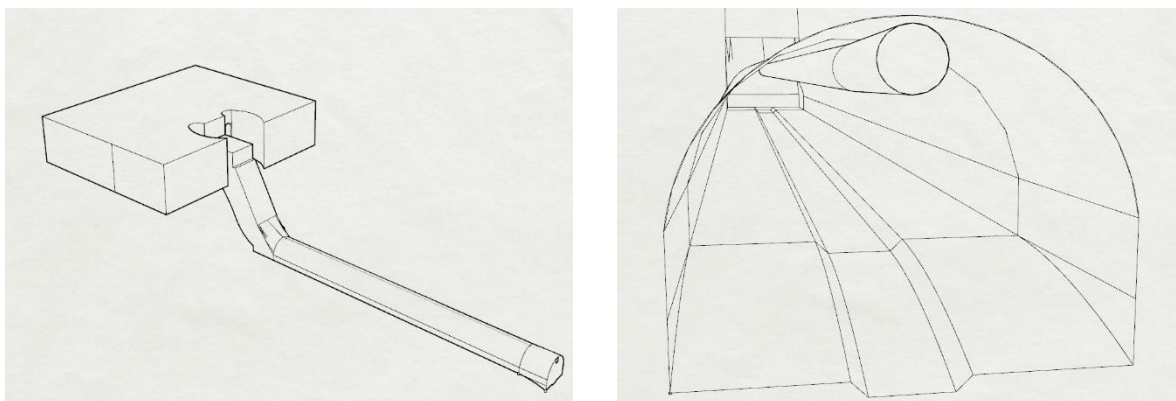
Řešení vstupního profilu

Pro simulaci přítoku z velké nádrže byl okolo bezpečnostního přelivu vytvořen přítokový prostor o půdorysných rozměrech 30 x 20 m. Výškově je model řešen tak, aby byla zahrnuta celá konstrukce přelivu. Nad úrovní hladiny je ponechán dostatečný prostor pro pohyb vzduchu, který zajišťuje model proudění s volnou hladinou. Matematický model je ukončen ve vzdálenosti 1,85 m nad horní hranou přelivu.

Do oblasti přítokového prostoru může voda vtékat libovolným směrem na základě zadané úrovně hladiny. Vzhledem k velké vstupní ploše voda do modelu vtéká velmi pomalu a postupně dochází k rozvoji proudění v okolí přelivu.

Řešení výstupního profilu

Matematický model vychází z předpokladu nezatopeného výtoku z odpadní chodby, který byl následně ověřen na fyzikálním modelu. Matematický model je proto ukončen ve výstupním profilu chodby. Snížení na konci chodby je do modelu zahrnuto.



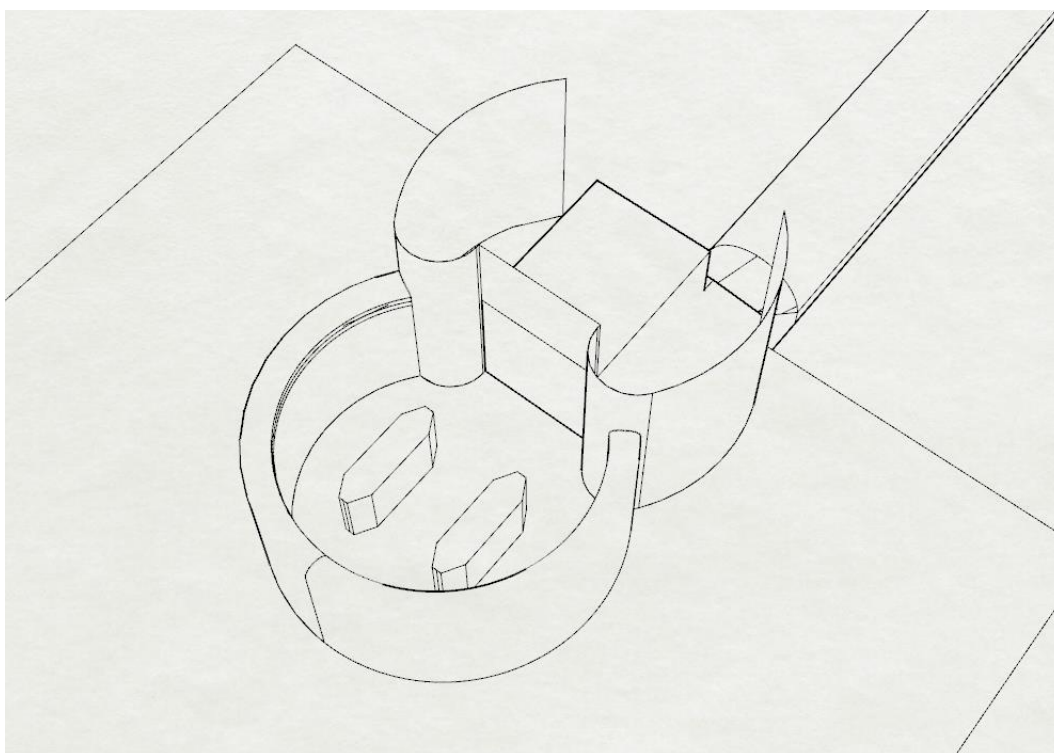
Obr. 126 Řešení vstupního a výstupního profilu

Vliv provedených zjednodušení

Byl ověřen předpoklad velmi pomalého nátoku do matematického modelu, který umožňuje směrový rozvoj proudění. Nepředpokládá se, že by provedená zjednodušení měla výrazný vliv na výstupy z modelu.

Geometrie navrhovaného řešení

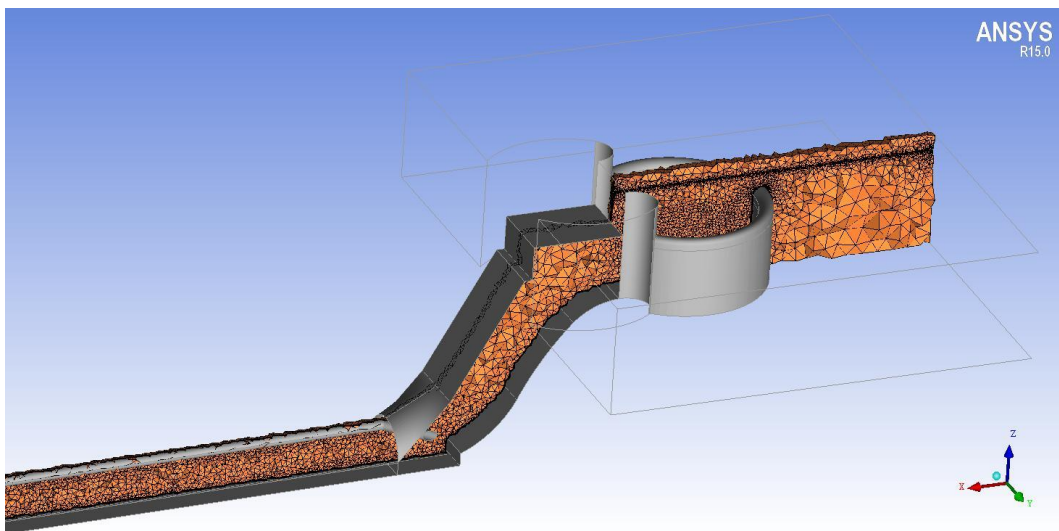
Na základě měření provedených na fyzikálním modelu byly navrženy vhodné stavební úpravy na jednotlivých objektech. Navrhované úpravy byly zapracovány do prostorového modelu. Veškerá výše uvedené postupy a zjednodušení byly použity i při tvorbě matematického modelu.



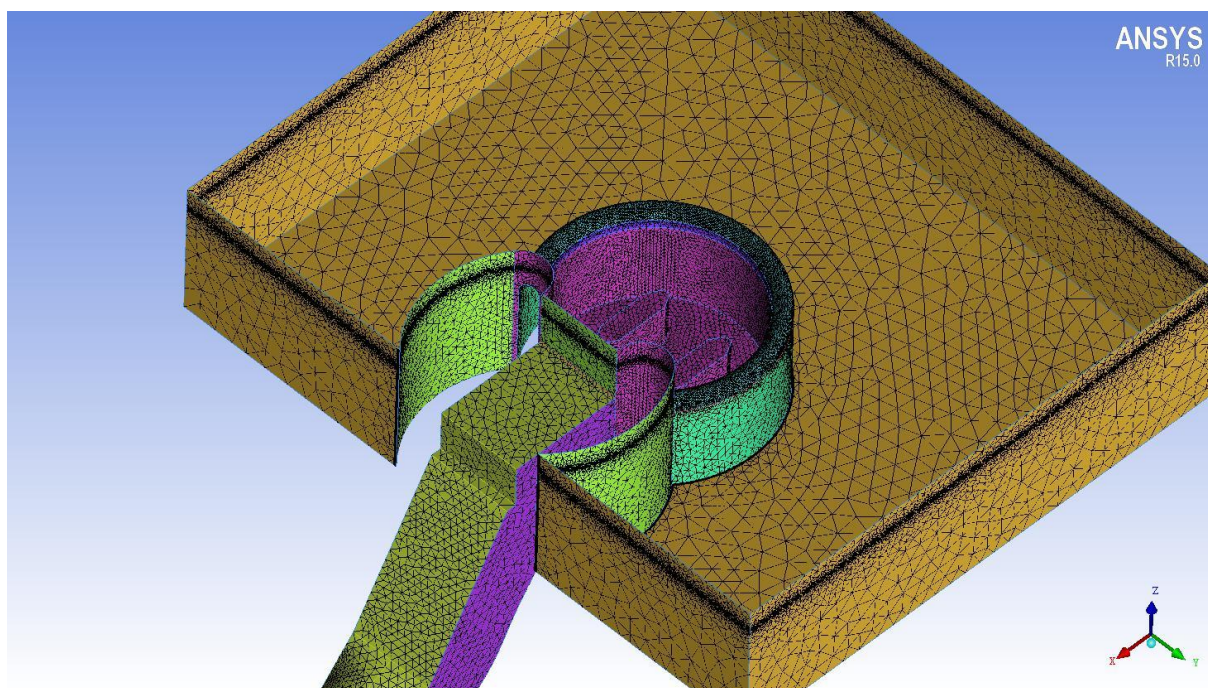
Obr. 127 Matematický model přelivu - navrhované řešení

b. Výpočetní síť

Pro výpočet byla použita nestrukturovaná výpočetní síť generovaná algoritmem Delaunay. V blízkosti stěn a v oblastech výpočetně náročných (oblast přelivu, dno spadiště) bylo provedeno výraznější zahuštění sítě.



Obr. 128 Podélný řez výpočetní sítí



Obr. 129 Povrchová výpočetní sítí

c. Nastavení modelu

Fyzikální parametry

Úloha je řešena jako dvoufázové proudění vody a vzduchu s vlastnostmi odpovídajícími konstantní teplotě 25°C. Tepelná výměna a přeměna energie na teplo není uvažována. Kavitace není uvažována. Referenční tlak je 1 atm.

Modelování turbulence

Proudění bylo řešeno metodou RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Jako model turbulence byl zvolen model Shear Stress Transport. Proudění v blízkosti stěny bylo řešeno pomocí stěnové funkce.

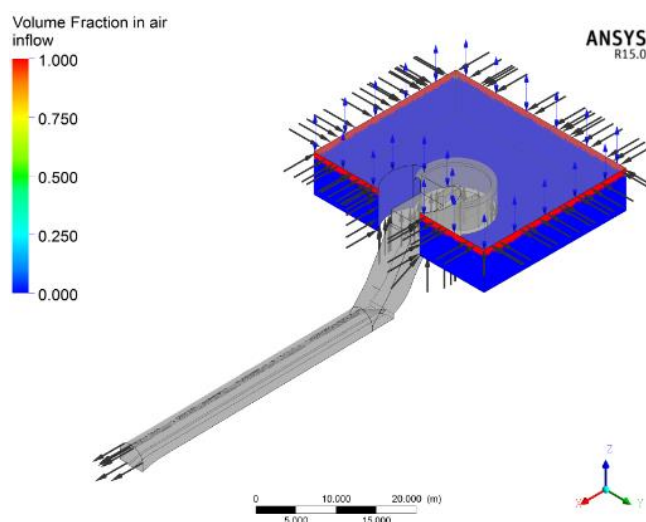
Stacionární analýza

S ohledem na výpočetní náročnost byla provedena pouze stacionární analýza. Z tohoto důvodu nebudou postiženy některé dynamické jevy. Jejich výskyt byl omezen navrženou úpravou geometrie objektů. Po provedení úprav je proudění při Q_{100} poměrně stálé a blíží proudění ustálenému. Dodatečné dynamické zatížení objektů však nelze zanedbat a je třeba jej zohlednit při statickém výpočtu konstrukcí.

Okrajové podmínky

Vtok do modelu - Inflow

Přítok vody do matematického modelu je zajištěn okrajovou podmínkou „Inlet – Total Pressure“ s definovaným absolutním tlakem na vtoku pomocí hydrostatického trojúhelníku. Za předpokladu velmi malé vstupní rychlosti to odpovídá podmínce konstantní hladiny. Okrajová podmínka umožňuje pouze vstup do modelu, výstup z modelu je znemožněn.

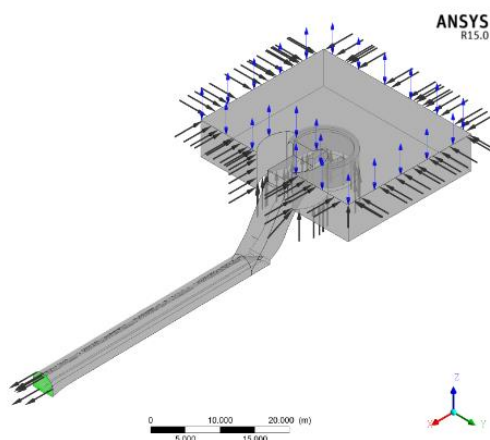


Obr. 130 Inflow. Modře je znázorněna oblast vstupu vody, červeně oblast vstupu vzduchu

Výtok z modelu - Outflow

Výtok vody z modelu je zajištěn okrajovou podmínkou „Outlet – Averaged Static Pressure“ s definovaným průměrným relativním tlakem na výtoku 0 kPa. Tato okrajová podmínka umožňuje

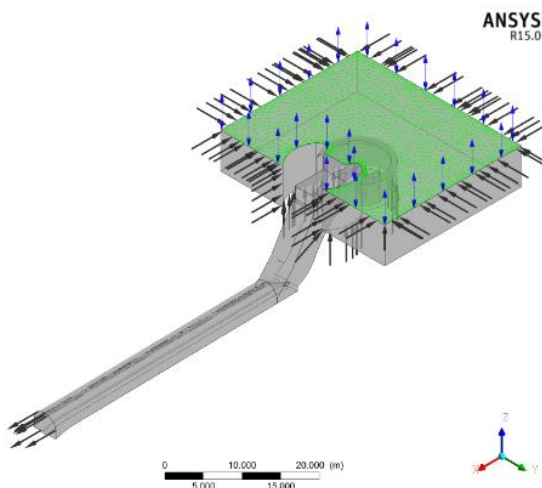
pouze výstup vody z modelu. Simuluje výtok do volného prostoru a odpovídá předpokladu nezatopeného výtoku z odpadní chodby.



Obr. 131 Outflow

Volná hladina - Top

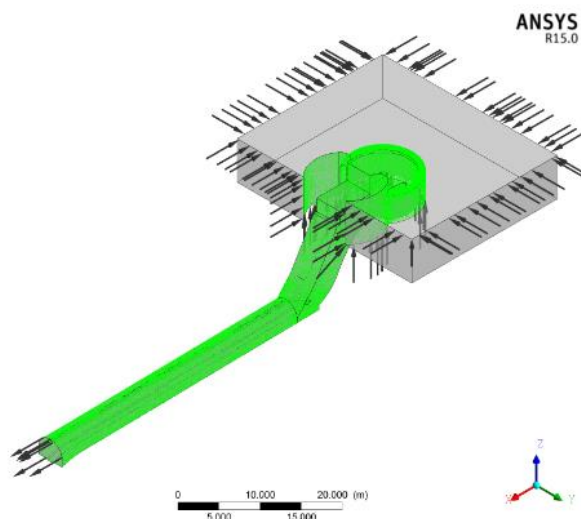
Volná hladina je simulována pomocí podmínky „Opening – Opening Pressure“ s definovaným průměrným relativním tlakem 0 kPa. Podmínka umožňuje volný vstup a výstup vzduchu z modelu při atmosférickém tlaku. Tím je umožněno kolísání hladiny vody.



Obr. 132 Top

Stěna – Wall

Pevné stěny konstrukcí jsou simulovány podmínkou „Wall – Rough Wall“. Proudění v blízkosti stěny je řešeno pomocí stěnové funkce.



Obr. 133 Wall

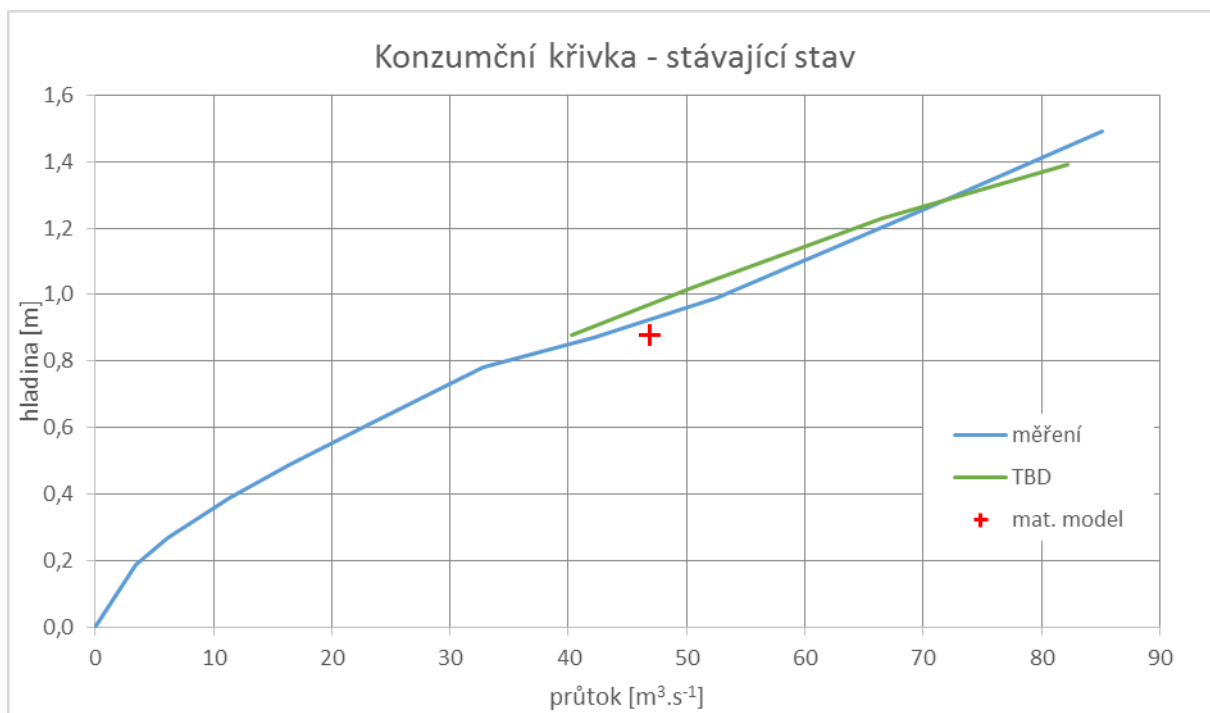
d. Výstupy

Výchozí geometrie – stávající stav

Bylo provedeno posouzení stávajícího stavu s jedním žebrem ve spadišti při hladině v nádrži odpovídající průtoku Q_{100} . Posouzení současně sloužilo jako verifikace matematického modelu. Porovnáním s výstupy z fyzikálního modelu byla zjištěna dobrá shoda získaných dat.

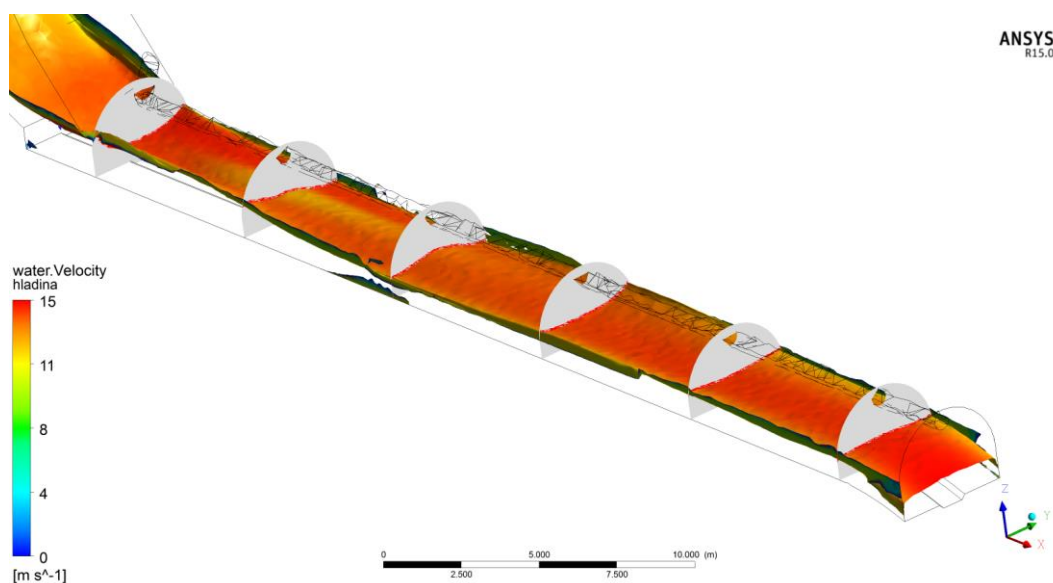
Vyhodnocení výstupů a porovnání s fyzikálním modelem

Výstupem z matematického modelu jsou především průběhy hladin a průtoky. Hladina v horní části modelu je dána vstupní okrajovou podmínkou. Zjištěný průtok matematickým modelem nám potom udává bod na konzumní křivce. Získaný bod odpovídá měřením provedeným na fyzikálním modelu.



Obr. 134 Výchozí stav – verifikace matematického modelu

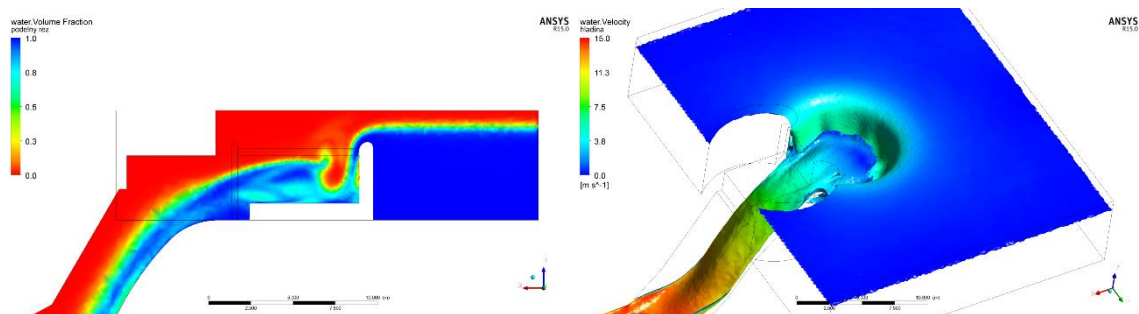
Hladiny v odpadní chodbě byly zjišťovány ve stejných profilech jako na fyzikálním modelu. V daném staničení byly vytvořeny řezné roviny. Na těchto rovinách byly izolovány plochy, kde je zastoupení vody ve výpočetních elementech větší než 10% a současně menší než 90%. Úroveň hladiny byla určena jako plošný průměr souřadnice Z této plochy. Tímto postupem byl omezen rozptyl způsobený velikostí elementů v místě hladiny.



Obr. 135 Vyhodnocení úrovně hladiny v odpadní chodbě

Tvar hladiny a dynamické jevy

Stacionární analýza nedokáže postihnout dynamické jevy, jako jsou pulsace proudění, které za stávajícího stavu výrazně ovlivňují charakter proudění. Na základě výstupů z matematického modelu se dají tyto jevy předpokládat (nefyzikální tvar hladiny ve spadišti), ale nedají se popsat.



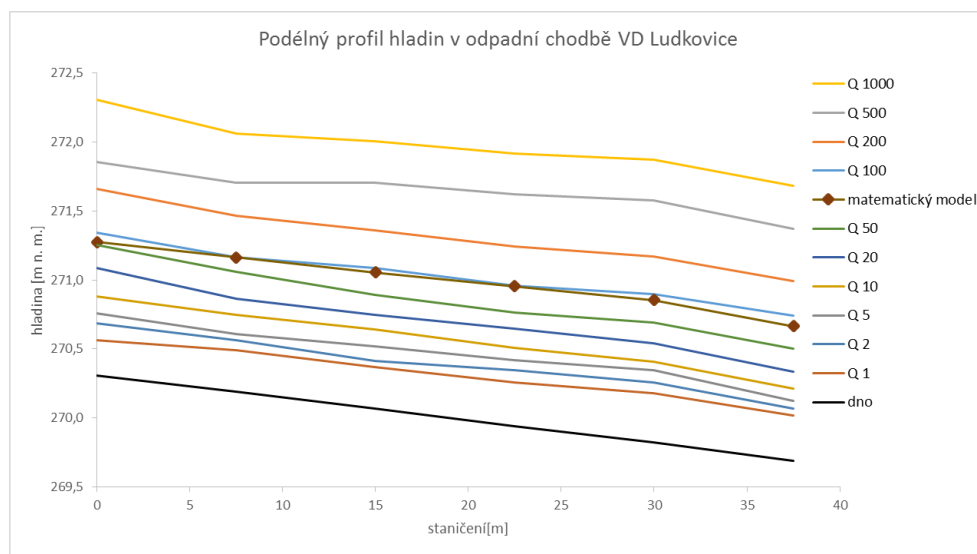
Obr. 136 Dynamické jevy ve spadišti

Finální geometrie – navrhované úpravy

Byl vytvořen upravený prostorový matematický model konstrukce na základě doporučení, která vzešla z měření na fyzikálním modelu. Byla provedena analýza pro průtok odpovídající při hladině v nádrži odpovídající průtoku Q_{100} .

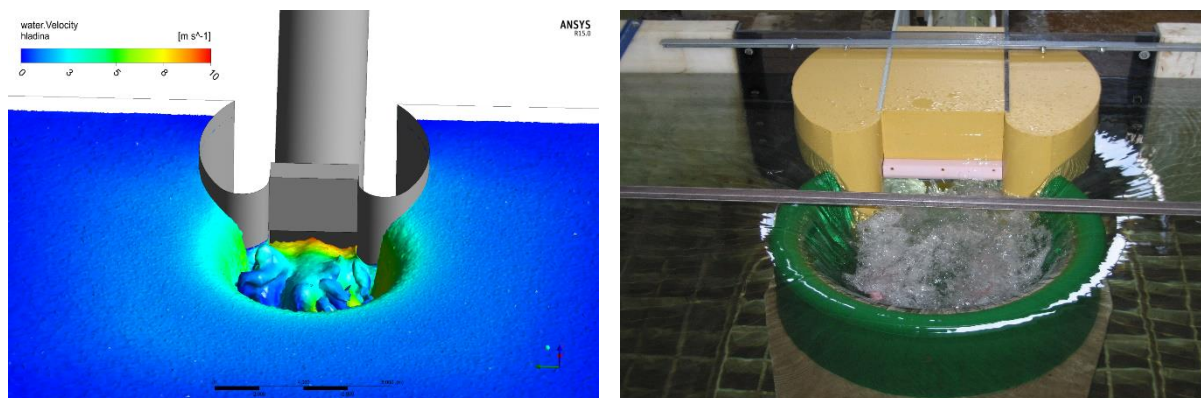
Vyhodnocení výstupů a porovnání s fyzikálním modelem

Bylo provedeno vyhodnocení úrovně hladiny v odpadní chodbě. Jak je patné z níže uvedeného grafu, získané hodnoty jsou ve velmi dobré shodě s fyzikálním modelem. Pokles v posledním zjišťovaném profilu je důsledkem blízkosti okrajové podmínky na výstupu.



Obr. 137 Podélný profil v odpadní chodbě

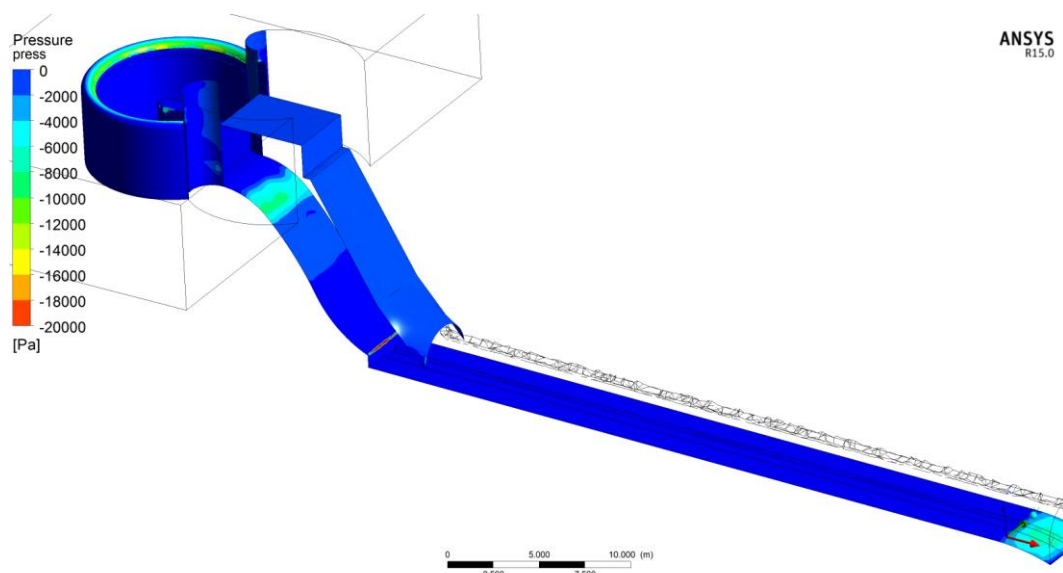
Tvar hladiny je fyzikální a svých charakterem odpovídá tvaru pozorovanému při měření.



Obr. 138 Spadiště při Q_{100}

Výstupy z modelu

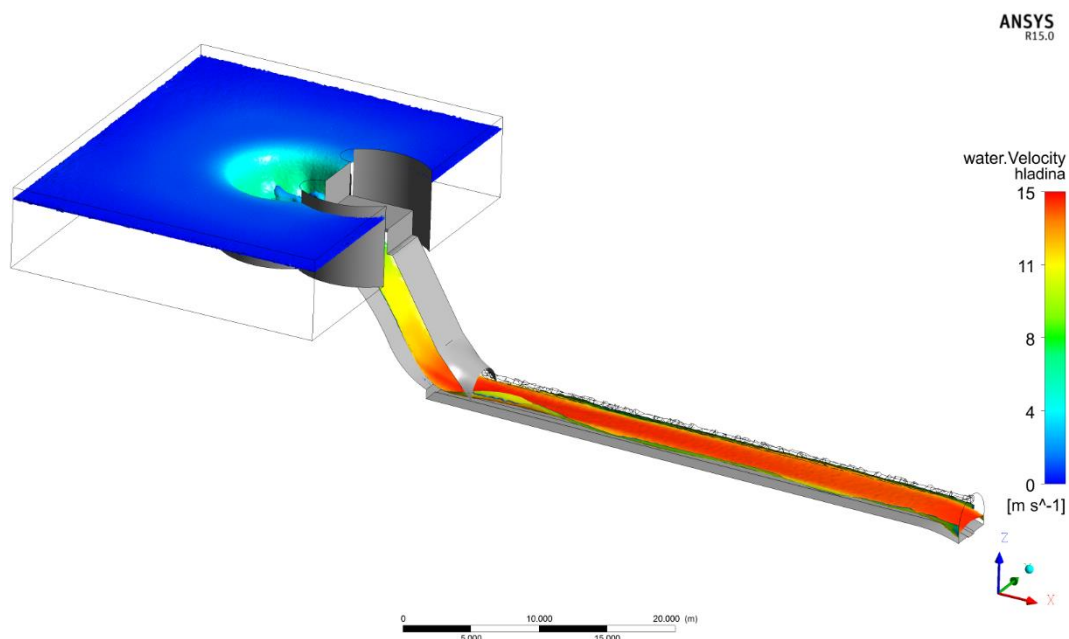
Bylo provedeno vyhodnocení podtlaků na konstrukci. Z níže uvedeného obrázku je patrné, že na konstrukci nevznikají extrémní podtlaky. Nejohroženějším místem je samotný přeliv a hrana nad spodními výpustmi.



Obr. 139 Podtlaky při Q_{100}

Na základě analýzy rychlostního pole bylo zjištěno, že rychlosti v odpadní chodbě při Q_{100} nepřekračují 15 ms^{-1} . Hladiny uvedené v podélném profilu jsou průměrné. Vzhledem k velkým

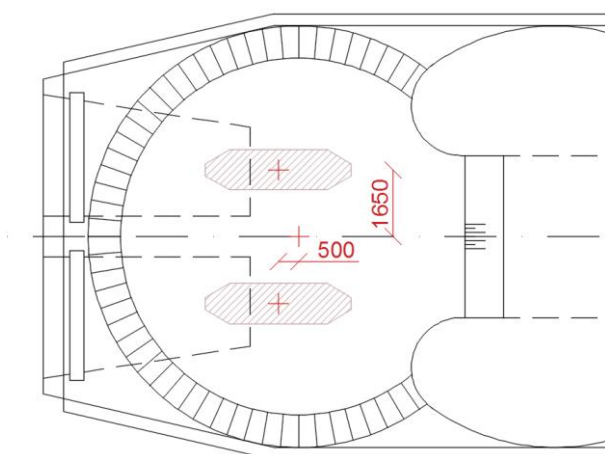
rychlostem dochází „vybíhání“ vody nad tuto úroveň a to především na pravé straně odpadní chodby.



Obr. 140 Rychlosti na hladině při Q_{100}

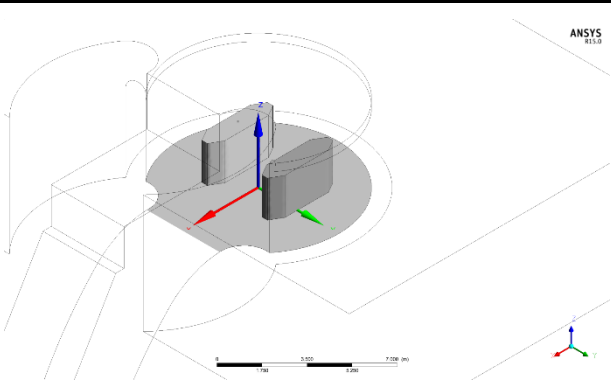
Bylo provedeno vyhodnocení zatížení na konstrukci. Výpočet ustáleného stavu nepostihuje pulzace proudění, které se na konstrukci tohoto typu budou vyskytovat a budou významnou částí celkového zatížení. Při statickém výpočtu je třeba toto dynamické zatížení vzít v úvahu.

Momenty a posuvné síly byly vyčísleny vzhledem k těžišti podstavy jednotlivých rozrážeců. Pravý a levý rozrážec je určen při pohledu po směru osy X.

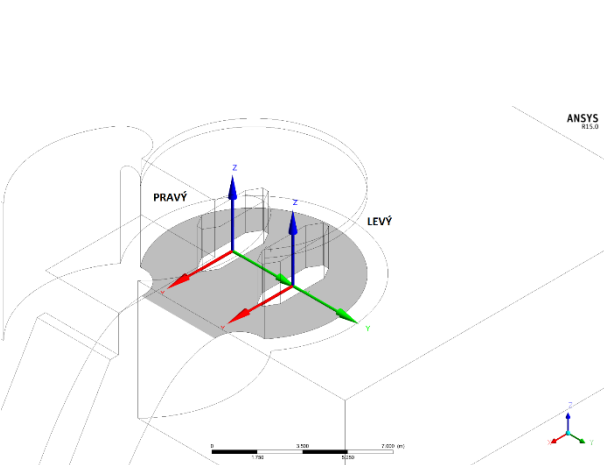


Obr. 141 Půdorysné umístění souřadných systémů pro vyhodnocení zatížení

Tab. 21. Zatížení konstrukcí – výstup z modelu ustáleného proudění

Síla na dno přelivného objektu			
	Posuvná síla		
osa		dno	
X	Fx	-0,4 kN	
Y	Fy	0,2 kN	
Z	Fz	-1 416,6 kN	

Síly a momenty na rozrážce		
Posuvná síla		
	pravý	levý
Fx	11,6 kN	12,0 kN
Fy	52,0 kN	-63,7 kN
Fz	-12,5 kN	-18,9 kN
Moment		
	pravý	levý
Mx	-68,9 kN m	66,2 kN m
My	2,1 kN m	10,1 kN m
Mz	-4,9 kN m	-3,9 kN m

		
---	--	--

XII. Závěr k modelovému výzkumu

Z provedeného hydrotechnického fyzikálního modelového výzkumu VD Bojkovice a VD Ludkovice vyplývá:

- Fyzikální model je vybudován dle skutečných rozměrů obou vodních děl.
- Výrobní tolerance modelu byla kontrolována a dosahuje ± 1 mm - tj. ve skutečnosti ± 15 mm.
- Fyzikální model věrně popisuje proudění vody na skutečných vodních dílech.
- Měření na modelu (hladiny, tlaky a průtoky) byla prováděna v celém zadaném rozsahu sledovaných průtoků.
- Výsledky z měření lze hodnověrně aplikovat do manipulačních řádů i vyhodnocení povodňových průtoků na VD Bojkovice a VD Ludkovice.
- Konzumní křivky bezpečnostních přelivů jsou pro daný rozsah poloh hladin na obr. 142 a 143.
- Tlaky a pulsace tlaků ve spadišti byly zaznamenávány v časovém úseku jedné minuty (pro záznam 1 kHz) a dvou minut (pro záznam 1 Hz).
- Měření hladin v nádrži, v odpadní chodbě a v korytě pod vodním dílem bylo prováděno pomocí hrotového měřítka a nalepených měřítek.
- Měření na modelu probíhalo v 17 variantách:
 - zkrácená přelivná hrana,
 - zavzdušnění pod přelivem,
 - 2 usměrňovací křídla zaoblená,
 - dno spadiště se sklonem 11,8%,
 - rozdělovací žebro výšky 4 m,
 - dvě usměrňovací žebra šířky 0,5 m, výšky 2 m,
 - 2 usměrňovací křídla rovinná,
 - stávající žebro plus dvě usměrňovací žebra šířky 0,5 m, výšky 2 m,
 - dvě usměrňovací žebra šířky 1 m, výšky 2 m,
 - zaoblení horní hrany vtokového okna,
 - zkosení horní hrany vtokového okna (0,5 m),
 - zkosení horní hrany vtokového okna (1 m),
 - rozrážeče ve vývaru (5 ks, 0,5x0,5x0,5 m, 3-2),
 - rozrážeče ve vývaru (3 ks, 1x1x1 m, 2-1),

- rozrážeče ve vývaru posunuty do poslední třetiny vývaru (3 ks, 1x1x1 m, 2-1),
 - rozrážeče ve vývaru (2ks, 1x1x1 m),
 - rozrážeče ve vývaru (1ks, 1x1x1 m).
- Úpravy spadiště, vtokového okna do skluzu a vývaru lze na základě fyzikálních modelů jednoznačně doporučit.
 - Byla provedena matematická analýza stávajícího a nově navrhovaného stavu pro průtok (resp. úroveň hladiny v nádrži) odpovídající Q_{100} .
 - Matematický model byl verifikován porovnáním s daty získanými na fyzikálním modelu.
 - Byla zjištěna dobrá shoda získaných dat porovnáním matematického a fyzikálního výzkumu.
 - Na matematickém modelu bylo provedeno ověření kapacity přelivu, podélného profilu hladiny v odpadní chodbě a byly vyhodnoceno rychlostní pole a podtlaky na konstrukci.

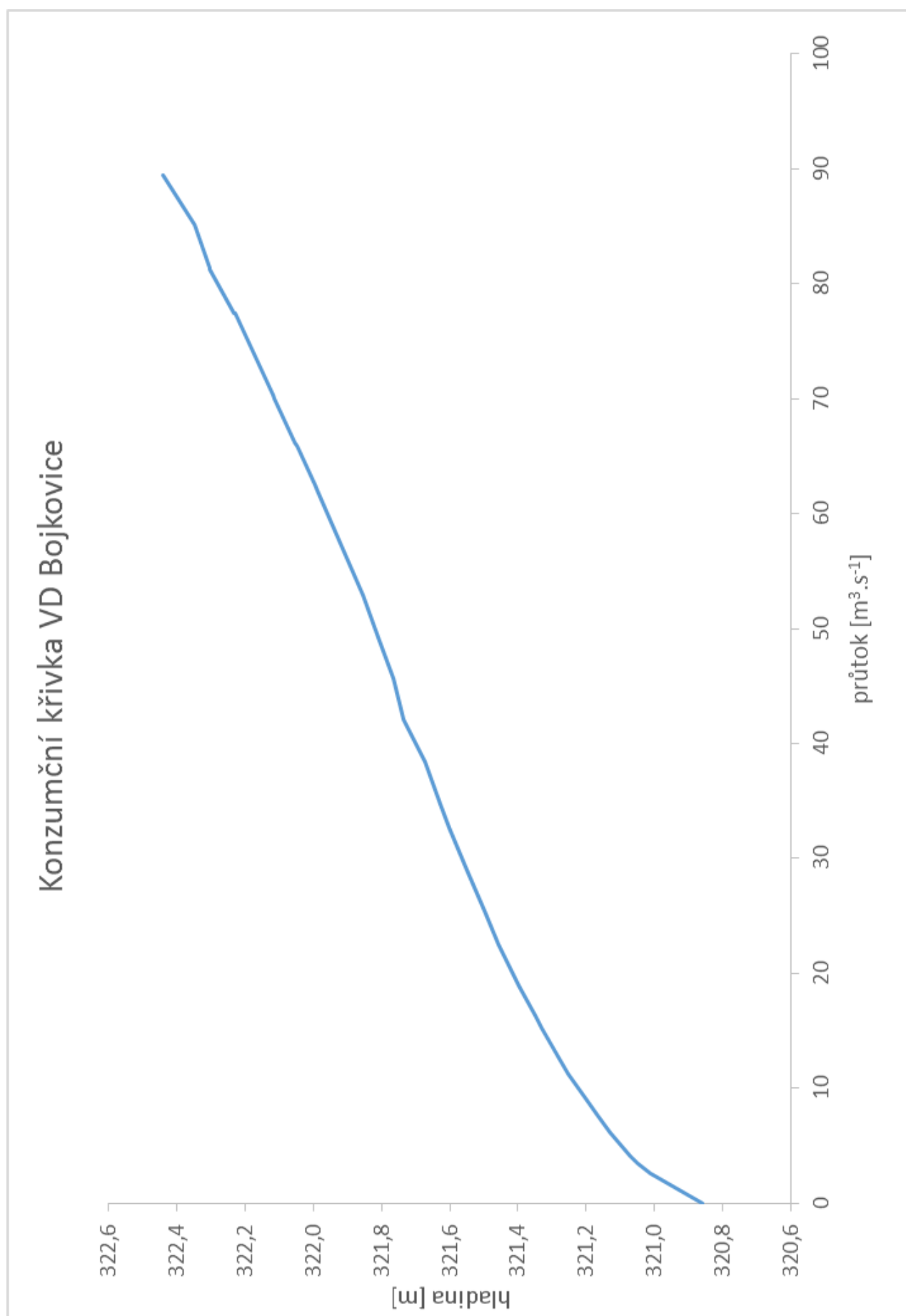
Konečné uspořádání konstrukčních úprav VD Bojkovice a VD Ludkovice:

Celkem bylo provedeno 40 různých kombinací měření a 17 variant dispozičního a konstrukčního řešení nově navrhovaných konstrukčních prvků na přelivu, ve spadišti a ve vývaru pro řadu N-letých průtoků. Měření byla provedena pro vodní dílo Bojkovice a pro vodní dílo Ludkovice. Pro varianty měření se sledovaly polohy hladin v nádrži, v odpadní chodbě a vývaru, byl měřen tlak a tlakové pulzace ve spadišti a odpadní chodbě a měřen průtok přes přeliv a spodními výpustmi. Byla provedena optimalizace konstrukčních prvků na přelivu i spadišti za účelem eliminace pulzací nejen ve spadišti, ale i ve vývaru pro zajištění jejich bezpečné funkce. Byly provedeny potřebné hydraulické výpočty přelivu, spadiště, skluzu, odpadní chodby a vývaru. Hydraulické výpočty byly zpřesněny na základě měření na fyzikálním modelu.

Bezpečnostní přeliv. Výška hladiny v nádrži VD Ludkovice při maximálním transformovaném průtoku $Q_{1000} = 82,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 7,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 285,50 m n. m., přičemž MBH je 285,55 m n. m. Výška hladiny v nádrži VD Bojkovice při maximálním transformovaném průtoku $Q_{1000} = 89,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (spodní výpusti převádí průtok $Q = 12,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je 322,22 m n. m., přičemž MBH je 322,68 m n. m.

Tab. 22. Konzumní křivka bezpečnostního přelivu na VD Bojkovice

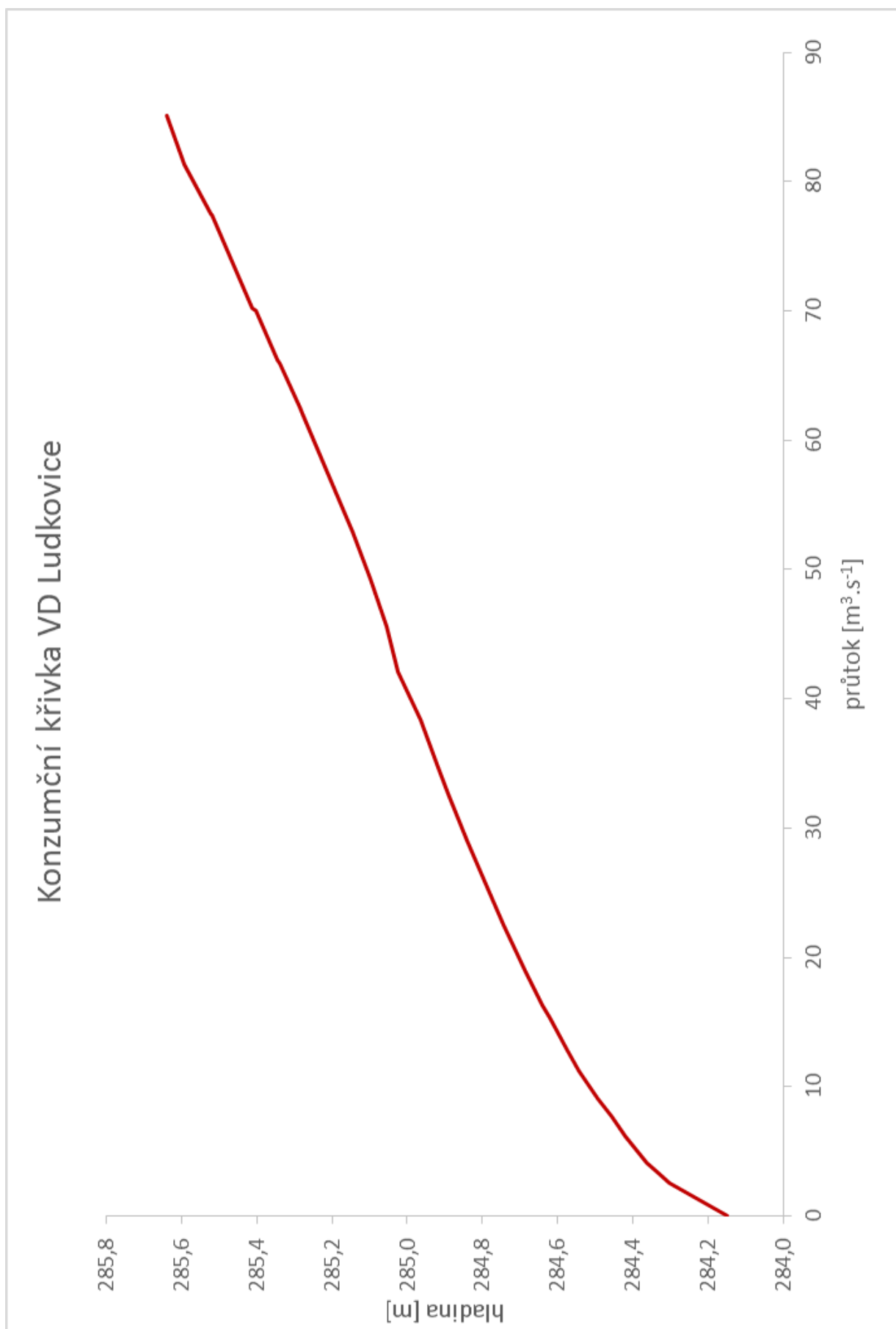
hloubka	hladina	průtok
[m]	[m n. m.]	[m ³ .s ⁻¹]
0,00	320,86	0,0
0,15	321,01	2,5
0,19	321,05	3,4
0,21	321,07	4,1
0,27	321,13	6,1
0,31	321,17	7,7
0,34	321,20	9,1
0,39	321,25	11,3
0,42	321,28	12,8
0,47	321,33	15,2
0,49	321,35	16,3
0,54	321,40	19,0
0,60	321,46	22,5
0,64	321,50	25,4
0,69	321,55	29,0
0,74	321,60	32,7
0,77	321,63	34,7
0,81	321,67	38,3
0,87	321,73	42,1
0,90	321,76	45,6
0,95	321,81	49,2
0,99	321,85	52,9
1,13	321,99	62,0
1,14	322,00	62,5
1,19	322,05	65,9
1,20	322,06	66,2
1,25	322,11	70,0
1,26	322,12	70,2
1,37	322,23	77,4
1,37	322,23	77,5
1,44	322,30	81,3
1,44	322,30	81,3
1,49	322,35	85,1
1,58	322,44	89,4



Obr. 142 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu na VD Bojkovice

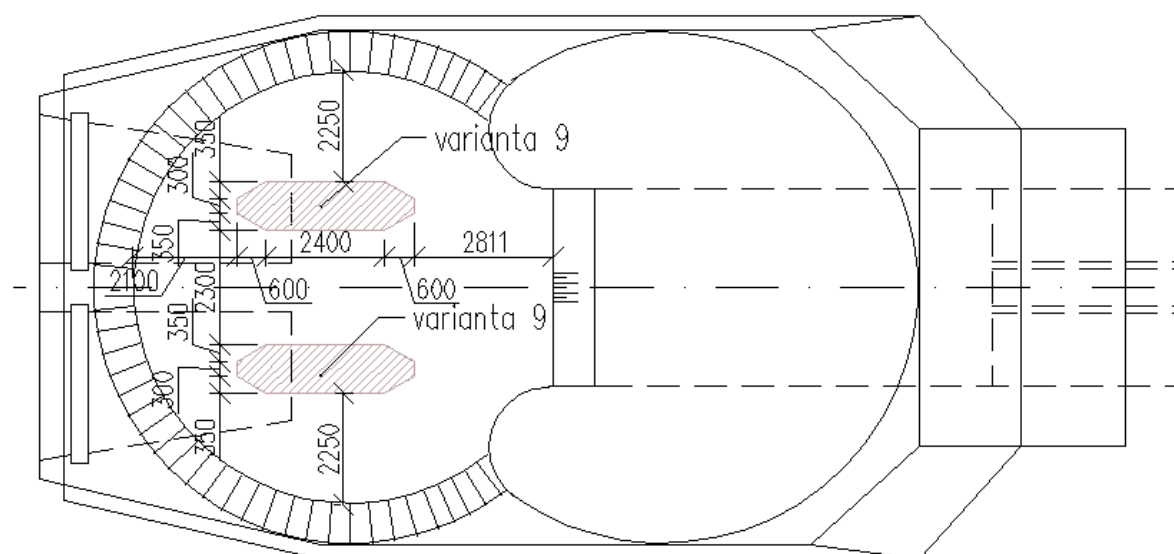
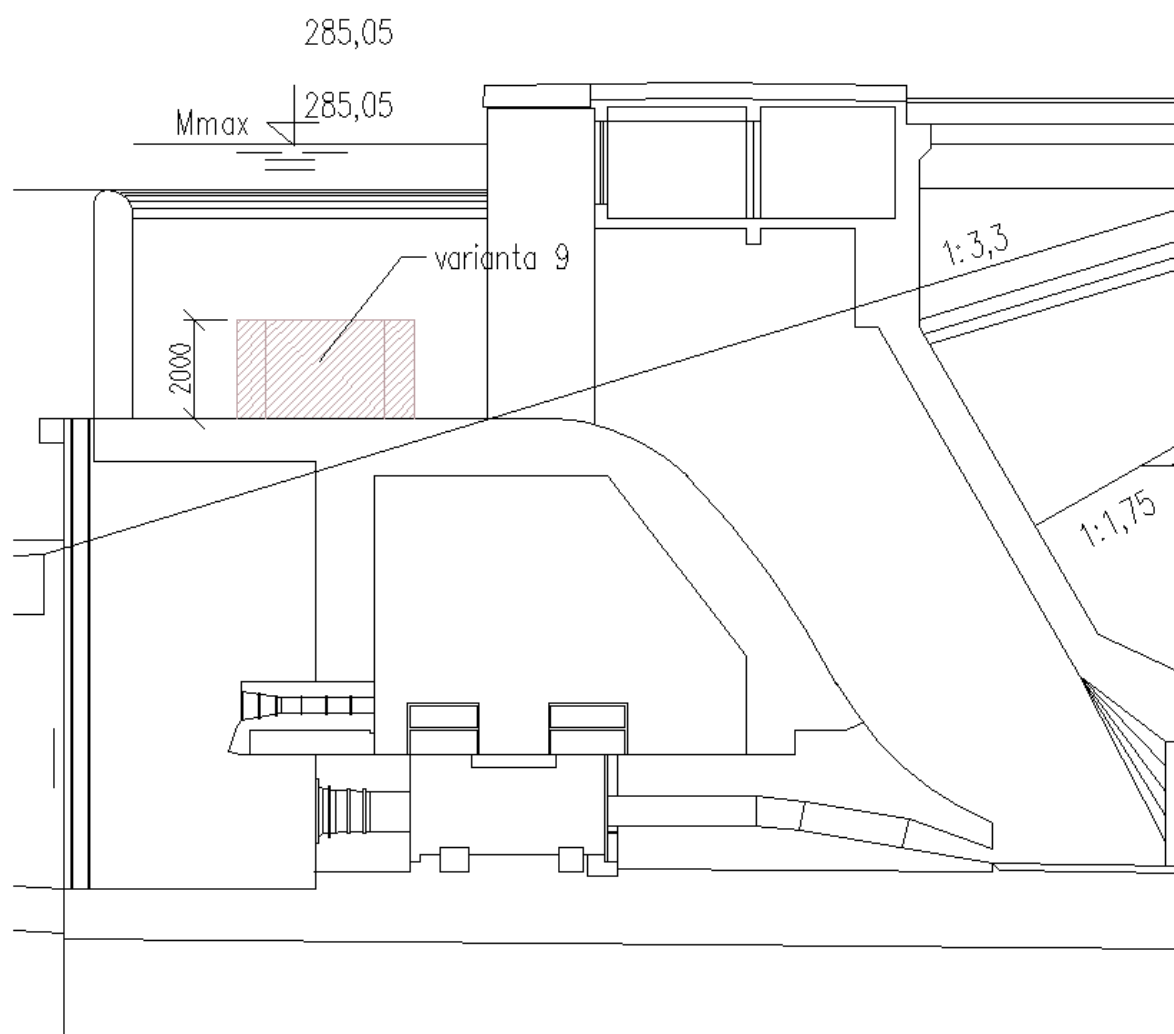
Tab. 23. Konzumní křivka bezpečnostního přelivu na VD Ludkovice

hloubka	hladina	průtok
[m]	[m n. m.]	[m ³ .s ⁻¹]
0,00	284,15	0,0
0,15	284,30	2,5
0,19	284,34	3,4
0,21	284,36	4,1
0,27	284,42	6,1
0,31	284,46	7,7
0,34	284,49	9,1
0,39	284,54	11,3
0,42	284,57	12,8
0,47	284,62	15,2
0,49	284,64	16,3
0,54	284,69	19,0
0,60	284,75	22,5
0,64	284,79	25,4
0,69	284,84	29,0
0,74	284,89	32,7
0,77	284,92	34,7
0,81	284,96	38,3
0,87	285,02	42,1
0,90	285,05	45,6
0,95	285,10	49,2
0,99	285,14	52,9
1,13	285,28	62,0
1,14	285,29	62,5
1,19	285,34	65,9
1,20	285,35	66,2
1,25	285,40	70,0
1,26	285,41	70,2
1,37	285,52	77,4
1,37	285,52	77,5
1,44	285,59	81,3
1,44	285,59	81,3
1,49	285,64	85,1



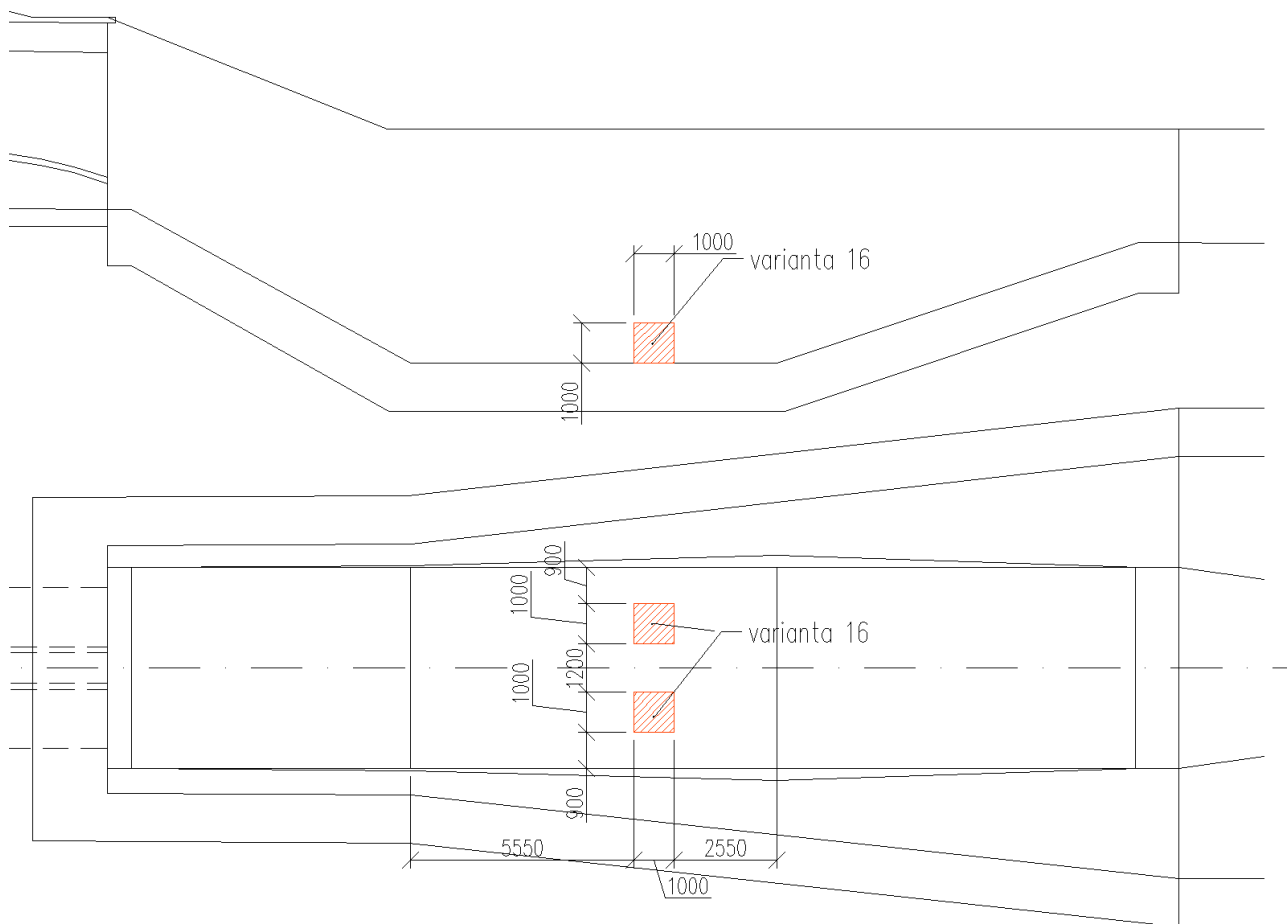
Obr. 143 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu na VD Ludkovice

Úpravy na přelivu a ve spadišti. Vyhodnocení vlivu konstrukčních úprav přelivu a spadiště na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi. Vyhodnocení konstrukčních úprav přelivu a skluzu: pulzace nejvíce eliminuje varianta s dvěma podélnými žebry ve spadišti (varianta 6 – měření 19 a 23, varianta 8 – měření 21 a 25 a varianta 9 – měření 26 a 27) a zároveň tyto úpravy neovlivňují kapacitu přelivu. Pro lepší statickou a dynamickou stabilitu usměrňovacího žebra je doporučována k realizaci varianta 9 – měření 26 a 27, kde šířka usměrňovacího žebra je 1 m. Tyto úpravy předpokládají odstranění stávajícího středového žebra ve spadišti. Závěr: frekvence pulzací tlaku v odpadní chodbě: měření 9 a měření 11 ukazuje na dominantní frekvence pulzací v odpadní chodbě, ostatní měření ukazují na odstranění těchto dominantních frekvencí pulzací. Z uvedeného plyne závěr, že propagace pulzací tlaku do odpadní chodby je utlumena.



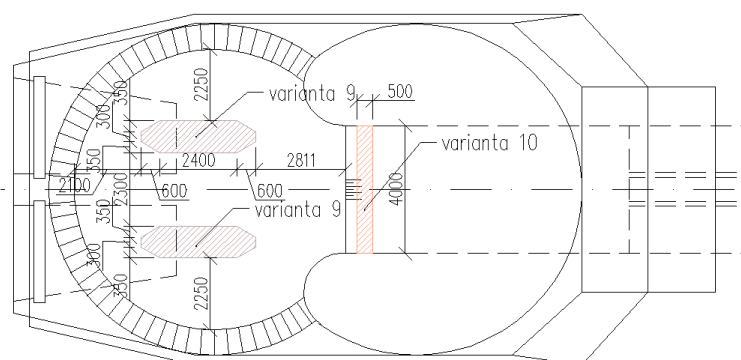
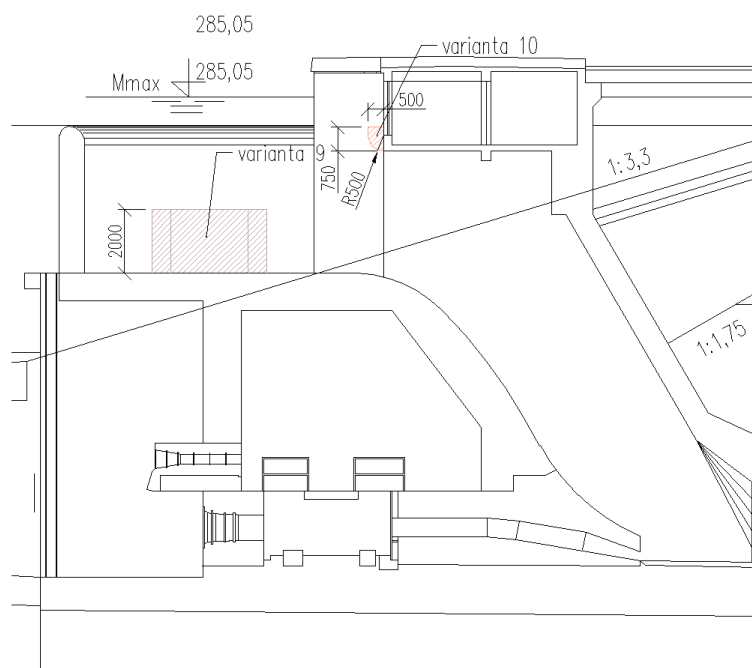
Obr. 144 Výkres rovnoběžných usměrňovacích žeber ve spadišti

Rozrážeče ve vývaru. Stávající vývar plní svoji funkci až do průtoku Q_{100} . Při vyšších povodních vývar přestává plnit svoji funkci, proto bylo přistoupeno k úpravám ve vývaru vedoucí ke zlepšení tlumení kinetické energie ve vývaru. Vyhodnocení úprav ve vývaru: na správnou funkci vývaru mají nejvíce příznivý vliv 2 rozrážeče o rozměrech 1x1x1 m – měření 21 – varianta 16, a to při všech N-letých průtocích - i při $Q_{1\,000}$.

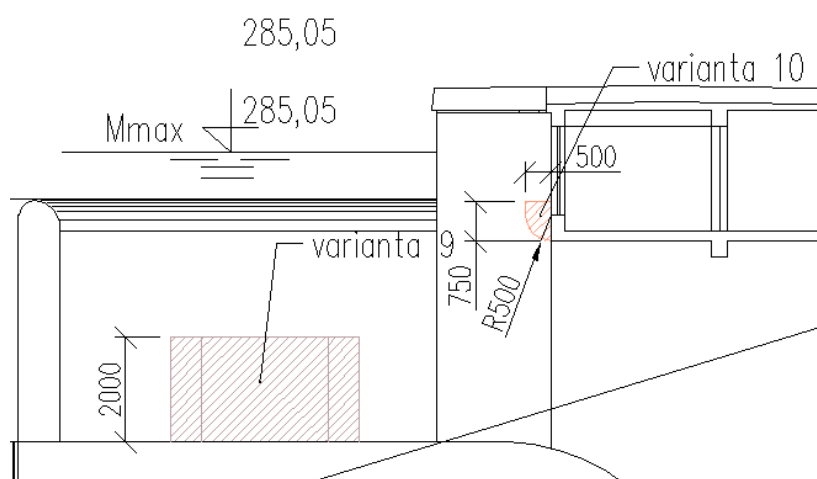


Obr. 145 Výkres rozrážečů ve vývaru

Úprava vtokového okna. Vyhodnocení vlivu úprav vtokového okna do skluzu na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo provedeno na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro průtokové varianty Q_{200} , Q_{500} a $Q_{1\,000}$ s uzavřenými spodními výpustmi. Závěr: žádná z variant neovlivňuje kapacitu přelivu. Pro lepší statickou a dynamickou stabilitu spadiště, skluzu a odpadní chodby doporučujeme k realizaci variantu úpravy vtokového okna do skluzu pomocí hydraulicky vhodného zaoblení horní hrany konstrukce strojovny.



Obr. 146 Výkres zaoblení horní hrany vtokového okna



Obr. 147 Výkres detailu zaoblení horní hrany vtokového okna

Manipulace spodními výpustmi. Vyhodnocení vlivu spodních výpustí při výsledné variantě VD Bojkovice a VD Ludkovice na tlak a pulzace v odpadní chodbě bylo provedeno na základě průměrného tlaku a směrodatné odchylky pro všechny průtokové varianty s uzavřenými spodními výpustmi, otevřenou levou spodní výpustí, otevřenou pravou spodní výpustí a s otevřenými oběma spodními výpustmi. Závěr: spodní výpustě nemají žádný vliv na hladinu, tlak a tlakové pulzace v odpadní chodbě, a tím i na kapacitu odpadní chodby při převádění povodňových průtoků.

Zavzdušnění skluzu. Porovnání výsledků měření hladin, tlaků a pulzací tlaků na přelivu, ve spadišti a v odpadní chodbě na VD Ludkovice a VD Bojkovice lze udělat závěr, že zavzdušnění skluzu nemá vliv na proudění v oblasti přelivu, skluzu a odpadní chodby. VD Ludkovice má zavzdušnění skluzu potrubím o průměru 500 mm a VD Bojkovice nemá zavzdušnění skluzu žádné.

Kapacita odpadní chodby a vodárenské potrubí. Na VD Ludkovice a na VD Bojkovice hladina vody v odpadní chodbě nedosahuje úrovně vodárenského potrubí, proto vodárenské potrubí neovlivňuje proudění vody v odpadní chodbě. Volná hladina v odpadní chodbě při průtoku $Q_{1\,000}$ na VD Ludkovice a na VD Bojkovice je po celé délce odpadní chodby, je zde hloubka 2,0 m na počátku odpadní chodby, což je 0,7 m pod stropem odpadní chodby.