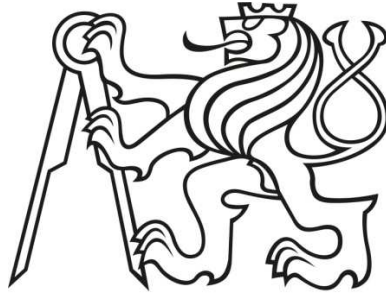


**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Katedra hydrotechniky**



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VD Harcov – posouzení rekonstrukce na fyzikálním  
hydraulickém modelu**

**The Harcov dam – assessment of the reconstruction on physical  
hydraulic model**

Ing. Martin KRÁLÍK, Ph.D.

Květen 2018

Bc. Alice BOHATÁ

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „*O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací*“.

V Praze, 20. května 2018

.....

*Bc. Alice Bohatá*

## **Poděkování**

Děkuji především Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady, připomínky a odborné vedení diplomové práce. Mé poděkování patří též katedře hydrotechniky a jejím zaměstnancům, kteří byli nápomocni při zhotovení modelu a následném měření. Děkuji rovněž Bc. Pavlu Krtičkovi za sepsání programu pro vykreslování grafů rychlostních polí.

## **Abstrakt**

Pro snadnější výběr vhodné varianty rekonstrukce vodního díla Harcov, plánované na roky 2019 - 2021, byl ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební postaven fyzikální hydraulický model s celkem 30 variantami řešení. Pro porovnání jednotlivých variant byly měřeny a následně vyhodnoceny rychlosti proudění na konci úpravy a také hloubky vody na jednotlivých stupních kaskády.

Výsledky této práce umožňují výběr vhodné úpravy bezpečnostního přelivu i podhrází s ohledem na vývoj hloubek a rychlostí v měřeném profilu tak, aby vodní dílo Harcov splňovalo požadavky na bezpečnost VD II. stupně za povodní.

## **Klíčová slova**

Fyzikální model, přehrada, bezpečnostní přepad, spodní výpust

## **Abstract**

To facilitate the selection of the appropriate option of reconstruction of the Harcov dam, planned for the years 2019 - 2021, a physical hydraulic model with a total of 30 solutions has been built in the water management laboratory of the Faculty of Civil Engineering. For the comparison of the individual options, the flow velocity at the end of the reconstruction and also the depth of water at each stage of the cascade have been measured and subsequently evaluated.

The results of this thesis allow the selection of suitable modifications of the emergency spillway and downstream apron with regard to the development of depths and velocities in the measuring profile so that the Harcov dam meet the requirements for the safety of dam II. category during the flood.

## **Key words**

Physical model, water dam, spillway, bottom outlet

## Obsah

1	ÚVOD .....	3
2	VODNÍ DÍLO HARCOV .....	4
2.1	Historie.....	4
2.2	Účely vodního díla.....	4
2.3	Rozdělení prostoru nádrže .....	5
2.4	Popis vodního díla .....	5
2.4.1	Hráz .....	5
2.4.2	Bezpečnostní přeliv .....	9
2.4.3	Spodní výpusti .....	9
3	FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ .....	11
3.1	Účel výzkumu na fyzikálních modelech.....	11
3.2	Podobnost a modelové podmínky .....	11
3.3	Měřítko fyzikálního modelu.....	13
3.4	Popis fyzikálního modelu .....	14
4	MĚŘENÍ NA FYZIKÁLNÍM MODELU .....	16
4.1	Program pokusů .....	18
	Měření M1 – M20 .....	20
	Měření M21 – M32 .....	20
4.1.1	Měření 1 - 3 .....	21
4.1.2	Měření 4 – 6.....	22
4.1.3	Měření 7 – 10.....	23
4.1.4	Měření 11.....	23
4.1.5	Měření 12 – 14.....	24
4.1.6	Měření 15.....	25
4.1.7	Měření 16.....	25
4.1.8	Měření 17 – 20.....	26
4.1.9	Přehled úprav v podhrází (M21 – M32) .....	27
5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	30
5.1	Úbytek energie na kaskádovém skluzu.....	30
5.2	Výšky hladin v nádrži .....	32
5.3	Rychlostní pole .....	34

5.3.1	Bezpečnostní přeliv .....	35
5.3.2	Levá spodní výpust.....	36
5.3.3	Pravá spodní výpust.....	37
5.3.4	Obě spodní výpusti .....	39
5.3.5	Přeliv a spodní výpusti .....	40
5.3.6	Manipulace spodními výpustmi při průtoku $Q \approx 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .....	41
6	ZÁVĚR.....	42
7	BIBLIOGRAFIE .....	43
8	SEZNAM PŘÍLOH .....	44

# 1 ÚVOD

Vodní dílo Harcov, patřící do soustavy přehrad pro regulaci odtokových poměrů v povodí Lužické Nisy, z počátku 20. století, je podle zpracovaného posudku bezpečnosti vodního díla za povodní (2006) nevyhovující.

Rekonstrukce plánovaná na roky 2019 – 2021 by měla zajistit bezpečné převedení extrémních povodí. Pro snadnější výběr vhodné varianty rekonstrukce vodního díla Harcov, byl ve vodohospodářské laboratoři fakulty stavební postaven fyzikální hydraulický model s celkem 30 variantami řešení. Pro porovnání jednotlivých variant byly měřeny a následně vyhodnoceny rychlosti proudění na konci úpravy a také výšky hladiny vody v nádrži a na jednotlivých stupních kaskádového skluzu.

Výsledky této práce umožňují výběr vhodné manipulace a úpravy bezpečnostního přelivu i podhrází s ohledem na vývoj hloubek a rychlostí v měřeném profilu tak, aby vodní dílo Harcov splňovalo požadavky na bezpečnost VD II. stupně za povodní

## 2 VODNÍ DÍLO HARCOV

Název stavby:	Vodní dílo Harcov
Provozovatel:	Povodí Labe, s. p.
Kraj:	Liberecký
Okres:	Liberec
Tok:	Harcovský potok
Č. hydrologického pořadí:	2-04-07-014
Plocha povodí:	15,60 km <sup>2</sup>

### 2.1 Historie

Přehrada Harcov byla v katastru města Liberec vybudována v letech 1902 až 1904. Původně byla postavena na okraji města Liberec, ale postupným rozvojem města se stala městskou přehradou. Vodní dílo Harcov patří do soustavy přehrad pro regulaci odtokových poměrů v povodí Lužické Nisy. Podnětem k výstavbě přehrady byly katastrofální povodně na konci 19. století, zejména povodeň z 30. července 1897, kdy byl zjištěn nevyšší průtok Harcovským potokem v Liberci 20 m<sup>3</sup>/s.

Zděná, gravitační, půdorysně zakřivená přehrada s výškou 19 m se nachází na Harcovském potoce v říčním km 1,68. Stavební práce byly zahájeny v listopadu 1902, skončeny v prosinci 1903. Konečná kolaudace byla provedena dne 29. dubna 1904. Komplexně byla přehrada dokončena v červnu 1904. V listopadu téhož roku zadržela přehrada povodeň o objemu 230 000 m<sup>3</sup>. (1)

### 2.2 Účely vodního díla

Hlavními účely Harcovské přehrady jsou podle platného manipulačního řádu (MŘ):

- 1) Zmírnění velkých vod a částečná ochrana území ležícího pod nádrží a dalšího povodí Lužické Nisy před velkými vodami.
- 2) Zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod nádrží.
- 3) Zajištění odběru pro průmyslovou spotřebu.
- 4) Energetické využití odtoku z nádrže k výrobě elektrické energie v průběžné vodní elektrárně, která je součástí vodního díla.



- 5) Nadlepšení průtoku při havarijním znečištění vody v toku pod nádrží nebo jeho přítocích.
- 6) Individuální rekreace a sportovní rybaření.

## 2.3 Rozdělení prostoru nádrže

Tab. 1- Rozdělení prostoru nádrže

Vyčleněný prostor	Kóta hladiny [m n. m. (Bpv)]	Objem [tis. m <sup>3</sup> ]	Zatopená plocha [tis. m <sup>2</sup> ]
Prostor stálého nadržení	364,9	48,50	34,324
Zásobní prostor nádrže	370,5	350,42	101,249
Celkový ovladatelný prostor	372,9	630,00	133,860
Ochranný neovladatelný prostor	373,4	56,89	140,654
Celkový prostor	373,4	686,89	140,654

## 2.4 Popis vodního díla

Vodní dílo Harcov se skládá z těchto základních objektů:

Tab. 2 - Objekty vodního díla Harcov

Č. obj.	Objekt
1	Vzdouvací objekt (zděná hráz)
2	Spodní výpusti (2x DN 800)
3	Bezpečnostní přeliv
4	Malá vodní elektrárna
5	Odběrné potrubí
6	Štěrková zdrž
7	Rozdělovací objekt

Pro účely výzkumu jsou významné pouze objekty 1-3, zbylé již proto dále nejsou zmiňovány.

### 2.4.1 Hráz

Vzdouvací objekt tvoří gravitační hráz zděná z lomového kamene, půdorysně zakřivená (R = 120 m v hraně vzdušního líce).

## Založení hráze

Hrázové zdivo je založeno na skalním podkladě (hrubozrnná liberecká žula). Jedná se o porfyrickou biotonickou žulu.

Zdravá skála byla nalezena v hloubce 4 až 6 m pod terénem. Základová spára byla očištěna tlakovou vodou. Veškeré trhliny byly zality cementotrasovou maltou a v místech, „kde toho bylo třeba“ byly vybetonovány zazubené základy. Při výkopu se v podloží objevila řada pramenů a průsaků z okolního terénu, které podchytila drenáž o průměru 100-150 mm, položená před návodním lícem zdi. Takto svedená voda se přečerpávala do potoka před hrází. Později po vyzdění hráze byl prostor mezi lícem zdiva a skálou vyplněn cementotrasovým betonem. Z drenáže byla voda vyčerpána a zalita cementovým mlékem. Jen některé silnější prameny byly svedeny do příčné chodby spodních výpustí.

Utěsnění na základové spáře hráze nebo v jejím podloží se neprováděla. Injekční práce v dnešním pojetí ještě nebyly v té době používány. Určité těsnící účinky dále mají úpravy u návodní paty hráze a návodní předsyp.

Těsnění podloží nebylo provedeno ani v dalším provozu VD.

## Současné parametry hráze

Kóta koruny hráze	373,90 m n. m.
Délka koruny hráze	157 m
Šířka koruny hráze	4,5 m
Šířka hráze v patě	16,1 m
Max. výška hráze nad terénem	cca 13,0 m
Max. výška hráze nad zákl. spárou	19,0 m
Sklon návodního líce	1:0,125, od kóty 362,90 m n. m. přechází ke dnu mírným obloukem až do sklonu 1:0,5
Sklon vzdušního líce	1:0,4 plynule se mění směrem ke dnu až do sklonu 1:0,75

Na návodní straně před zděnou částí hráze je ochranný předsyp krytý kamenným násypem s urovnaným povrchem ve sklonu 1:2 vyvedeným do kóty 368,60 m n. m.

### **Materiál hráze**

Zdivo hráze je z místního lomového kamene (žula) zděné na maltu cementotrasovou (objemově 1:1). Složení malt: cementová 1:3, trasová (1,5 dílu trasu, 1 dílu vápna, 1,75 dílu písku). Jednotlivé kameny byly před uložením do zdiva očištěny drátěnými kartáči a proudem vody o tlaku min. 2 atm. Měrná váha zdiva je cca 2300 kg/ m<sup>3</sup>.

### **Těsnění hráze**

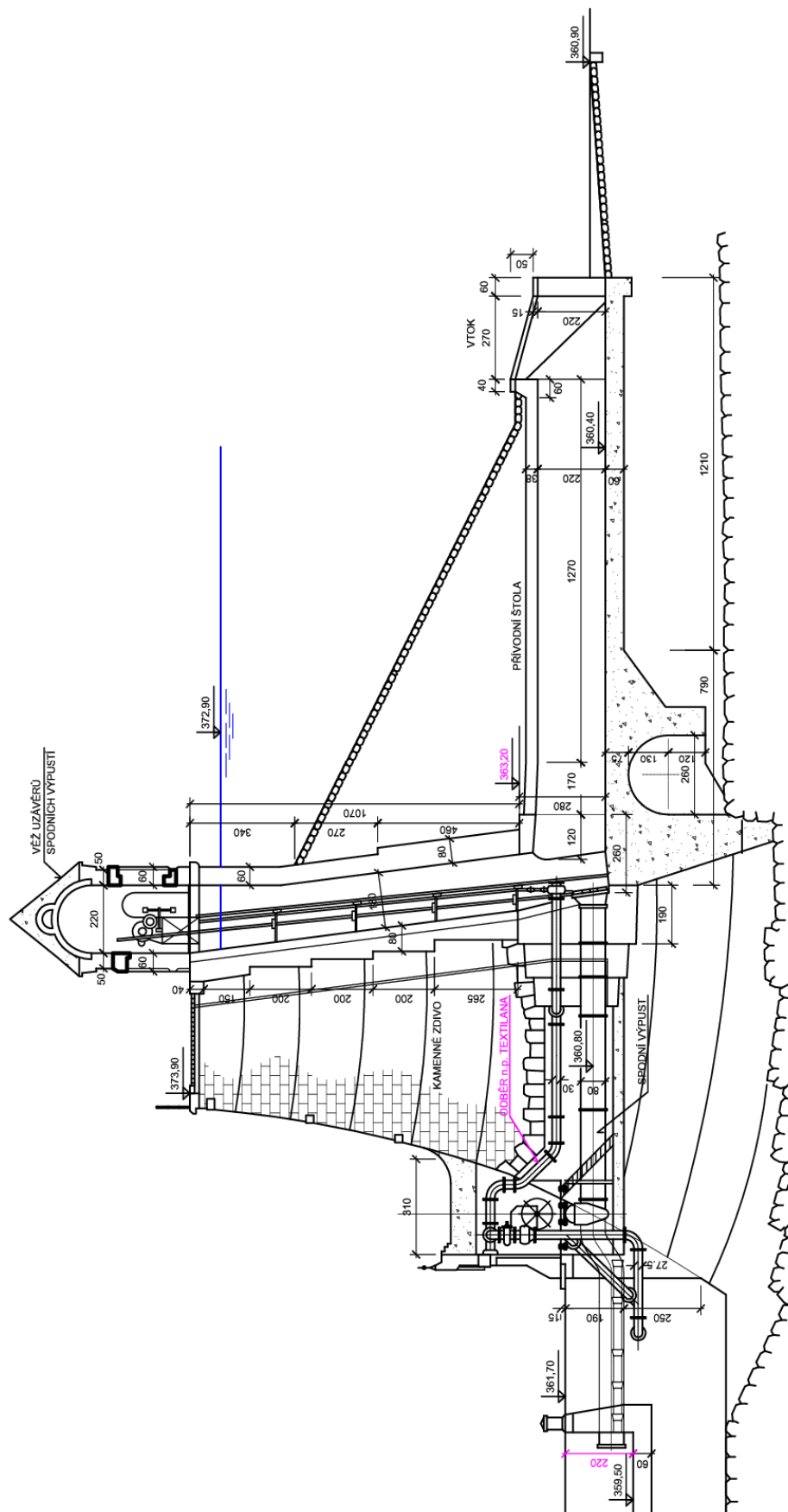
Zdivo návodního líce je omítnuto 25 mm silnou cemento-trasovou omítkou v poměru 3 : 1 až do výše 1 m pod horní hranu přesypu (369,50) a opatřeno dvojnásobným nátěrem siderostenu. Siderostenový nátěr přechází u návodní paty do betonu, který vyplňuje drenážní zářez. Od kóty 369,50 m n. m. ustupuje návodní líc o 0,60 cm a byly v něm vytvořeny rybinovité ozuby o hl. 30 cm. Povrch zdiva byl i zde omítnut a natřen ochranným nátěrem jako spodní část návodního líce. Návodní líc byl nakonec dozděn až po korunu zvlášť vybraným kamenem.

Poznámka: Omítka a nátěr byly položeny i pod vozovku na koruně hráze jako těsnící vrstva proti srážkové vodě.

### **Drenážní systém**

Vertikální drenáž je umístěna 1,5 m od návodního líce hráze. Je provedena z kameninových trubek o prům. 60 mm ve vzájemné vzdálenosti 2,0 m. Voda prosáklá do těchto trubek je odváděna svodnými drény – kameninové trubky o prům. 100 mm, vyústující v příčných štolách základových výpustí (Pp, Pl, Lp, Ll), odkud vytéká žlábkou v podlaze a dále trubkami do koryta pod vývarem.

Podle dochovaných materiálů nebyla na VD Harcov provedena žádná základová drenáž.



Obr. 1 – Původní výkresová dokumentace příčného řezu hrází v místě spodní výpusti

## 2.4.2 Bezpečnostní přeliv

Korunový volný přeliv je situovaný na levé straně hráze. Má 5 polí šířky cca 5 m – celková šířka přelivu je 25 m. Světlá šířka přelivů se zmenšuje na vzdušné straně o 0,16 m v důsledku příčného zakřivení hráze. Kóta přelivné hrany korunového přelivu je 372,90 m n. m. Jednotlivá pole přelivu jsou překlenuta, klenbové oblouky mají patky ve výši 0,3 m (373,20 m n. m.) a záklenby ve výši 0,7 m (373,60 m n. m.).

Tab. 3 - Kapacita bezpečnostního přelivu VD Harcov

Kóta hladiny [m n. m.]	1 pole [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	5 polí [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
373,3	2,32	11,58
373,4	3,26	16,31

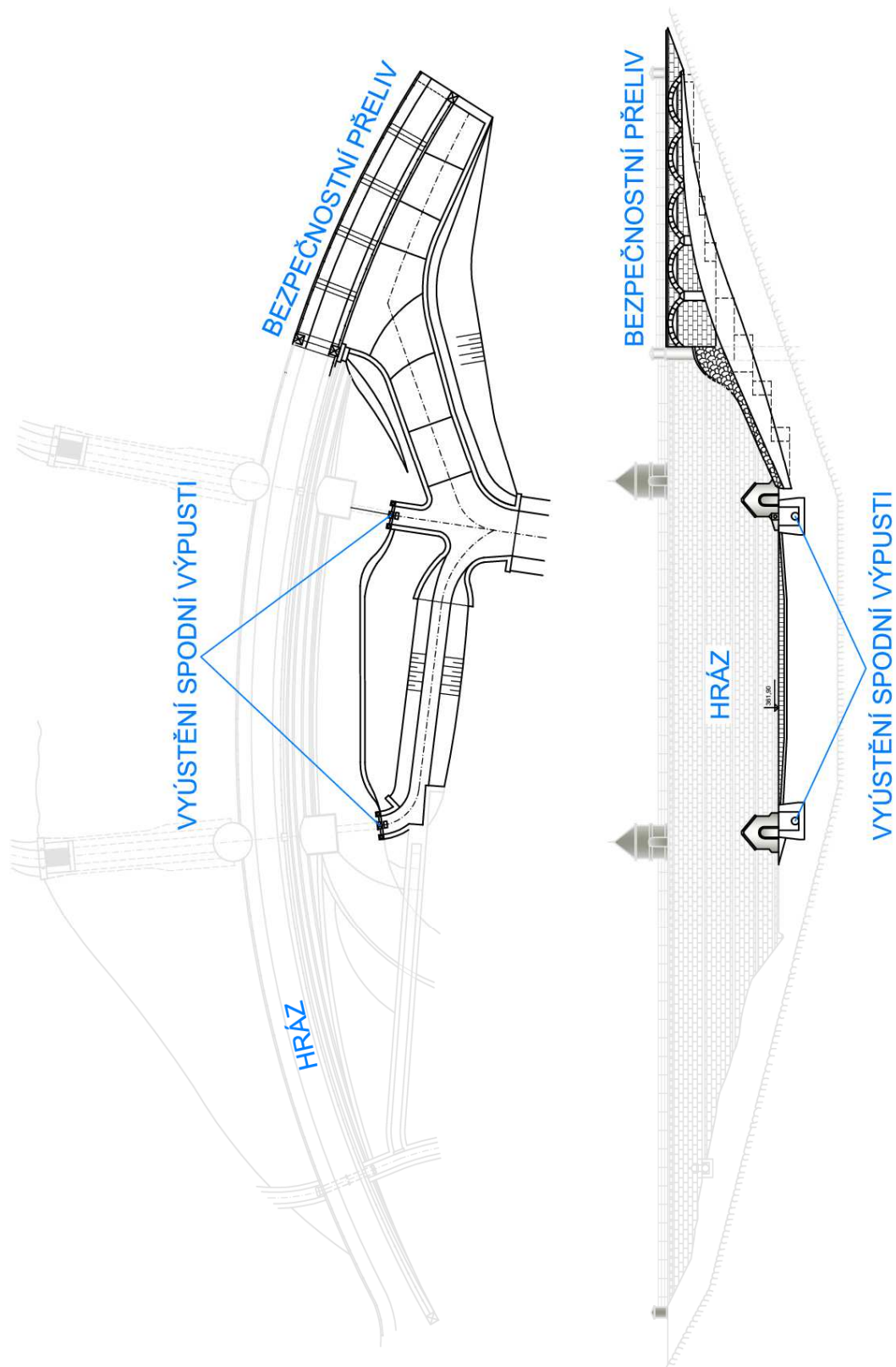
Za přelivem je kaskáda sestávající se ze 7 stupňů vysokých 0,6 – 2,1 m.

## 2.4.3 Spodní výpusti

Spodní výpusti jsou trubní DN 800 mm, délky cca 18 m. Obě výpusti jsou opatřeny na návodní straně ocelovými stavidly a na vzdušné straně litinovými klínovými šoupátky. Ke spodním výpustem přísluší pod předsypem přívodní klenuté štoly, opatřené na vtoku česlemi a drážkami na provizorní hrazení. Zátky štol na protivodní straně potrubí jsou ze tří vrstev kabřincového zdiva ve tvaru komolého kužele.

Tab. 4 – Maximální kapacita spodních výpustí VD Harcov

Kapacita levé spodní výpusti	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	13,90
Kapacita pravé spodní výpusti	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	9,90



Obr. 2 – Půdorys a pohled na hráz VD Harcov se zdůrazněním modelovaných částí

### 3 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ

#### 3.1 Účel výzkumu na fyzikálních modelech

Hlavním cílem výzkumu na hydraulických modelech je účinně přispět k optimálnímu návrhu úpravy odtokových poměrů toků a k hospodárnému, hydraulicky i konstrukčně účelnému řešení, dimenzování a provozu vodohospodářských děl tak, aby dobře sloužily potřebám společnosti a přitom měli dlouhou životnost. To se děje pomocí zkoumání zákonitostí proudění vody, jeho působení na prostředí, ve kterém se pohybuje a rovněž i jeho interakcí s obtékanými stavbami a jinými tuhými tělesy. (2)

Výhody výzkumu na zmenšených hydraulických modelech jsou:

- poměrně malé rozměry a tím nízká cena, které umožňují rychlé a snadné úpravy či změny
- snadná přístupnost kteréhokoli místa na zkoumaném vodním díle
- možnost opakování měření, zkoumání různých provozních stavů, včetně extrémních
- měření nezávislé na povětrnostních a provozních podmínkách skutečných vodních děl
- možnost přímého pozorování nejen znázorněného hydrodynamického jevu jako celku, ale i jeho vnitřní struktury a účinků na vodní stavbu i na dno a břehy koryta toku

#### 3.2 Podobnost a modelové podmínky

Zkoumání hydrodynamických jevů na hydraulických modelech je založeno na teorii podobnosti mezi prouděním vody na skutečném vodním díle a prouděním na jeho zmenšeném modelu. (2)

Teorie podobnosti vychází z rozměrové analýzy fyzikálních veličin ovlivňujících daný jev nebo z matematické podobnosti zkoumaného jevu. Hlavním předpokladem je mechanická podobnost skutečnosti a modelu. Je nutné, aby si hydraulické jevy byly podobné geometricky, kinematicky a dynamicky.

*Geometrická podobnost* – tvar modelu přesně odpovídá skutečnému tvaru, tedy každý rozměr byl zmenšen ve stejném měřítku a příslušné úhly jsou stejné.

*Kinematická podobnost* – odpovídající částice se pohybují po odpovídajících si drahách v úměrných dobách.

*Dynamická podobnost* – odpovídající části modelu a skutečnosti jsou vystaveny úměrným silám.

Geometrická a dynamická podobnost jsou nutnými podmínkami mechanické podobnosti. Jestliže při modelování není dodržena geometrická podobnost, může být dosaženo dynamické (a tedy i kinematické) podobnosti, ale nikoliv mechanické podobnosti.

Při modelování proudění s volnou hladinou (vtoky, výtoky, přelivy atd.), kde převládají účinky gravitačních sil nad dalšími silami (odpor tření vazké kapaliny, kapilární síly apod.) používáme Froudův zákon mechanické podobnosti. Pokud zůstane zachována geometrická podobnost modelu a skutečnosti a pokud jsou zároveň podobné i okrajové podmínky (drsnot stěn a dna, vtokové a výtokové podmínky...) je zajištěna nejen podobnost mezi silami vyvolanými gravitační silou, ale i podobnost mezi odpory způsobenými třením, které se při proudění reálné vazké kapaliny vždy vyskytují.

Základní rovnicí je

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g M_l} = 1 \quad (3.1.)$$

Při nahrazení měřítek příslušnými poměry dostáváme rovnici,

$$\frac{v_p^2}{g l_p} = \frac{v_m^2}{g l_m} \quad (3.2.)$$

kde  $v_p$  ... rychlost na prototypu (skutečnost)

$l_p$  ... průměrná hloubka na prototypu

$v_m$  ... rychlost na modelu

$l_m$  ... průměrná hloubka na modelu

kteřá vyjadřuje rovnost Froudových čísel pro prototyp a jeho model.



Pokud budou Froudova čísla ve vzájemně příslušných průřezech stejná, jsou si pohybové jevy ovlivňované gravitační silou podobné jak kinematicky, tak dynamicky.

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  $Fr > 1$ . Protože při tomto modelování platí vztah  $M_{Fr} = 1$ , je podmínka stejného režimu proudění automaticky dodržena. (2)

Pakliže jsou na modelu při modelování podle Froudova zákona dodrženy tyto mezní hodnoty:

- přepadová výška  $h \geq 20 \text{ mm}$
- povrchová rychlost proudu na objektových modelech  $u \geq 230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- světlá šířka přelivného pole  $b_0 \geq 60 \text{ mm}$
- výtokový otvor  $a \geq 60 \text{ mm}$
- hloubka vodního proudu  $h \geq 15 \text{ mm}$  (především říční modely)

nedojde k uplatnění povrchového napětí.

### 3.3 Měřítko fyzikálního modelu

Na základě geometrické podobnosti nejprve určíme měřítko délek  $M_l$ . Vzhledem k tomu, že měřítko pro gravitační zrychlení  $M_g = 1$ , můžeme při použití rovnice (3.1.) odvodit měřítko pro další potřebné veličiny.

Rychlost: 
$$M_v = \frac{v_p}{v_m} = M_l^{1/2} \quad (3.3.)$$

Průtok: 
$$M_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{A_p \cdot v_p}{A_m \cdot v_m} = M_l^2 \cdot \sqrt{M_l} = M_l^{5/2} \quad (3.4.)$$

Časové intervaly: 
$$M_t = \frac{M_l}{M_v} = \frac{M_l}{M_l^{1/2}} = M_l^{1/2} \quad (3.5.)$$

Měřítko modelu je určeno na základě mezních podmínek modelové podobnosti, možností laboratoře, konstrukčních možností a podmínek reprezentativního výzkumu. Z těchto podmínek bylo zvoleno měřítko  $M_l = 1:17$ .

Měřítko rychlostí je  $M_v = 4,12$ , měřítko průtoků je  $M_Q = 1191$  a měřítko času je  $M_t = 4,12$ . Převod skutečných průtoků na průtoky na modelu je uveden v tabulce:

Tab. 5 - Přepočítání skutečných průtoků na modelové pro VD Harcov

N [roky]	1	2	5	10	20	A	50	B	100	C	D	10.000
$Q_{skut}$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	4,0	7,3	13,6	20,2	27,4	34,8	42,2	48,7	55,1	66,8	78,5	88,9
$Q_{model}$ [l·s <sup>-1</sup> ]	3,3	6,1	11,4	17,0	23,0	29,2	35,4	40,9	46,2	56,1	65,9	74,6

Průtoky s označením A, B, C a D byly do řady průtoků přidány pro zahuštění údajů a přesnější stanovení konzumních křivek.

### 3.4 Popis fyzikálního modelu

Fyzikální hydraulický model vodního díla Harcov je postaven s výrobní tolerancí  $\pm 1$  mm (ve skutečnosti 17 mm). Celý model má délku  $L = 3,5$  m, výšku  $H = 1$  m a šířku  $B = 4,5$  m. Je zhotoven převážně z plastových materiálů, konkrétně pěněných PVC desek tlouštěk 10 a 8 mm, překližkových příčných profilů a ocelových nosníků. Díly jsou k sobě spojovány převážně vruty. Tím je umožněna snadná a rychlá výměna jednotlivých částí, podle potřeb měření.

Voda je k modelu VD Harcov přiváděna rozváděcím potrubím v laboratoři, voda je uklidněna v uklidňovací nádrži (3 m x 3 m x 1 m). Voda z modelu je odvedena do podzemních prostor vodohospodářské laboratoře, kde je umístěna centrální sběrná nádrž pro akumulaci vody.

Jednotlivé dílce jsou barevně rozlišené. Barevné řešení modelu je významné pro orientaci ve výkresové dokumentaci, fotodokumentaci i na modelu v laboratoři. Dále usnadňuje vyhodnocení každého pokusu a přiřazení správné fotodokumentace, která společně s měřením hladin v nádrži, měřením rychlostí na konci úpravy a odečtem průtoků, slouží k vyhodnocení každého pokusu.

Rozdělení částí modelu do barevných skupin je následující:

*šedá* – boční stěny a dno kaskády, dno podhrází včetně dna vývaru,

*světle šedá* – prohloubené dno vývaru, snížená boční zeď kaskády,

*zelená* – zatravněný terén kolem vodního díla,

*světle zelená* – snížený terén vedle kaskády,

*růžová* – přelivné plochy bezpečnostního přelivu, měrný jízec na konci úpravy,

*hnědá* – pilíře a klenby bezpečnostního přelivu,

*bílá* – stěny uklidňovací nádrže, nosné konstrukce modelu, tlumiče energie v korytě od pravé spodní výpusti,

*žlutá* – dno nádrže před bezpečnostním přelivem, usměrňovací žebro na 4. stupni kaskády, úprava podhrází - svažitý pravý břeh (varianty 1, 3 a 5),

*béžová* – úprava podhrází – levá nábrežní stěna (varianty 2 a 7), usměrňovací žebro u pravé spodní výpusti (varianty 9 a 11),

*červená* – navýšení usměrňovacího žebra, úprava podhrází - svažitý levý břeh (varianta 4),

*oranžová* – úprava podhrází - meandrující koryto s kolmými břehy (varianty 10 a 11),

*modrá* – úprava podhrází - pravá i levá nábrežní stěna (varianta 6),

*světle modrá* – úprava podhrází - levá nábrežní stěna (varianta 8),

*černá* – prohloubení dna u pravé spodní výpusti (varianty 7-11).

Model je zakončený kovovou mříží s okem 1x1 cm, která pomáhá udržovat okrajové podmínky a zároveň brání zanášení centrální podzemní nádrže velkými předměty.



Obr. 3 - Model VD Harcov: bezpečnostní přeliv s kaskádou, vývar a část podhrází

#### 4 MĚŘENÍ NA FYZIKÁLNÍM MODELU

Úroveň hladiny v uklidňovací nádrži byla měřena pomocí hrotového měřítka. Hladiny v podhrází byly měřeny ultrazvukovými sondami, umístěnými u výtoků obou spodních výpustí. Hladiny na stupních kaskády byly měřeny za pomoci měřítek nalepených na bočních stěnách kaskády.

Průtok na modelu je měřen pomocí indukčního průtokoměru, který je osazen na přívodním potrubí. Přesnost měření je  $\pm 1\%$ . Nejmenší měřený průtok byl  $2,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , naopak největší průtok byl  $74,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Rychlosti byly měřeny hydrometrickou vrtulí s průměrem 11 mm po dobu 30 s v jednom místě příčného řezu a ve třech svislicích. Na každé svislici bylo provedeno měření ve třech až šesti výškových úrovních. Počet výškových úrovní byl měněn podle hloubky vody, tak aby měření byla rovnoměrně rozložena po celém profilu.

Tab. 6 - Formulář pro měření hladin na modelu VD Harcov

Měření 3 - návrhový stav (usměrňovací žebro)

Q <sub>skutečnost</sub> [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Q <sub>model</sub> [l.s <sup>-1</sup> ]	stančnění [m]		8,041	10,549	13,056	15,844	18,632	21,412	24,191	26,597	29,002	32,198	35,394	37,944	40,494	42,985	45,475	h dolní skutečnost [m n. m.]	h dolní model [mm]
		nádrž [m]	[m n. m.]																	
N	0	377.8	0	371.22	371.22	371.22	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
dno	0	377.8	0	371.22	371.22	371.22	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q1	3.97	389.2	0.19	372.50	372.50	372.50	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q2	7.27	394.2	0.28	372.78	372.78	372.78	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q5	13.6	402.0	0.41	372.91	372.91	372.91	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q10	20.2	409.1	0.53	373.03	373.03	373.03	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q20	27.4	415.8	0.65	373.15	373.15	373.15	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
QA	34.8	422.3	0.76	373.26	373.26	373.26	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q50	42.2	428.6	0.86	373.36	373.36	373.36	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
QB	48.7	433.7	0.95	373.45	373.45	373.45	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q100	55.1	438.8	1.04	373.54	373.54	373.54	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
QC	66.8	447.2	1.18	373.68	373.68	373.68	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
QD	78.5	455.9	1.33	373.83	373.83	373.83	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68
Q10000	88.9	463.0	1.45	373.95	373.95	373.95	370.76	370.76	369.82	369.82	367.79	367.79	365.76	365.76	363.78	363.78	361.74	361.74	360.76	68

Tab. 7 - Formulář pro měření rychlostí na modelu VD Harcov

Q <sub>skutečnost</sub>		Q <sub>model</sub>	Rychlost na začátku koryta							h <sub>dolní skutečnost</sub> [m n. m.]	h <sub>dolní model</sub> [mm]
N	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[l.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[m n. m.]	[mm]
Q <sub>1</sub>	4.0	3.3	0.23	0.23	0.2					360.76	68
			0.26	0.26	0.23						
			0.27	0.28	0.26						
Q <sub>2</sub>	7.3	6.1	0.24	0.25	0.24	0.23				361.15	91
			0.28	0.26	0.27	0.25					
			0.32	0.33	0.31	0.29					
Q <sub>5</sub>	13.6	11.4	0.31	0.31	0.27	0.27	0.26			361.97	139
			0.32	0.27	0.25	0.23	0.22				
			0.32	0.33	0.34	0.3	0.29				
Q <sub>10</sub>	20.2	17.0	0.17	0.18	0.22	0.19	0.18			362.54	173
			0.27	0.3	0.3	0.3	0.27				
			0.29	0.42	0.44	0.45	0.42				
Q <sub>20</sub>	27.4	23.0	0.1	0.1	0.09	0.12	0.14			362.80	188
			0.22	0.31	0.23	0.29	0.32				
			0.37	0.49	0.5	0.49	0.48	0.61			
Q <sub>A</sub>	34.8	29.2	0.13	0.1	0.09	0.13	0.27			362.95	197
			0.25	0.24	0.24	0.3	0.44				
			0.56	0.61	0.58	0.61	0.6	0.66			
Q <sub>50</sub>	42.2	35.4	0.11	0.17	0.12	0.11	0.18			363.08	205
			0.28	0.35	0.27	0.25	0.37				
			0.61	0.68	0.65	0.66	0.63	0.66			
Q <sub>B</sub>	48.7	40.9	0.16	0.12	0.1	0.13	0.2	0.25		363.20	212
			0.4	0.37	0.29	0.27	0.4	0.44			
			0.73	0.73	0.68	0.67	0.63	0.63	0.67		
Q <sub>100</sub>	55.1	46.2	0.17	0.19	0.17	0.18	0.3	0.37		363.33	219
			0.43	0.46	0.38	0.43	0.52	0.56			
			0.78	0.75	0.68	0.7	0.7	0.67	0.66		
Q <sub>C</sub>	66.8	56.1	0.27	0.29	0.27	0.21	0.28	0.35		365.53	231
			0.52	0.49	0.38	0.43	0.47	0.56			
			0.82	0.75	0.65	0.64	0.66	0.64	0.66		
Q <sub>D</sub>	78.5	65.9	0.36	0.4	0.3	0.29	0.36	0.43		363.79	246
			0.62	0.56	0.46	0.48	0.53	0.63			
			0.95	0.91	0.74	0.72	0.75	0.73	0.73		
Q <sub>10.000</sub>	88.9	74.6	0.43	0.46	0.37	0.31	0.31	0.38		364.07	263
			0.69	0.61	0.43	0.41	0.4	0.5			
			0.97	0.92	0.74	0.67	0.64	0.66	0.67		

Každý pokus byl doprovázen vizuálním sledováním hydraulických jevů na přelivu, na kaskádě, ve vývaru a v korytě pod vodním dílem. Dále byla vyhotovena fotodokumentace a video záznamy pro pozdější porovnávání a vyhodnocování.

#### 4.1 Program pokusů

Po ustálení hladin a průtoku započalo odečítání rychlostí pro jednotlivé polohy rychlostní sondy. V mezičase byly odečteny také hodnoty na ultrazvukových sondách, stejně jako polohy hladiny na hrotovém měřítku a výšky hladiny na stupních kaskády. Nakonec byly pro každý průtok zhotoveny fotografie dokumentující režim proudění a stav hladin. Video záznam byl pořízen pro maximální průtoky (Q<sub>10.000</sub> pro bezpečnostní přeliv, Q<sub>max</sub> pro spodní výpusti).

Tab. 8 - Přehled pokusů a měření na vodním díle Harcov

Ozn.	Popis
M1	levá spodní výpust – výchozí stav, měrný profil rychlostí na konci úpravy
M2	pravá spodní výpust – výchozí stav, měrný profil rychlostí na konci úpravy
M3	návrhový stav, konzumční křivka přelivu - měrný profil rychlostí na konci úpravy
M4	levá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu
M5	pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu
M6	obě spodní výpusti - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu
M7	levá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek
M8	pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek
M9	obě spodní výpusti - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek
M10	návrhový stav, bezpečnostní přeliv - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek
M11	návrhový stav, bezpečnostní přeliv - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu
M12	levá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, prohloubený vývar
M13	pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, prohloubený vývar
M14	obě spodní výpusti - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, prohloubený vývar
M15	návrhový stav, konzumční křivka přelivu - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy
M16	návrhový stav, konzumční křivka přelivu - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m
M17	pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, usměrňovací žebro ve vývaru u pravé spodní výpusti
M18	návrhový stav, průtok přes přeliv a levou spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m
M19	návrhový stav, průtok přes přeliv a pravou spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m
M20	návrhový stav, průtok přes přeliv a obě spodní výpusti - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m
M21	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 0
M22	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 1

Ozn.	Popis
M23	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 2
M24	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 3
M25	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 4
M26	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 5
M27	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 6
M28	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 7
M29	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 8
M30	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 9
M31	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 10
M32	návrhový stav, pravá spodní výpust - měrný profil rychlostí posunut 4 m za úpravu, měrný jízek, navýšení usměrňovacího žebra ve skluzu, prohloubení vývaru, klenby nad přelivy, snížení levé zdi o 0,25 m, úprava vývaru varianta 11

### Měření M1 – M20

V průběhu měsíců září – říjen 2017, bylo měřeno celkem 20 kombinací různých variant konstrukčních řešení bezpečnostního přelivu, kaskádového skluzu a vývaru. Průtoková řada pro měrnou křivku bezpečnostního přelivu byla  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_A$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_B$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_C$ ,  $Q_D$ ,  $Q_{10.000}$ . Průtokové řady pro spodní výpusti byly dány jejich maximální kapacitou a mírou jejich otevření ( $Q_{1/4}$ ,  $Q_{1/2}$ ,  $Q_{3/4}$ ,  $Q_{max}$ ).

### Měření M21 – M32

V únoru roku 2018 bylo zhotoveno a proměřeno 12 variant řešení podhrází vodního díla Harcov. Měření byla uskutečněna pouze pro pravou spodní výpust. Předpokládá se, že proudění od ostatních částí vodního díla (přeliv, skluz, levá spodní výpust) není těmito úpravami ovlivněné.

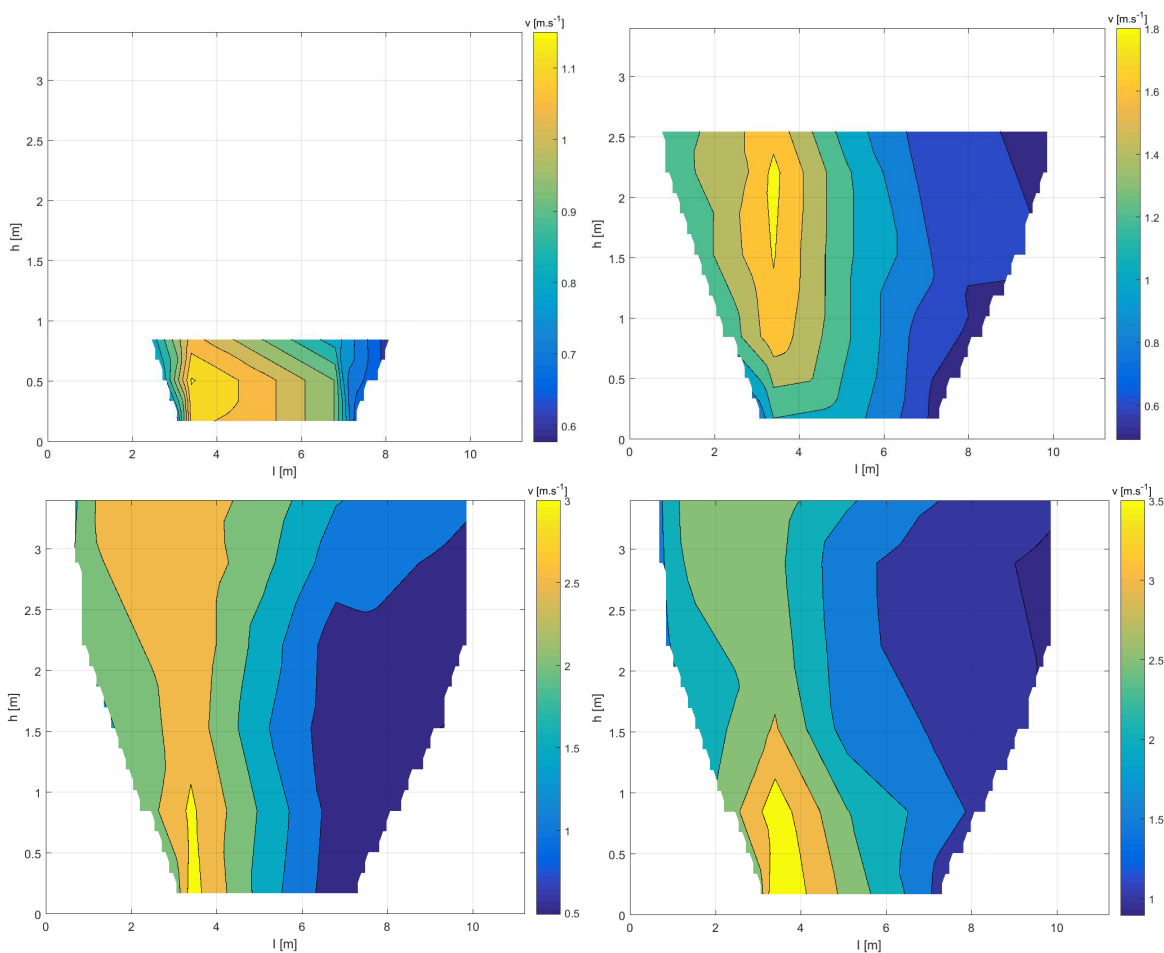


### 4.1.1 Měření 1 - 3

Výchozí návrhový stav podle požadavků vlastníka vodního díla, povodí Labe, s. p. Z polí bezpečnostního přelivu budou odstraněny stropní klenby na nátokové straně, ve skluzu bude umístěno usměrňovací žebro výšky 1m, podhrází a vývar zůstávají beze změn.

Pokusy M1 a M2 posloužili pouze k orientačnímu zjištění rozsahu měřených hodnot. Pro tyto pokusy byly naměřeny hodnoty rychlosti proudění pouze u dna, z tohoto důvodu nemohlo být vykresleno rychlostní pole a tyto dva pokusy dále nejsou vyhodnocovány.

Pro pokus M3, prováděný na bezpečnostním přelivu, byly pro řadu průtoků měřeny rychlosti na konci úpravy, hladiny v nádrži a hladiny na jednotlivých stupních skluzu.



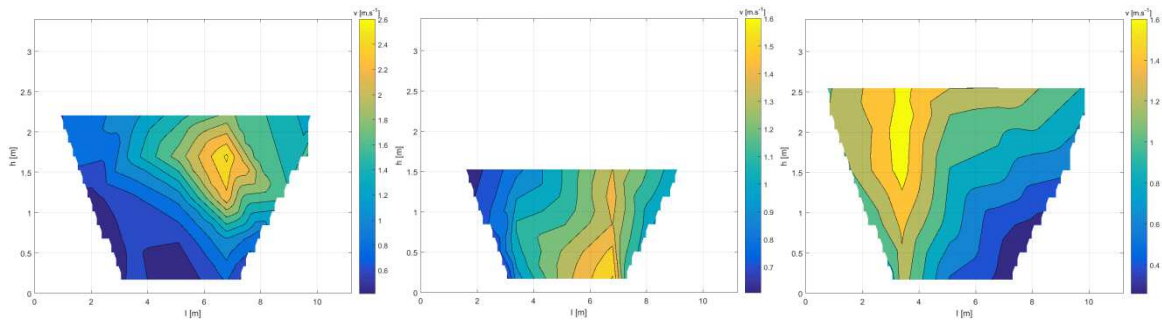
Obr. 4 - M3: rychlostní pole pro průtoky  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{10.000}$



Obr. 5 - M3: bezpečnostní přeliv s odstraněnými klenbami na nátokové straně

#### 4.1.2 Měření 4 – 6

Výchozí návrhový stav. Měrný profil byl posunut o 4 m dále po směru proudu tak, aby byly umožněny stavební úpravy a jejich vzájemné srovnání.



Obr. 6 -  $Q_{max}$  pro levou (M4), pravou (M5) a obě výpusti (M6)

Při maximálním průtoku levou spodní výpustí, je vývar bez vody a tedy neplní svoji funkci tlumení kinetické energie v plném rozsahu.



Obr. 7 – M4:  $Q_{max}$  - nefunkční vývar

#### 4.1.3 Měření 7 – 10

Návrhový stav byl doplněn měrným jízkem o výšce 0,5 m na konec úpravy.

Pro tuto úpravu byly měřeny rychlosti proudění od bezpečnostního přelivu, dále od levé, pravé a obou spodních výpustí. Potvrdila se nefunkčnost vývaru při  $Q_{\max}$  od levé spodní výpusti.

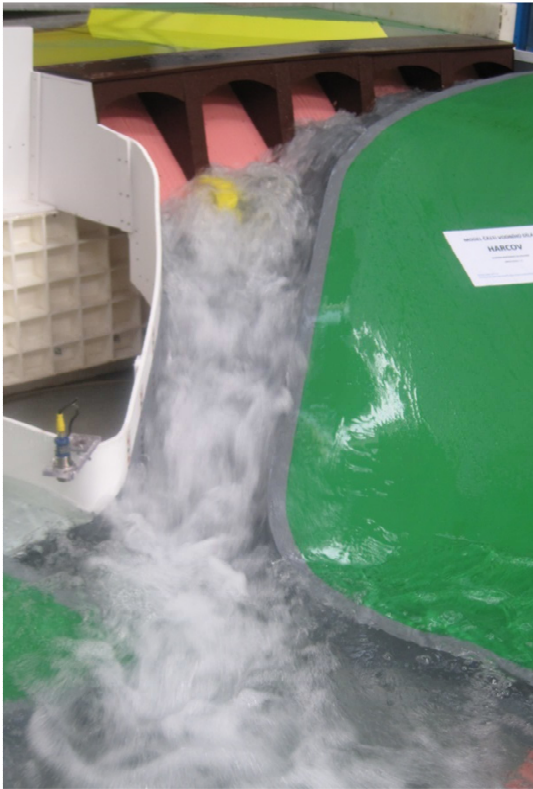


Obr. 8 - M7:  $Q_{\max}$  - nefunkční vývar

#### 4.1.4 Měření 11

Usměrňovací žebro ve skluzu bylo navýšeno o 0,5 m, na celkovou výšku 1,5 m.

Navýšené žebro zmírňuje přelévání pravé zdi skluzu a tím brání obnažování základů skluzu a základové spáry hráze. K přelítí zdi dochází při vyšším než stoletém průtoku ( $Q_{100} = 55,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), zatímco při pokusu M10 docházelo k přelévání již při průtoku cca  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $Q_{20} = 27,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



Obr. 9 - Porovnání skluzu s žebrem výšky 1 m (M10) a 1,5 m (M11) při průtoku  $Q_{20}$

#### 4.1.5 Měření 12 – 14

Prohloubení vývaru o 0,25 m.

Prohloubení je dostatečné, vývar je již i při  $Q_{\max}$  ( $13,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) levé spodní výpusti funkční.

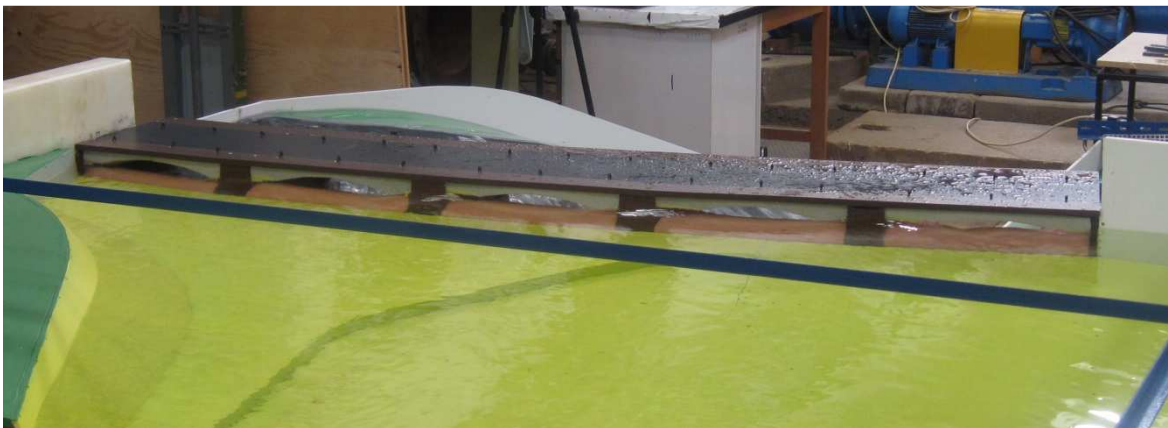


Obr. 10 - M12:  $Q_{\max}$  - funkční vývar

#### 4.1.6 Měření 15

Navrácení původní klenby do polí bezpečnostního přelivu.

Klenby prokazatelně zhoršují nátokové podmínky a nepříznivě ovlivňují kapacitu bezpečnostního přelivu. Konzumční křivka je při průtoku  $Q_{10.000}$  ( $88,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) o 0,13 m výše než při měření M3.



Obr. 11 - M15: bezpečnostní přeliv s klenbami na nátokové straně

#### 4.1.7 Měření 16

Snížení levé zdi skluzu od poloviny prvního do konce třetího stupně o 0,25 m.

Toto konstrukční řešení je vhodné pro další omezování přelévání pravé zdi skluzu. K přelití dochází až při průtoku  $Q_C = 66,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 12 - M16:  $Q_C$  ( $66,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) kaskádový skluz

#### 4.1.8 Měření 17 – 20

Ve vývaru u pravé spodní výpusti bylo doplněno usměrňovací žebro délky 3,8 m, a výšky 1 m.

Tato konstrukční varianta plyne ze snahy zmírnit vymílání zeminy za pravou nábrežní zdí vodou z pravé spodní výpusti. Po umístění tohoto žebra dochází k výraznějšímu provzdušnění proudu a tedy k většímu tlumení energie.



Obr. 13 - M13:  $Q_{max}$  – provzdušnění proudu bez usměrňovacího žebra

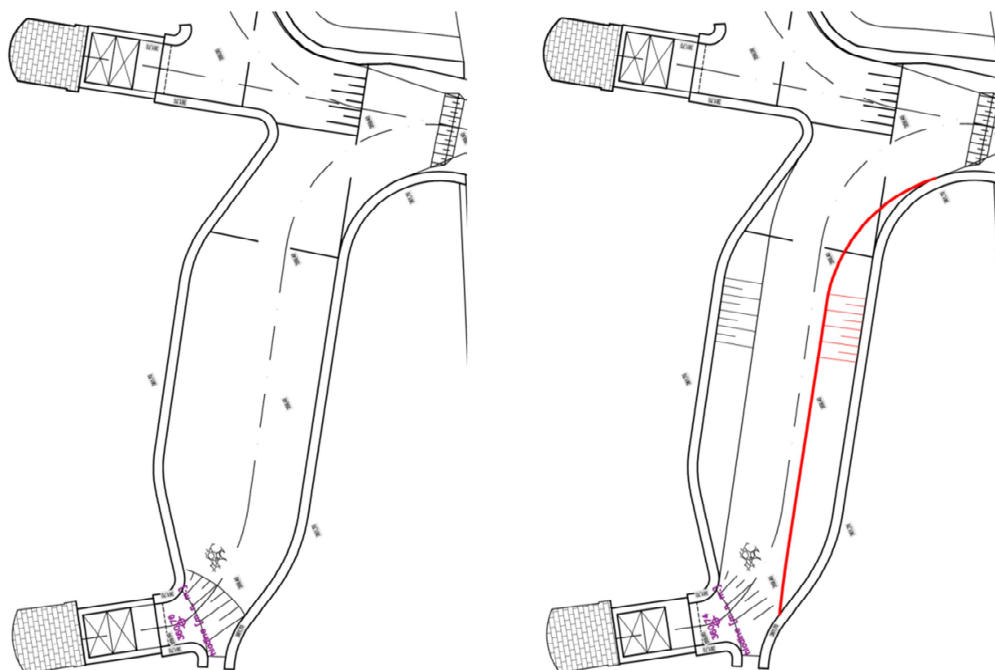


Obr. 14 - M17:  $Q_{max}$  – provzdušnění proudu na usměrňovacím žebro

#### 4.1.9 Přehled úprav v podhrází (M21 – M32)

M21: Varianta 0 – odstranění původního svahu na levé straně koryta

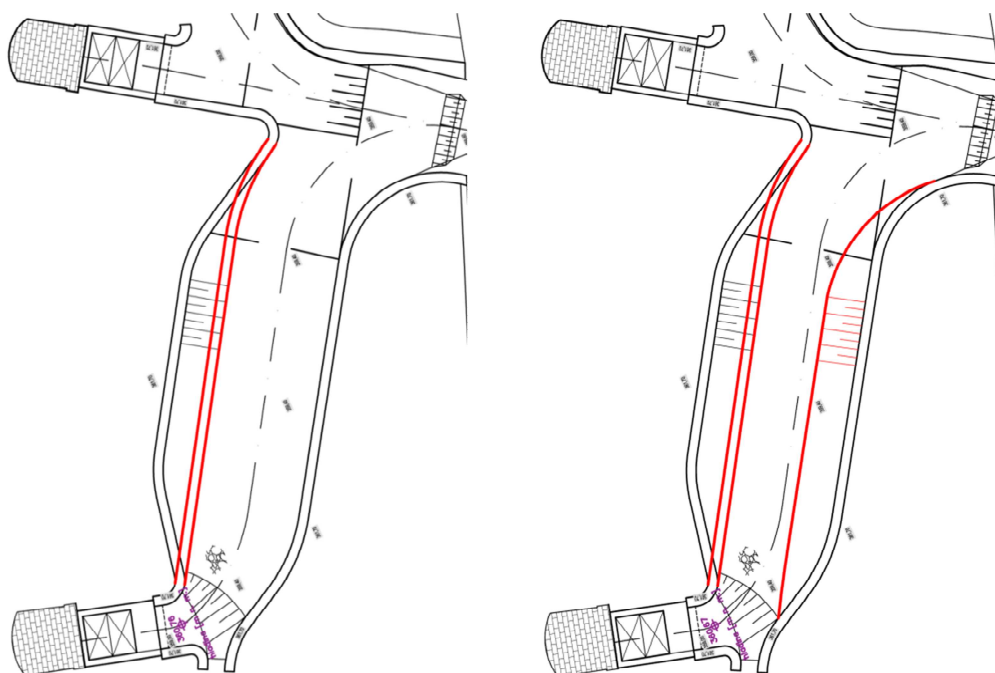
M22: Varianta 1 – svah na levé straně ponechán, doplněn svah po pravé straně koryta



Obr. 15 - Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 0 a 1

M23: Varianta 2 – napřímení a posunutí levé nábrežní zdi, bez svahování

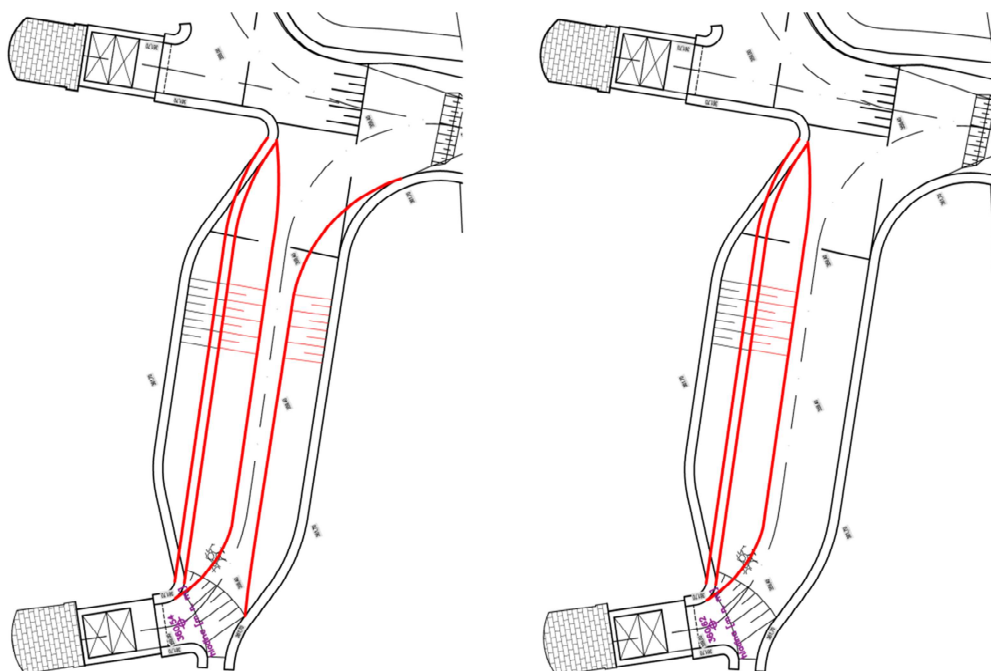
M24: Varianta 3 – kombinace variant 1 a 2



Obr. 16- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 2 a 3

M25: Varianta 4 – varianta 3 doplněná svahování z levé strany koryta

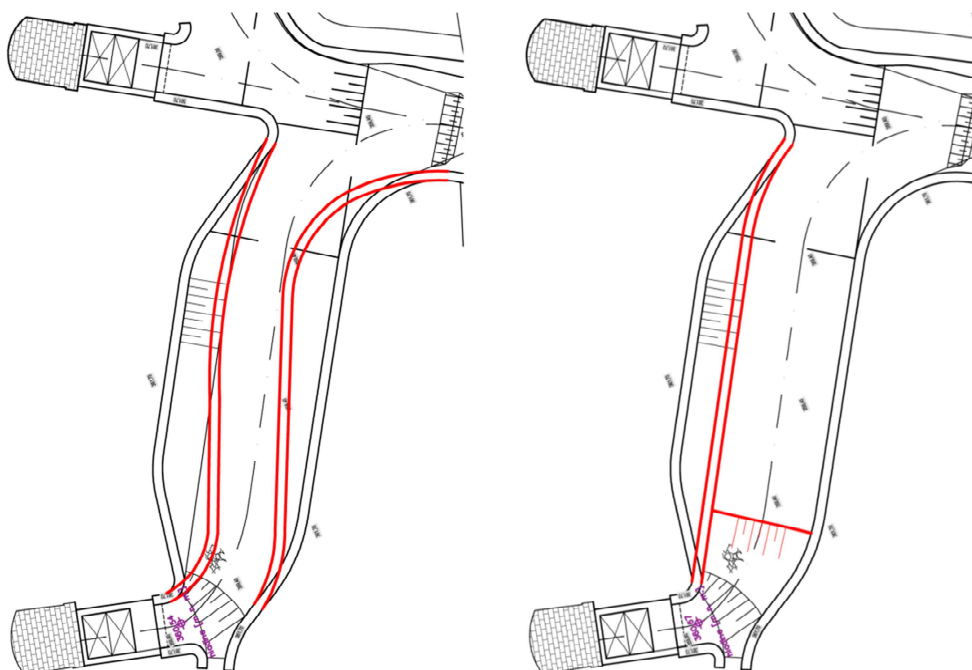
M26: Varianta 5 – napřímení a posunutí levé nábrežní zdi včetně svahování, pravá strana bez úprav



Obr. 17- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 4 a 5

M27: Varianta 6 – nový tvar levé i pravé nábrežní zdi

M28: Varianta 7 – napřímení a posunutí levé nábrežní zdi z var. 2, prodloužení vývaru o 4,5 m

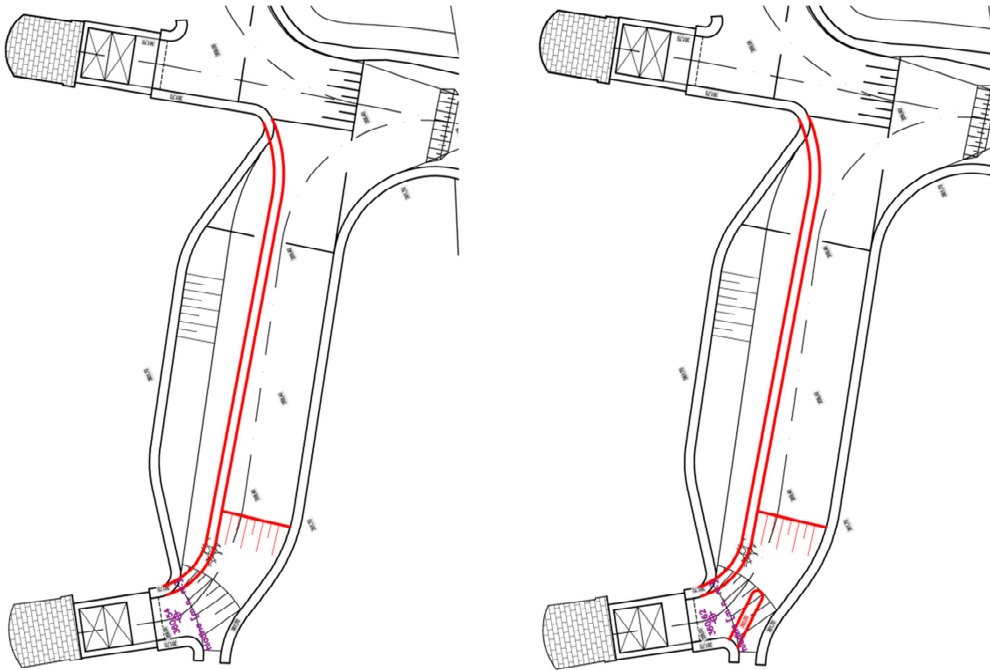


Obr. 18- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 6 a 7



M29: Varianta 8 – zúžení koryta posunutím levé nábrežní zdi, prodloužený vývar z var. 7

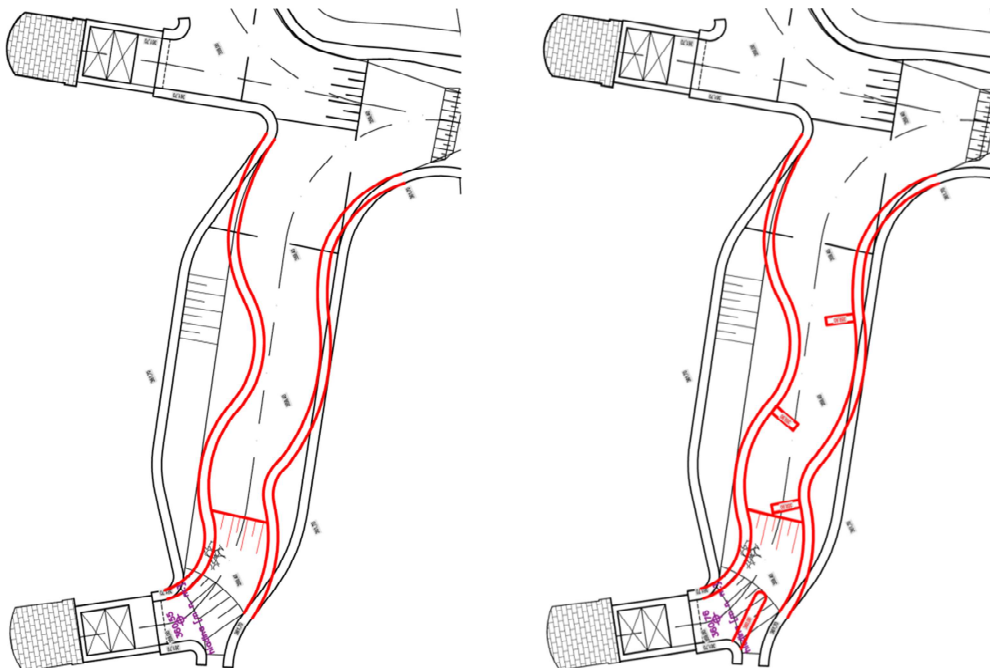
M30: Varianta 9 – varianta 8 doplněná o usměrňovací žebro



Obr. 19- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 8 a 9

M31: Varianta 10 – přírodě blízký tvar levé i pravé nábrežní zdi, prodloužený vývar

M32: Varianta 11 – varianta 10 doplněná o tři bloky výšky 0,5 m sloužící k tlumení energie a usměrňovací žebro



Obr. 20- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 10 a 11

## 5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

### 5.1 Úbytek energie na kaskádovém skluzu

Úbytek energie byl vypočten na základě Bernouliho rovnice

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum Z \quad (5.1.)$$

kde  $h$  ... polohová výška

$\frac{p}{\rho g}$  ... tlaková výška

$\frac{v^2}{2g}$  ... rychlostní výška

$\sum Z$  ... suma ztrát

a z rovnice kontinuity

$$Q = v \cdot S = konst. \quad (5.2.)$$

kde  $Q$  ... průtok

$v$  ... průřezová rychlost

$S$  ... průtočná plocha

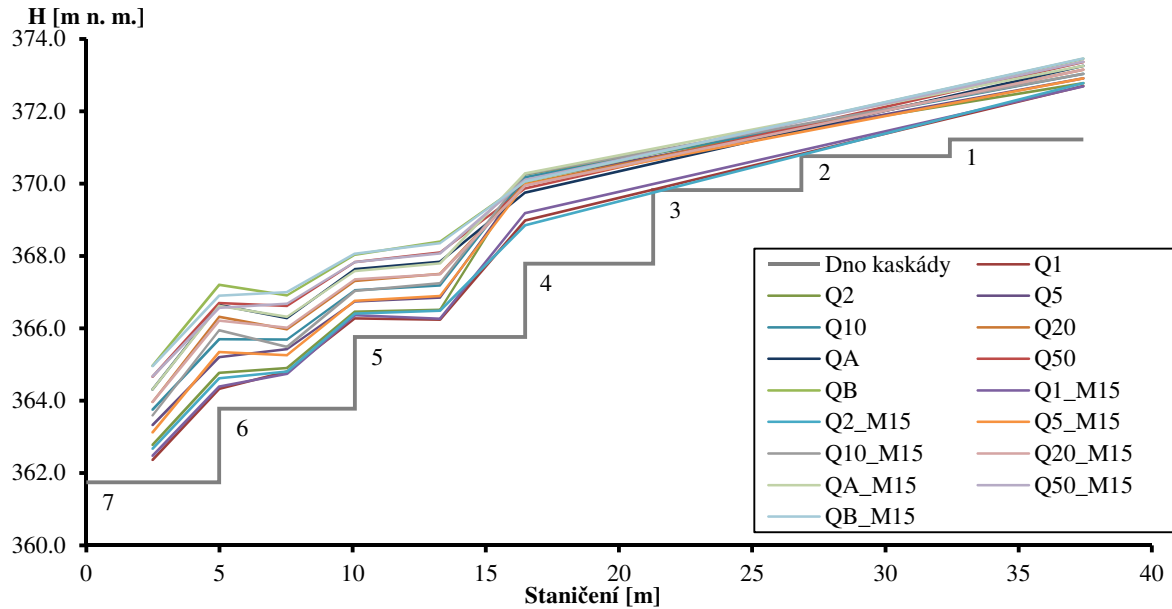
Protože se jedná o otevřené koryto, tlakovou výšku lze ve výpočtu vynechat, neboť je na všech místech skluzu stejná. Z naměřených výškových úrovní hladin a rozměrů jednotlivých stupňů, byly vypočteny rychlosti proudění na stupních a následně rychlostní výšky. Polohové výšky jsou známé z rozměrů modelu a poloh hladin.

Úbytek energie byl vyhodnocen pouze pro průtoky nižší než  $Q_{100}$ . Při průtoku  $Q_{100}$  ( $55,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) dochází k přelévání levé zdi kaskády a následnému odtoku neměřitelné části průtoku po úbočí svahu.

Taktéž byl úbytek vyhodnocen pouze na posledních třech stupních. Úbytek energie pro první 4 stupně je vyčíslen souhrnně z důvodu postupného navyšování průtoku v souvislosti s postupným zapojováním se většího počtu polí bezpečnostního přelivu.

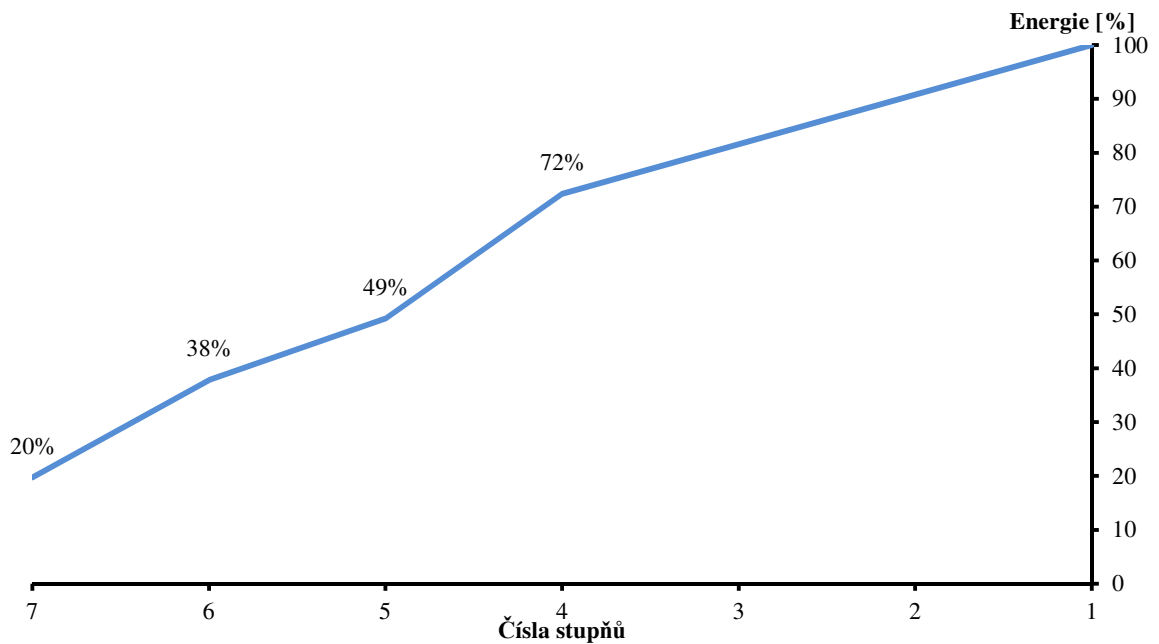
Každé pole má jiné nátokové podmínky a proto nelze celý průtok jednoduše podělit jejich počtem, pro získání průtoků jednotlivými poli.

Čáry energie na kaskádovém skluzu vypadají následovně:



Graf 1 - Čáry energie pro kaskádový skluz VD Harcov (M3 a M15)

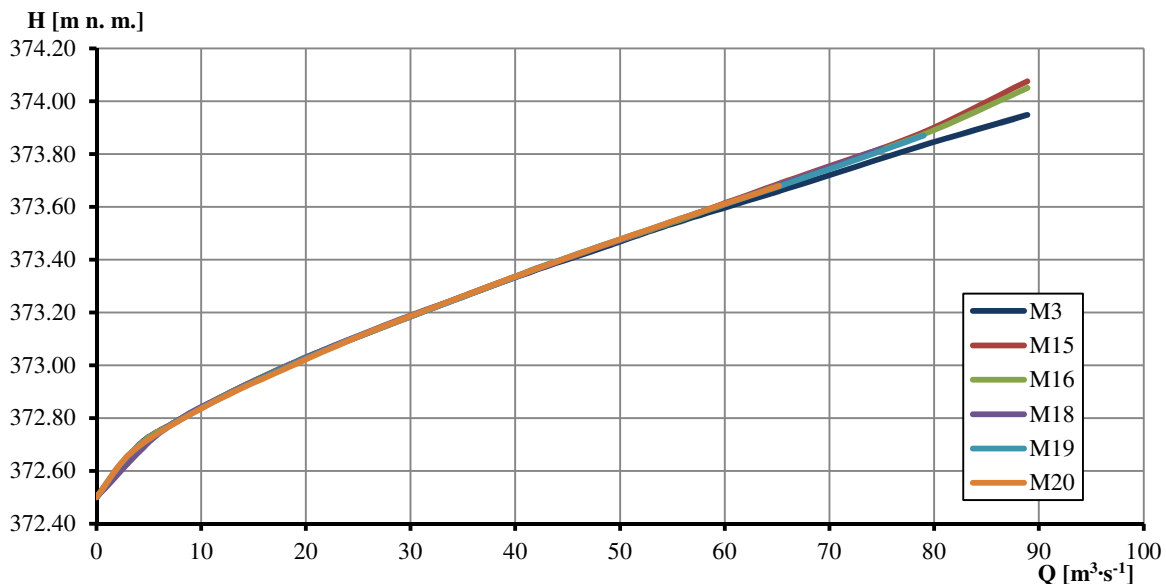
Na prvních čtyřech stupních dochází k průměrnému úbytku 28%. Na pátém stupni 23%, na šestém 11% a na posledním stupni 18%.



Graf 2 - Procentuální úbytek energie na kaskádovém skluzu VD Harcov

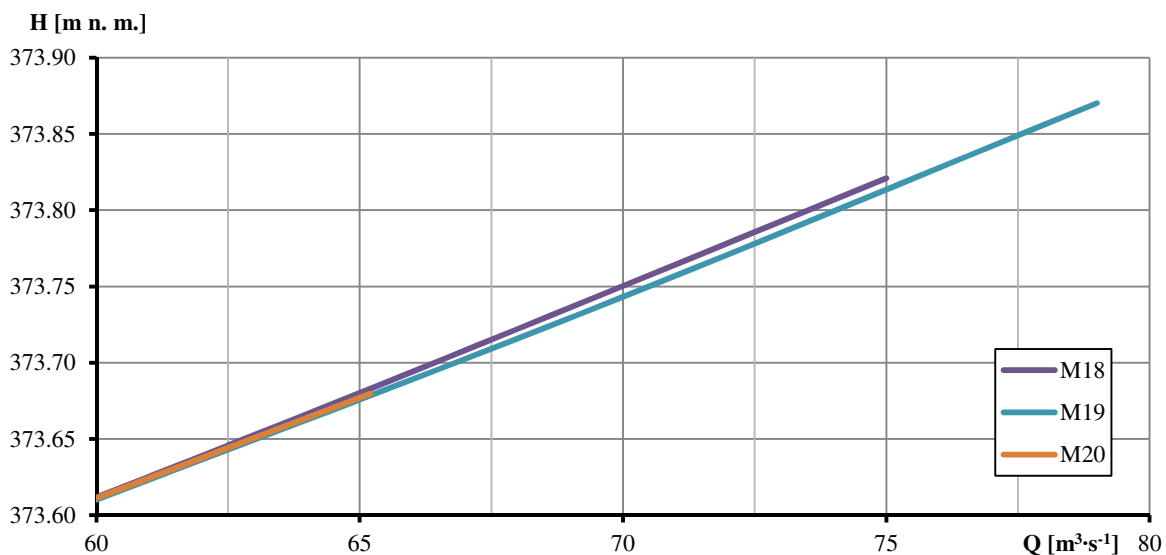
## 5.2 Výšky hladin v nádrži

Pro všechny pokusy zahrnující převod vody přes bezpečnostní přeliv, byly hrotovým měřítkem odečítané hladiny v nádrži. Po jejich přepočítání na skutečné nadmořské výšky jsme získali konzumní křivky.

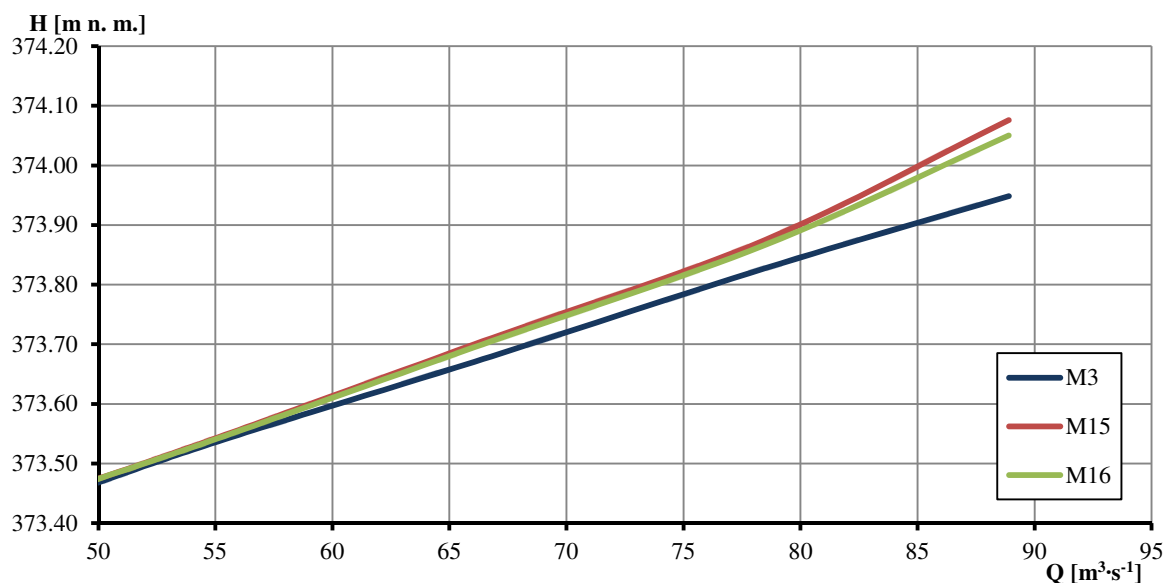


Graf 3 - Konzumní křivky pokusů využívajících bezpečnostní přeliv VD Harcov

Křivky jsou přibližně do průtoku  $55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\sim Q_{100}$ ) téměř shodné. Konzumní křivky pokusů M18, M19 a M20 jsou kratší, protože část průtoku je převáděna jednou nebo oběma spodními výpustmi.



Graf 4 - Detail konzumních křivek bezpečnostního přelivu při zapojení spodních výpustí



Graf 5 - Detail konzumních křivek bezpečnostního přelivu bez zapojení spodních výpustí

Křivky pro pokusy M19 a M20 mají prakticky totožný průběh a pro stejné průtoky dosahují nižších hladin v nádrži než pokus M18, avšak pouze o 1 cm.

Při snaze udržet hladinu v nádrži na co nejnižší úrovni, je nejlepší variantou M20 – obě spodní výpusti otevřené na maximum a zbytek průtoku jdoucí přes přeliv. Tato manipulace umožňuje převádět  $Q_{10.000}$  při hladině na úrovni 373,72 m n. m.

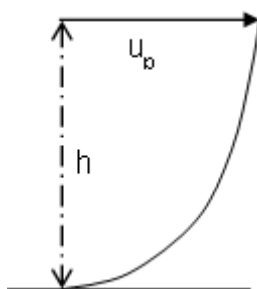
I přesto, že křivka pokusu M18 vykazuje pro stejné průtoky vyšší hladiny, než pokus M19, je vhodnější, protože využitím levé spodní výpusti, která má větší kapacitu než pravá spodní výpust, připadá na bezpečnostní přeliv menší část průtoků. Ve výsledku při průtoku  $Q_{10.000}$  dosáhne hladina úrovně 373,82 m n. m. tedy o 5 cm níž, než při pokusu M19 (373,87 m n. m.).

Při převodu extrémních průtoků samotným bezpečnostním přelivem vykazuje nejlepší výsledky pokus M3, kde byly odstraněny stropní klenby z polí přelivu. Snížení levé boční stěny skluzu o 0,25m pomůže snížení hladiny jen nepatrně. Konkrétně při průtoku  $Q_{10.000}$  ( $88,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je hladina v nádrži níže pouze o 3 cm.

### 5.3 Rychlostní pole

Grafy, pro vyhodnocení rychlostního pole, byly vytvořeny v programu MATLAB, za pomoci lineární interpolace v síti měřených bodových rychlostí, čítající devět až devatenáct bodů v závislosti na narůstající hloubce vody v korytě.

Rychlosti přímo na stěně modelu nemohly být uspokojivě měřeny. Místo toho se předpokládá rozložení dle paraboly N-tého stupně s vertikální osou (Lavale). Do bezprostřední blízkosti stěny byla dosazena hodnota rovna 70 % nejbližší měřené hodnoty.



Graf 6 - Rozložení rychlostí na stěně (Lavale) (3)

Ve svislém směru jsou grafy ukončeny na úrovni nejvyšší řady měřených bodů a nepokračují až k hladině. Tato oblast by musela být řešena extrapolací a byla by zatížena blíže nespecifikovanou chybou.

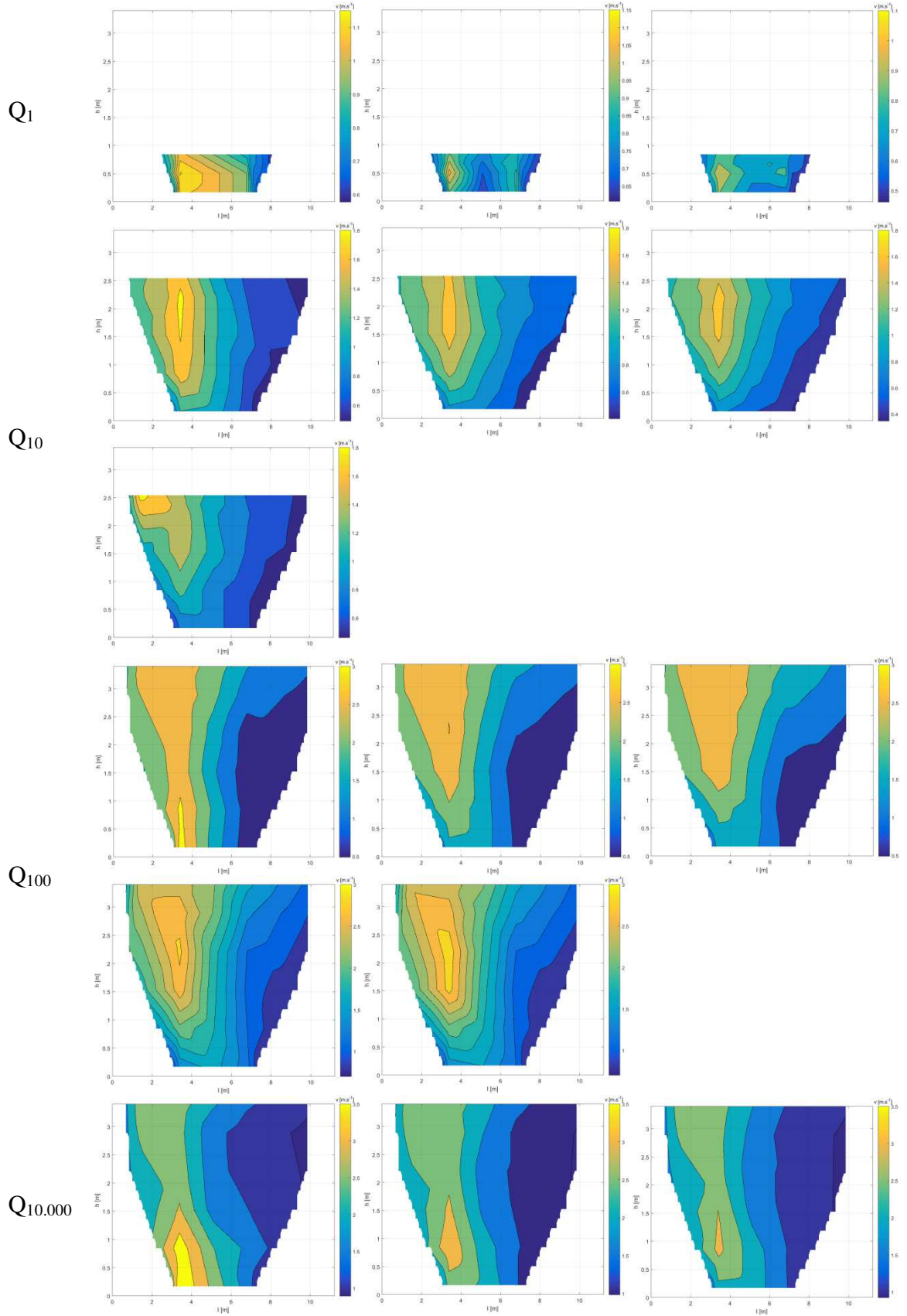
Grafy jsou pohledem proti směru proudu, od konce úpravy k pomyslné hrázi.

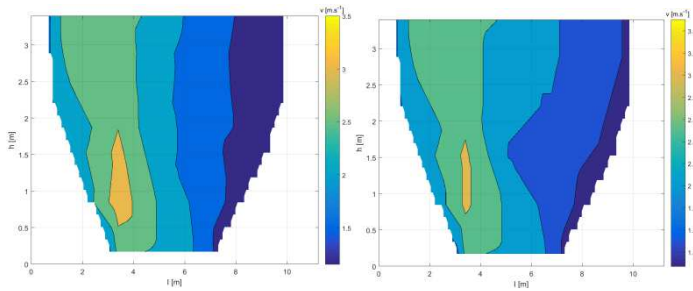
Rychlostní pole byla vyhodnocena ve skupinách pokusů podle stavebních objektů, které byly použity k převádění průtoků. Pro přehlednost jsou uváděné jen vybrané průtoky.

Tab. 9 - Seznam vyhodnocovaných skupin měření

Stavební objekt	Měření	Průtoková řada
Bezpečnostní přeliv	M3, M10, M11, M15, M16	$Q_1, Q_{10}, Q_{100}, Q_{10.000}$
Levá spodní výpust	M4, M7, M12	$Q_{1/2}, Q_{\max}$
Pravá spodní výpust	M5, M8, M13, M17, M21 – M32	$Q_{1/2}, Q_{\max}$
Obě spodní výpusti	M6, M9, M14	$Q_{1/2}, Q_{\max}$
Přeliv a spodní výpusti	M18, M19, M20	$Q_{20}, Q_{50}, Q_{100}, Q_{10.000}$

### 5.3.1 Bezpečnostní přeliv

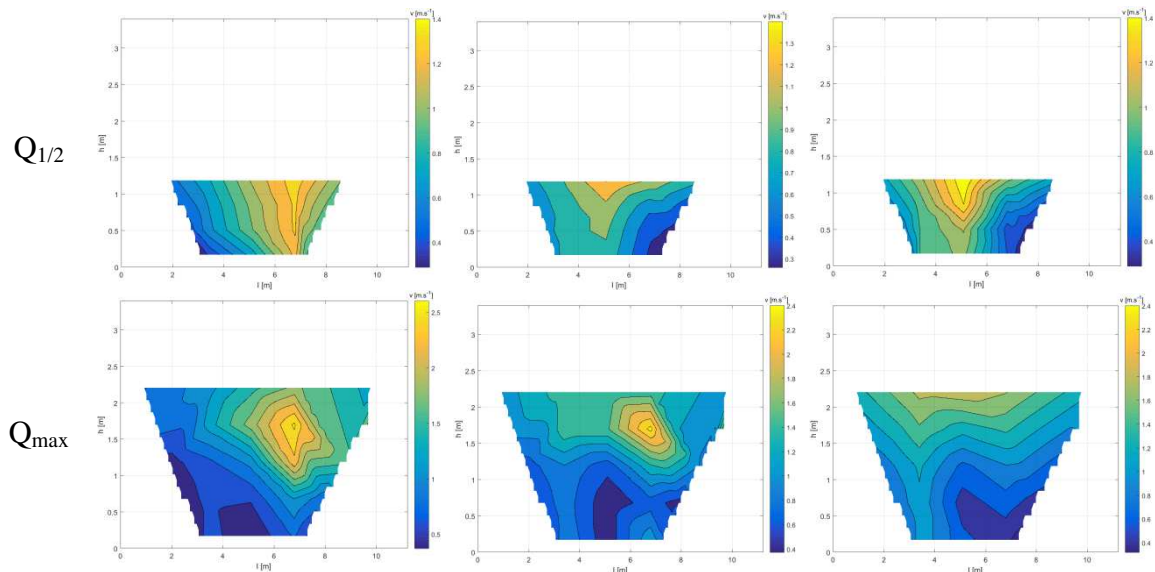




Pro pokus M11 bylo rychlostní pole proměřováno až od průtoku  $Q_{10}$ . Navýšené usměrňovací žebro, čímž se M11 liší od přechozího pokusu M10, nemá při menších průtocích žádný vliv a rychlostní pole zůstává stejné jako při M10. Stejně tak snížení levé zdi skluzu (M16) se projevuje až při průtocích  $Q_{100}$  a vyšších. Pro  $Q_1$ : M16 = M15.

Na základě tvaru rychlostního pole ve zvoleném průtočném profilu vychází nejlépe pokus M11 případně M15. Pokus M15 má lepší rozložení rychlostí při nejmenších průtocích  $Q_1$  ( $4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), kdy nejsou ohrožovány vymíláním ani dno, ani břehy a rychlostní gradient je pozvolný, oproti strmějšímu nárůstu rychlostí v pokusu M10 = M11. Při vyšších průtocích dosahuje M11 nižších maximálních rychlostí ( $3,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) než M15 ( $3,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

### 5.3.2 Levá spodní výpust

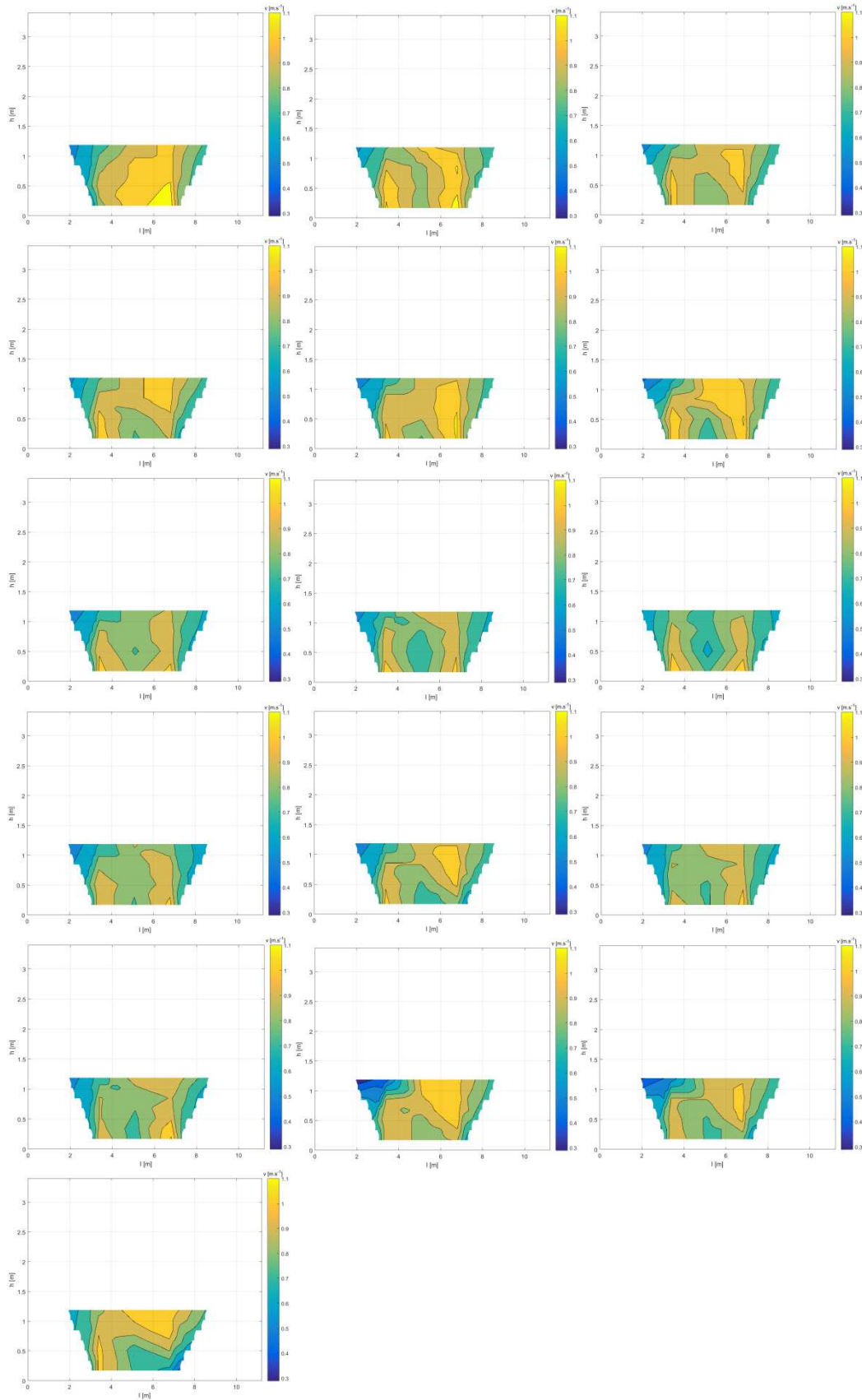


Pro průtok při polovičním otevření levé spodní výpusti ( $6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je z důvodu nižších maximálních rychlostí lepší varianta M7 než varianta M12 s prohloubeným vývarem, avšak ani varianta M12 nevykazuje nevhodné rozložení rychlostí, jelikož vysoké rychlosti se soustřeďují uprostřed koryta směrem k hladině. Při plném vyhrazení spodní výpusti je lepší variantou M12. Celkově je vhodnější varianta s prohloubeným vývarem, proud je stabilnější, protože k utlumení energie došlo hned za výpustí.

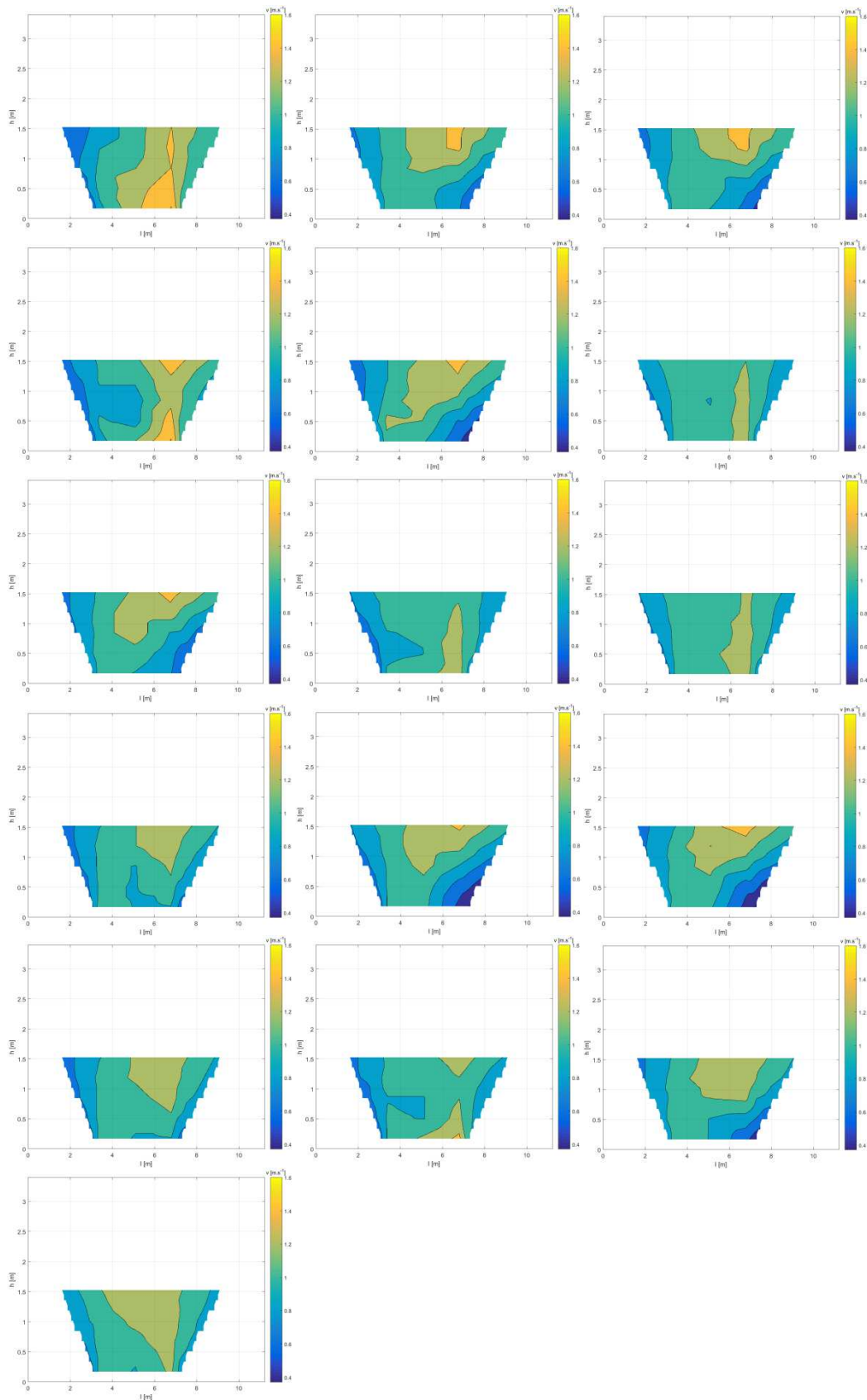


### 5.3.3 Pravá spodní výpust

$Q_{1/2}$



$Q_{max}$



Všechny varianty konstrukčních úprav podhrází vykazují pro poloviční vyhrazení pravé spodní výpusti ( $Q = 4,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) nejvyšší rychlosti u dna, především v patách

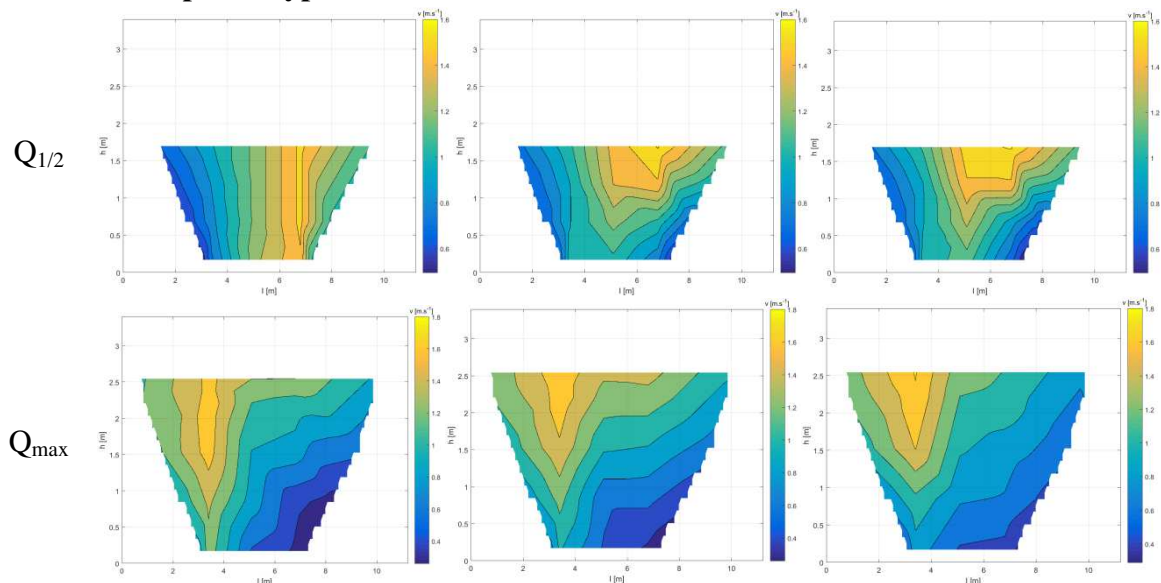
břehů. Pokusy M31 a M32 mají ve dně nejmenší naměřené rychlosti, ale zatěžování břehových pat je nevyrovnané. Dnová hrana pravého břehu (ve směru toku) je tedy více namáhána. V pokusu M25 byly u dna naměřeny rychlosti vyšší, ale rychlostní profil je souměrný a po celé výšce dochází k rovnoměrnému namáhání.

Tab. 10 - Srovnání rychlostí od pravé spodní výpusti pro  $Q_{1/2}$

Pokus	Rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	
	Pravá hrana dna	Levá hrana dna
M31	0,82	0,99
M32	0,66	1,03
M25	1,07	1,07

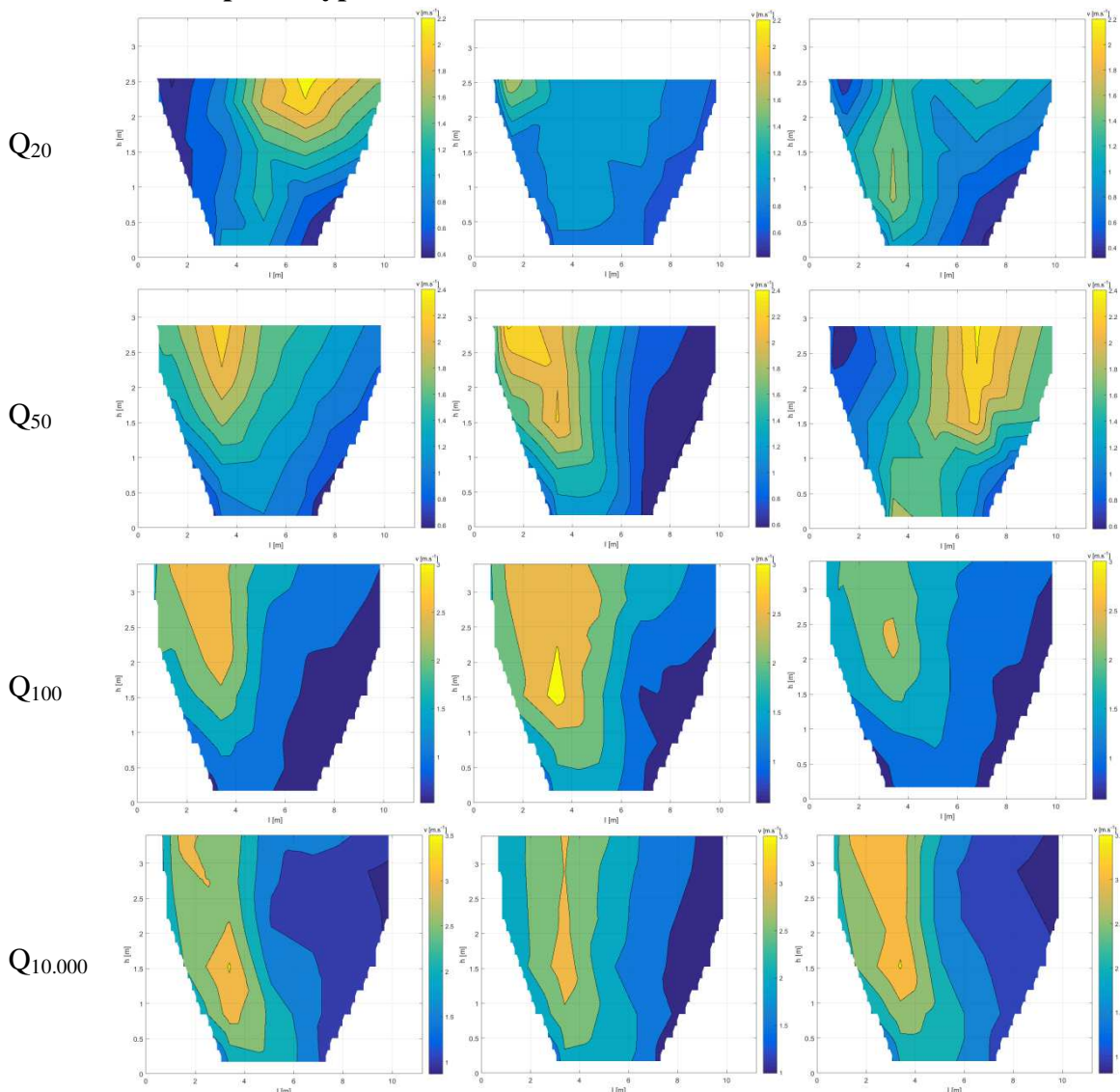
Většina variant při navýšení průtoku na maximum ( $9,9 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) změnil tvar rychlostního pole tak, že nejvyšší rychlosti se nachází u hladiny. Varianty M27, M28, M29 a M31 dosahují nejnižších rychlostí ze všech 16 řešení. U varianty M31 došlo vůbec k největšímu utlumení a nejvyšší měřená rychlost je  $1,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 5.3.4 Obě spodní výpusti



Při odpouštění polovičního možného průtoku oběma spodními výpustmi ( $11,9 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), stejně jako při odpouštění maximálního průtoku ( $23,7 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) jsou rozdíly mezi variantami M9 a M14 nepřilíš významné a obě lze hodnotit jako vhodné. Varianta M6 není vhodná kvůli oblastem s vyššími rychlostmi na dně.

### 5.3.5 Přeliv a spodní výpusti



Pro případ požadavku na současné zapojení jak bezpečnostního přelivu, tak spodních výpustí byly proměřeny pokusy M18, M19 a M20, během nichž jsou spodní výpusti otevřené na maximum, a zbytek průtoků je převáděn přes bezpečnostní přeliv.

Na pokusech se ukázalo, že pro různě četné průtoky je třeba jiného režimu manipulace. S ohledem na nejnižší vykazované rychlosti a jejich rozložení v průtočném profilu jsou nejlepší tyto varianty:

$Q_{20}$  – zapojení bezp. přelivu a pravé spodní výpusti otevřené na maximum (M19)

$Q_{50}$  – zapojení bezp. přelivu a levé spodní výpusti otevřené na maximum (M18)

$Q_{100}$  – zapojení bezp. přelivu a obou spodních výpustí na maximum (M20)

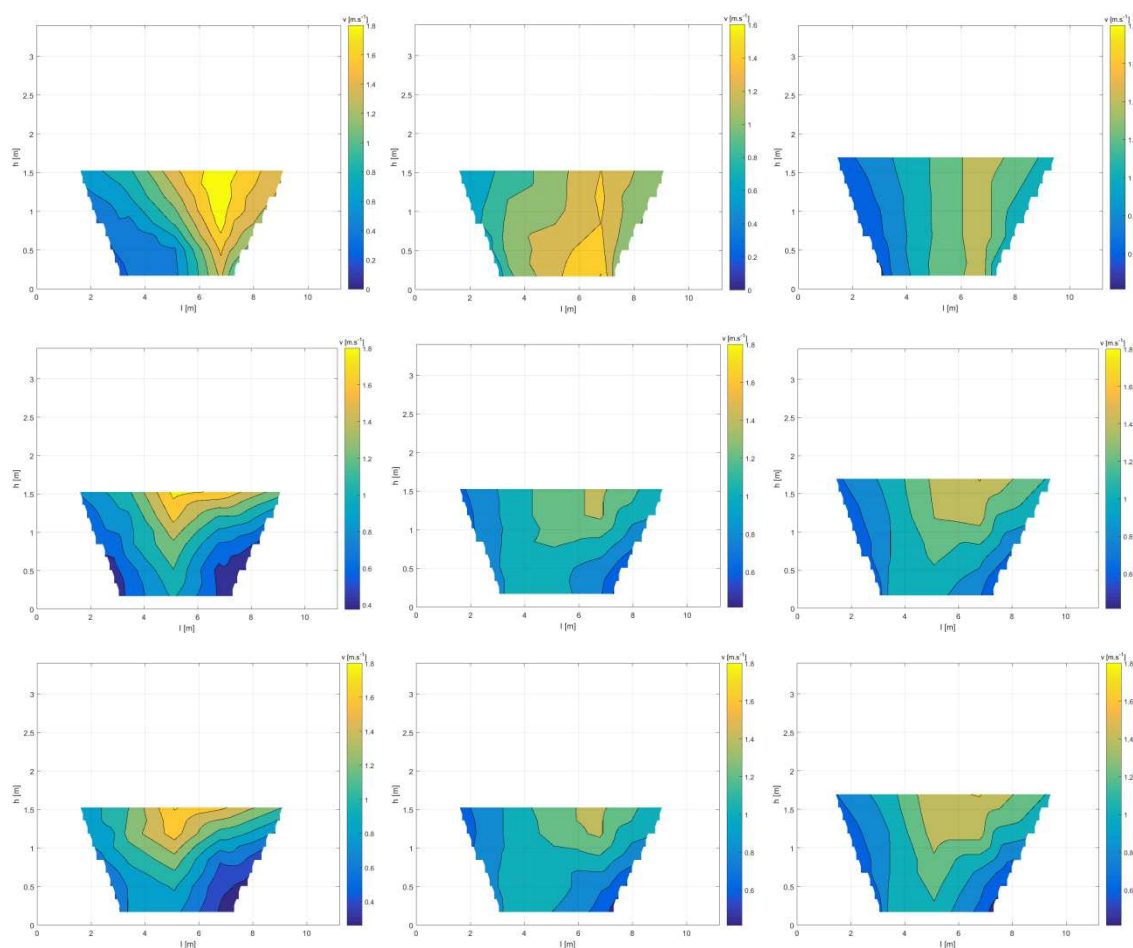
$Q_{10.000}$  – zapojení bezp. přelivu a pravé spodní výpusti otevřené na maximum (M19)

### 5.3.6 Manipulace spodními výpustmi při průtoku $Q \approx 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Vzhledem k rozdílné kapacitě spodních výpustí, jsou porovnávány při různém stupni otevření, tak aby jejich průtok byl alespoň přibližně srovnatelný.

Tab. 11 - Přehled porovnávaných manipulací

	Otevření	Průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Levá výpust	75 %	10,4
Pravá výpust	100 %	9,9
Obě výpusti	50 %	11,9



Ve sloupcích jsou levá, pravá a obě výpusti. V řádcích jsou rychlostní profily pro výše zmíněné průtoky a tyto konstrukční varianty:

1. řádek – výchozí stav, měrný profil 4 m za koncem úpravy

2. řádek – výchozí stav, profil 4 m za úpravou, měrný jízek  $h = 0,5$  m
3. řádek – výchozí stav, profil 4 m za úpravou, měrný jízek  $h = 0,5$  m, vývar prohloubený o 0,25 m

Po stavebních úpravách není nebezpečná ani jedna z variant, oblasti nejvyšších rychlostí jsou převážně uprostřed koryta. Nejmenší rychlosti jsou v rychlostním profilu pravé spodní výpusti.

## 6 ZÁVĚR

Z hlediska výškové úrovně hladin je pro převod průtoku  $Q_{10.000} = 88,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  nejlepším řešením využít maximální kapacitu obou spodních výpustí a zbytek převádět bezpečnostním přelivem. Z hlediska rychlostí na začátku koryta odvádějícího vodu od vodního díla Harcov, je vhodnější využít maximální kapacitu pouze pravé spodní výpusti a dále využívat bezpečnostní přeliv.

Vzhledem k vývoji hladin v nádrži lze doporučit snížení levé zdi skluzu o 0,25 m a také odstranění stropních kleneb z nátokové strany polí bezpečnostního přelivu. S přihlédnutím k historické hodnotě vodního díla nemusí být tato možnost proveditelná.

Pro tlumení energie je vhodné navýšit usměrňovací žebro ve skluzu na celkovou výšku 1,5 m, prohloubit vývar o 0,25 m, na konci úpravy zbudovat měrný jízek o výšce 0,5 m a prodloužit vývar u pravé spodní výpusti o 4,5 m. Usměrňovací žebro u pravé spodní výpusti, nemá prokazatelný vliv na snížení rychlosti proudění.

K manipulaci za běžných průtoků je vzhledem k vývoji rychlostních polí výhodné používat pravou, případně obě spodní výpusti dohromady.

Navrhované a proměřené úpravy podhrází nabízejí hned několik uspokojivých řešení týkajících se snížení rychlostí. Varianty 27 a 31 s koryty, v půdorysném tvaru, blízkými přírodním korytům nebo varianty 28 a 29, které se od stávajícího stavu liší jen nepatrně.

## 7 BIBLIOGRAFIE

1. **RICHTER, David a KLEMŠA, Tomáš.** *VD HARCOV: Studie opatření k zajištění bezpečnosti vodního díla při povodních.* Praha : Povodí Labe, 2008.
2. **ČÁBELKA, Jaroslav a GABRIEL, Pavel.** *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice 1. Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti.* Praha : Academia, 1987.
3. **Mattas, Daniel.** Rozdělení rychlostí v korytě a turbulentní jevy. *Katedra hydrauliky a hydrologie.* [Online] 5. Prosinec 2005. [Citace: 3. Květen 2018.]  
[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/YRIM/ke\\_stazeni/prednasky/3/RIN\\_3-1.ppt](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/YRIM/ke_stazeni/prednasky/3/RIN_3-1.ppt).
4. **KOLÁŘ, Václav, PATOČKA, Cyril a BÉM, Jiří.** *Hydraulika.* Praha : SNTL, 1983.
5. **HAVLÍK, Vladimír a MAREŠOVÁ, Ivana.** *HYDRAULIKA Příklady.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01586.

## 8 SEZNAM PŘÍLOH

Obr. 1 – Původní výkresová dokumentace příčného řezu hrází v místě spodní výpusti.....	8
Obr. 2 – Půdorys a pohled na hráz VD Harcov se zdůrazněním modelovaných částí.....	10
Obr. 3 - Model VD Harcov: bezpečnostní přeliv s kaskádou, vývar a část podhrází.....	16
Obr. 4 - M3: rychlostní pole pro průtoky $Q_1$ , $Q_{10}$ , $Q_{100}$ a $Q_{10.000}$ .....	21
Obr. 5 - M3: bezpečnostní přeliv s odstraněnými klenbami na nátokové straně.....	22
Obr. 6 - $Q_{max}$ pro levou (M4), pravou (M5) a obě výpusti (M6).....	22
Obr. 7 – M4: $Q_{max}$ - nefunkční vývar .....	22
Obr. 8 - M7: $Q_{max}$ - nefunkční vývar.....	23
Obr. 9 - Porovnání skluzu s žebrem výšky 1 m (M10) a 1,5 m (M11) při průtoku $Q_{20}$ .....	24
Obr. 10 - M12: $Q_{max}$ - funkční vývar .....	24
Obr. 11 - M15: bezpečnostní přeliv s klenbami na nátokové straně .....	25
Obr. 12 - M16: $Q_C$ ( $66,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) kaskádový skluz.....	25
Obr. 13 - M13: $Q_{max}$ – provzdušnění proudu bez usměrňovacího žebra.....	26
Obr. 14 - M17: $Q_{max}$ - provzdušnění proudu na usměrňovacím žebře.....	26
Obr. 15 - Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 0 a 1 .....	27
Obr. 16- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 2 a 3 .....	27
Obr. 17- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 4 a 5 .....	28
Obr. 18- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 6 a 7 .....	28
Obr. 19- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 8 a 9 .....	29
Obr. 20- Rekonstrukce podhrází vodního díla Harcov - varianty 10 a 11 .....	29
Tab. 1- Rozdělení prostoru nádrže .....	5
Tab. 2 - Objekty vodního díla Harcov .....	5
Tab. 3 - Kapacita bezpečnostního přelivu VD Harcov.....	9
Tab. 4 – Maximální kapacita spodních výpustí VD Harcov .....	9
Tab. 5 - Přepočtení skutečných průtoků na modelové pro VD Harcov.....	14
Tab. 6 - Formulář pro měření hladin na modelu VD Harcov .....	17
Tab. 7 - Formulář pro měření rychlostí na modelu VD Harcov .....	18
Tab. 8 - Přehled pokusů a měření na vodním díle Harcov .....	19
Tab. 9 - Seznam vyhodnocovaných skupin měření.....	34
Tab. 10 - Srovnání rychlostí od pravé spodní výpusti pro $Q_{1/2}$ .....	39
Tab. 11 - Přehled porovnávaných manipulací.....	41