

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Jakub NOVOTNÝ

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studie použití vhodného uzávěru na přelivu VD Nechanice a měření vybrané varianty na fyzikálním modelu.

The study of using an appropriate gate on the spillway of Nechanice dam and measurement of selected variants on the physical model.

Vedoucí bakalářské práce: Ing, Martin Králík, Ph.D.

Konzultant(i): Ing. Jan Kareis, Ph.D., Vladimír Zelenka

Květen 2017

Jakub NOVOTNÝ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE****I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE**

Příjmení: <u>Novotný</u>	Jméno: <u>Jakub</u>	Osobní číslo: <u>423720</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra hydrotechniky</u>		
Studijní program: <u>SI</u>		
Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

**II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI**

Název bakalářské práce: <u>Studie použití vhodného uzávěru na přelivu VD Nechanice a měření vybrané varianty na fyzikálním modelu.</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>The study of using an appropriate gate on the spillway of VD Nechanice and measurement of selected variants on the physical model.</u>	
<p><b>Pokyny pro vypracování:</b>          Vodní dílo Nechanice se nachází v Ústeckém kraji na řece Ohři a je nejdlejší sypanou hrází v České republice. V bakalářské práci bude charakterizováno VD Nechanice jako celek. Dále student provede měření ve vodohospodářské laboratoři ČVUT na fyzikálním modelu VD Nechanice a z naměřených dat provede výpočet a vyhodnocení konzumpční křivky. Pozornost bude věnována také studii vhodného použití uzávěrů na přelivu dle metodik.</p> <p><b>Seznam doporučené literatury:</b>          Hydraulika, Příklady, Doc. Ing. Havlík, CSc., Ing. Ivana Marešová, CSc.          Hydraulika pro vodohospodářské stavby - Boor, Kunštátský, Patočka          Metodika a rozbor pro a srovnání spolehlivosti klapkových, segmentových, hydrostatických, stavidlových uzávěrů hydrotechnických staveb, doc. Ing. Satrapa, CSc. a kolektiv</p>	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Králik Martin, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>21. 2. 2017</u> Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28. 5. 2017</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>	
<p>_____</p> <p>Podpis vedoucího práce</p>	<p>_____</p> <p>Podpis vedoucího katedry</p>

**III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ**

<p><i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i></p>	
<p>_____</p> <p>Datum převzetí zadání</p>	<p>_____</p> <p>Podpis studenta(ky)</p>



### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 28. května 2017

.....



## **Poděkování**

Chtěl bych velice poděkovat panu Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a konzultace během semestru. Děkuji také panu Ing. Janu Kareisovi, Ph.D. a panu hráznému VD Nechanice Vladimíru Zelenkovi za zodpovězení dotazů týkajících se studie použití vhodného uzávěru na bezpečnostním přelivu VD Nechanice.

## ABSTRAKT

Hlavním tématem bakalářské práce je, vybrat a použít na základě metodiky pro rozbor a srovnání spolehlivosti uzávěrů takové uzávěry na krajních polích bezpečnostního přelivu, které společně se zdvižným segmentem ve středním poli bezpečně a spolehlivě převedou návrhový povodňový průtok  $Q_{10\,000}$ . Dále je pozornost věnována také posouzení kapacity skluzu a vývaru. Výsledkem je tedy celkové posouzení bezpečnostního přelivu VD Nechranice na návrhový povodňový průtok  $Q_{10\,000}$  a stanovení některých vybraných variant konzumčních křivek na základě provedených výpočtů a měření na fyzikálním modelu VD Nechranice.

**Klíčová slova:** bezpečnostní přeliv, povodňový průtok, konzumční křivka, fyzikální model

## ABSTRACT

The main topic of this Bachelor's thesis is to determine which gates are most suitable to place on the sides of the spillway of the Nechranice dam in order to adequately and safely resist flood flow  $Q_{10\,000}$ . The method used here is to analyse and compare the reliability of the spillway.

Furthermore, the study takes into account the assessment of the capacity of the spillway channel and the stilling pool. The results verify the Nechranice emergency spillway capacities for flood flow  $Q_{10\,000}$  and include the measurement of rating curves on the selected variants of the physical model.

**Keywords:** emergency spillway, flood flow, rating curve, physical model

**OBSAH**

1	ÚVOD .....	4
2	TECHNICKÝ POPIS VODNÍHO DÍLA .....	5
2.1	Úvod .....	5
2.2	Identifikační údaje .....	6
2.3	Hydrologické údaje .....	6
2.4	Technické parametry .....	7
2.5	Stavební část .....	8
2.5.1	Vzdouvací objekt – hráz .....	8
2.5.2	Věžový objekt .....	9
2.5.3	Komunikační a odpadní chodba .....	10
2.5.4	Přelivný objekt a skluz .....	10
2.6	Strojní část .....	12
2.6.1	Věžový objekt .....	12
2.6.2	Přelivný objekt .....	14
3	ROZBOR VODOHOSPODÁŘSKÉ FUNKCE VD NECHRANICE .....	17
3.1	Účel vodního díla Nechanice .....	17
3.1.1	Hlavní účely .....	17
3.1.2	Vedlejší účely .....	17
4	ROZBOR VLIVŮ VD NECHRANICE NA OKOLNÍ PROSTŘEDÍ .....	18
5	STUDIE VHODNÉHO UZÁVĚRU NA BEZPEČNOSTNÍM PŘELIVU .....	19
5.1	Popis metodiky .....	19
5.2	Rozbor spolehlivosti .....	20
5.2.1	Hydrostatický uzávěr .....	21
5.2.2	Klapkový uzávěr .....	21
5.2.3	Segmentový uzávěr .....	21
5.2.4	Stavidlový uzávěr .....	22
5.3	Vyhodnocení výsledků studie .....	22
6	STAVBA FYZIKÁLNÍHO MODELU .....	24



6.1	Vstupní a modelové podmínky.....	24
6.2	Měřítka podobností fyzikálního modelu .....	25
6.3	Popis fyzikálního modelu.....	25
6.4	Měření veličin na fyzikálním modelu .....	26
6.5	Program měření .....	26
7	VÝPOČET KONZUMČNÍ KŘIVKY VYBRANÝCH VARIANT .....	27
7.1	Segmentový uzávěr .....	28
7.1.1	Výpočet měření M9.....	29
7.1.2	Výpočet měření M10.....	31
7.1.3	Výpočet měření M11 .....	33
7.1.4	Výpočet měření M12.....	34
7.1.5	Závěr a rekapitulace výpočtu konzumčních křivek segmentového uzávěru..	35
7.2	Klapkový uzávěr.....	37
7.2.1	Výpočet měření M13.....	38
7.2.2	Výpočet měření M14.....	39
7.2.3	Výpočet měření M16.....	41
7.2.4	Výpočet měření M17.....	43
7.2.5	Závěr výpočtů konzumčních křivek klapkového uzávěru.....	44
8	MĚŘENÍ KONZUMČNÍ KŘIVKY VYBRANÝCH VARIANT .....	46
8.1	Postup měření.....	47
8.1.1	Segmentový uzávěr .....	47
8.1.2	Klapkové uzávěry.....	48
8.2	Výsledky a závěr z měření konzumční křivky na fyzikálním modelu .....	49
8.2.1	Segmentový uzávěr .....	49
8.2.2	Klapkový uzávěr .....	51
9	POROVNÁNÍ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM.....	53
10	POROVNÁNÍ KONZUMČNÍCH KŘIVEK PŮVODNÍHO A NOVÉHO STAVU S MANIPULAČNÍM ŘÁDEM.....	55
11	SKLUZ S VÝVAREM.....	56
11.1	Geometrie - popis .....	56





11.2	Výpočet režimu proudění v otevřeném korytě skluzu.....	57
11.3	Průběh hladiny ve skluzu bezpečnostního přelivu .....	60
11.3.1	Výpočet hladiny nerovnoměrného proudění .....	60
11.3.2	Výstupy z měření a výpočtu průběhu hladiny nerovnoměrného proudění ....	61
11.3.3	Citlivostní analýza vlivu drsnostního součinitele na průběh hladiny ve skluzu	64
11.4	Vývar.....	65
11.4.1	Geometrie .....	65
11.4.2	Úroveň hladiny dolní vody.....	66
11.4.3	Výpočet a posouzení kapacity vývaru bezpečnostního přelivu .....	66
12	ZÁVĚR.....	69
	Použitá literatura a prameny .....	70
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam příloh.....	73

# 1 ÚVOD

V dnešní době, kdy ochrana lidských životů a jejich majetku je prioritní záležitostí, se bezpečnostní kritéria a požadavky na vodní díla neustále zpřísňují. Vodní dílo Nechanice se třemi přelivnými poli bezpečnostního přelivu, bylo v době výstavby vyprojektováno dle vyhlášky na návrhový povodňový průtok  $Q_{1000}$ . Tato vyhláška již pozbyla své platnosti a byla nahrazena vyhláškou č. 590/2002 Sb., která stanovuje pro stavbu I. kategorie hodnotu návrhového povodňového průtoku na  $Q_{10\,000}$ . Tato legislativní změna vedla státní podnik Povodí Ohře k vypsání zakázky na vypracování hydrotechnického výzkumu na rekonstrukci krajních polí bezpečnostního přelivu VD Nechanice. Obsah výzkumu spočíval v ověření bezpečného převedení návrhového povodňového průtoku  $Q_{10\,000}$ . Na základě výzkumu, který vypracovala a posoudila Katedra hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, vznikl fyzikální model bezpečnostního přelivu, na kterém probíhalo měření hodnot pro účely posouzení převádění  $Q_{10\,000}$ . Manipulace na nově navržených uzávěrech je obsahem této bakalářské práce.

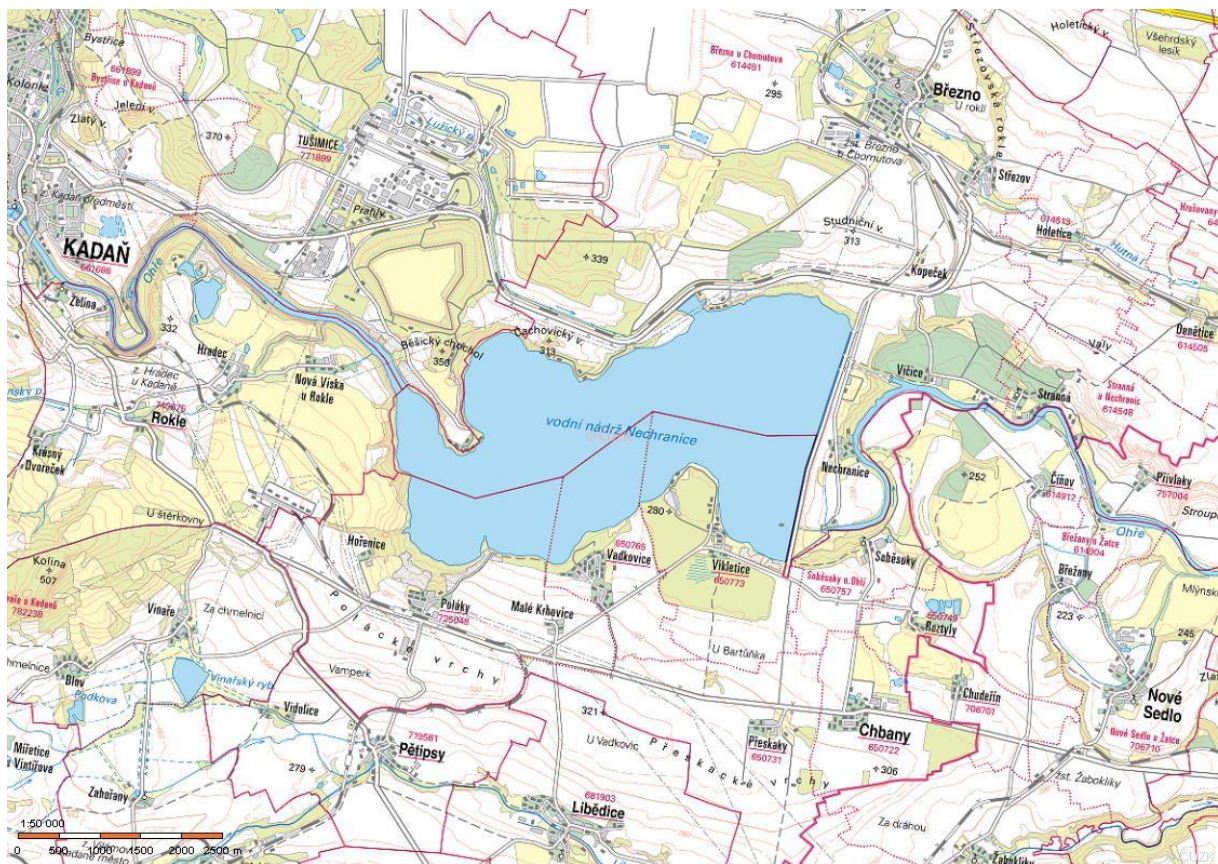
Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo zpracování studie k posouzení použití vhodného uzávěru na krajních polích bezpečnostního přelivu VD Nechanice, vycházející z metodik pro rozbor a srovnání spolehlivosti uzávěrů hydrotechnických staveb. Po vyhodnocení studie bylo následně provedeno měření manipulace vybraných variant na fyzikálním modelu. Výsledkem této práce by mělo být stanovení konzumčních křivek navržených uzávěrů a posouzení kapacity skluzu a vývaru pro převedení návrhového povodňového průtoku  $Q_{10\,000}$ .

Posouzení převedení návrhového povodňového průtoku přes vyhrazený segmentový uzávěr a sklopené klapkové uzávěry bezpečnostního přelivu VD Nechanice nebylo součástí této práce, ale bylo obsahem zprávy z modelového výzkumu Katedry hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

## 2 TECHNICKÝ POPIS VODNÍHO DÍLA

### 2.1 Úvod

Vodní dílo Nechanice, vybudované na řece Ohři (ř. km 103,44) v letech 1961 – 1968, je v trvalém provozu od roku 1970. Nachází se v severních Čechách v okrese Chomutov, mezi městy Kadaň, Chomutov a Žatec. Severní část nádrže společně s hrází spadá do katastrálního území Březno u Chomutova (614491) a zbylá jižní část spadá pod k. ú. Vikletice (650773), Vadkovice (650765) a Poláky (725048).



Obr. 2.1 - Katastrální mapa

Svou rozlohou 1338 ha je VD Nechanice pátou největší přehradní nádrží České republiky a zároveň nejdelší sypanou přehradní hrází ve střední Evropě. Její délka činí 3280 m. Celkový objem nádrže 287,63 mil. m<sup>3</sup>. [9]

Od roku 2004 je VD zařazeno do I. kategorie vodních děl (do r. 2004 II. kategorie).

Správcem díla je Povodí Ohře, státní podnik. [10]

## 2.2 Identifikační údaje

Název stavby:	Vodní dílo Nechanice
Provozovatel:	Povodí Ohře, s. p.
Okres:	Chomutov
Kraj:	Ústecký
Tok:	Ohře
Číslo hydrologického pořadí:	1-13-02-121

Výše uvedené identifikační údaje byly převzaty z Provozního řádu VD Nechanice. [10]

## 2.3 Hydrologické údaje

Základní hydrologické údaje pro tok Ohře v profilu „VD Nechanice – hráz“

Obr. 2 poskytl ČHMÚ Ústí n. L. dne 6. 4. 2004 pod č.j. 4/OH. Hodnota

$Q_{10\,000}$  byla získána ze studie L. Kašpárka [10]. [9]

*Pozn.: Hodnoty pro N-leté průtoky, resp. objemy, jsou uváděny v pořadí roční/letní/zimní.*

Tok		Profil											
Ohře		VD Nechanice – hráz											
Plocha povodí A [km <sup>2</sup> ]		Průměrná dlouhodobá roční hodnota											
		srážek Pa [mm]						průtoku Qa [l/s]					
3590,3		727						30,8					
M-denní průtoky		[m <sup>3</sup> /s] třída II											
M	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q <sub>Md</sub>	70	49	38,2	31	25,8	21,7	18,2	15,2	12,5	9,9	7,3	4,6	2,6
N-leté průtoky		[m <sup>3</sup> /s] třída II N-leté objemy [mil. m <sup>3</sup> ]											
N	1	2	5	10	20	50	100						
Q <sub>N</sub>	199	270	372	453	539	657	753/339/686						
W <sub>N</sub>	–	–	–	–	–	–	209/106/202						
N	10000												
Q <sub>N</sub>	1407												
W <sub>N</sub>	506,6												

Obr. 2.2 - Hydrologické údaje VD Nechanice

## 2.4 Technické parametry

### Vzdouvací objekt – hráz

- přímá, jednou lomená, zemní, sypaná
- kóta koruny hráze - 274,50 m n. m.
- délka koruny hráze - 3280 m
- šířka koruny hráze - 9 m
- max. výška hráze nad terénem - 47,5 m

### Výpustná zařízení

- spodní výpusti:
  - průměr spodních výpustí - 2 x DN 1800
  - kapacita spodních výpustí při hladině zásobního objemu - 2 x 50,7 m<sup>3</sup>/s

### Bezpečnostní přeliv

- korunový, hrazený 3 segmenty
- 2 hydrostatické segmenty 2 x 15,0 m
- kóta přepadové hrany sklopených segmentů - 268,00 m n. m.
- kapacita obou polí s vyhrazenými hydrostatickými segmenty při max. hladině v nádrži - 714 m<sup>3</sup>/s
- 1 zdvižný segment ve středním poli - 1 x 13,0 m
- kóta přepadové hrany vyhrazeného segmentu - 263,00 m n. m.
- kapacita středního pole s vyhrazeným zdvižným segmentem při max. hladině - 479 m<sup>3</sup>/s
- celková kapacita přelivu při max. hladině v nádrži - 1193 m<sup>3</sup>/s

### Odpadní štola

- délka štoly - 475 m
- spád štoly - 1,2 – 9,1 ‰

### Malá vodní elektrárna Nechanice

- Kaplanova turbína - 2 × KT 6-K-50
- maximální hltnost - 2 × 16 m<sup>3</sup>/s
- instalovaný výkon - 2 × 5 MW

### Nádrž

- |                            |        |         |
|----------------------------|--------|---------|
| - kóta dna nádrže          | 227,00 | m n. m. |
| - hladina mrtvého prostoru | 233,70 | m n. m. |

- hladina stálého nadržení	235,40	m n. m.
- hladina zásobního prostoru	269,00	m n. m.
- hladina ovladatelného ochranného prostoru	271,90	m n. m.
- hladina ovladatelného prostoru	271,90	m n. m.
- hladina neovladatelného ochranného prostoru	273,05	m n. m.
- maximální hladina	273,05	m n. m.
- mrtvý prostor	1,085	mil. m <sup>3</sup>
- prostor stálého nadržení	2,650	mil. m <sup>3</sup>
- zásobní prostor	233,215	mil. m <sup>3</sup>
- ovladatelný ochranný prostor	36,562	mil. m <sup>3</sup>
- ovladatelný prostor	272,427	mil. m <sup>3</sup>
- neovladatelný ochranný prostor	15,205	mil. m <sup>3</sup>
- celkový prostor	287,632	mil. m <sup>3</sup>
- celková zatopená plocha	1338	ha

Všechny výše uvedené technické parametry byly čerpány z Provozního řádu vodního díla Nechanice. [10]

## 2.5 Stavební část

### 2.5.1 Vzdouvací objekt – hráz

- přímá, jednou lomená, zemní, sypaná se šikmou sprašovou těsnicí vrstvou

#### 2.5.1.1 Těleso hráze

Jde o sypanou hráz, která je v koruně dlouhá 3 280 m. Výška koruny hráze od dna údolí dosahuje výšky až 47,5 m. Celkový objem tělesa hráze je 9,5 mil. m<sup>3</sup>, z toho objem šterko-písků je 8,7 mil. m<sup>3</sup> a objem sprašových hlín je 0,9 mil. m<sup>3</sup>.

Hráz je navržena na stupeň stability 1,8.

Vzhledem k deformacím hráze byly zvoleny nejvhodnějším těsnícím materiálem sprašové hlíny. Těsnící jádro má v horní části tloušťku 1,8 m a směrem dolů nabývá hodnoty až 6,5 m. Sprašové těsnění v levé a střední části hráze je v délce 2750 m napojeno pomocí příkopu na nepropustné podloží.

Ve střední a pravé části je podloží hráze utěsněno jílobetonovou těsnící clonou. Úkolem clony je utěsnit propustné vrstvy a zmenšit vztlakové síly, které negativně působí na stabilitu hráze. Clona by také měla zabránit vyplavování jemných písků.

#### 2.5.1.2 Návodní svah

Ve strmé části návodního svahu je sklon 1 : 2,1. Svah je chráněn betonáží o tl. 20 cm proti abrazivním účinkům vln. V případě nutných oprav jsou spáry vyplňovány nepropustnou betonovou směsí.

#### 2.5.1.3 Vzdušní svah

Sklony vzdušného svahu jsou postupně odstupňovány v poměru 1 : 1,75; 1 : 2 a 1 : 3. U paty hráze se nachází patní prefabrikovaný příkop, který je zaústěn do vývaru chodby. Nedaleko patního drénu se také nachází odlehčovací systém pro snížení vztlaku. Tento systém se skládá ze 14 navzájem propojených studní. Voda z těchto studní je taktéž sváděna kameninovým potrubím do vývaru odpadní chodby.

Svah je pokryt vrstvou humusu a oset trávou. Dodatečně byla provedena i keřová výsadba, která brání splavování orniční vrstvy.

#### 2.5.1.4 Koruna hráze

Po koruně hráze vede komunikace III. třídy, č. 22512. Šířka komunikace je 8 metrů a celková šířka koruny hráze je 9 m. Na návodní straně koruny je umístěno betonové zábradlí, které plní funkci vlnolamu. Spád vozovky je střečovitý. Odvodnění je řešeno na návodní straně otvory v zábradlí a na vzdušní straně je voda zasakována do travního porostu.

### 2.5.2 Věžový objekt

Objekt je možné rozdělit na dvě části. První z částí je spodní stavba, která má kvádrový tvar s lomenou spárou o ploše 42,4 x 24,4 m a výšce 14 m. Jako materiál zde byl použit železobeton. Druhou z částí je vrchní stavba, která na spodní stavbu navazuje dvěma souosými válci o výšce 50 m. Průměr většího válce je 20,4 m; tloušťka stěny 1,2 m. Průměr menšího válce je 3,2 m; tloušťka stěny 0,6 m.

Prostor mezi vnějším a vnitřním válcem je využit pro účely elektrárny, skládek hradidel a česlí, skladů náhradních dílů, provozních místností, dílen, velínu, výtahu, telefonní ústředny a sociálního zařízení. Vnitřní prostor vnitřního válce je využit jako prostor pro schodiště, stoupací potrubí pro přívod vody, kanalizace, klimatizace, rozvod stlačeného vzduchu a kabelové vedení.

Spodní část stavby je opatřena savkami pro turbíny a jejich odpad je opancérován. Můžeme zde také najít zaústění rozstříkovacích uzávěrů spodních výpustí. Voda z turbín nebo ze spodních výpustí je odváděna odpadní štolou, která navazuje na spodní stavbu věžového objektu.

### **2.5.3 Komunikační a odpadní chodba**

Tvar chodby je parabolického tvaru. Vrchní část klenbového tvaru se nazývá komunikační chodba a odpadní chodba je umístěna pod ní. Celková výška štoly je 12 m a šířka v nejširším místě je 15,2 m. Tloušťka stěny spodní stavby je 1,5 m; část klenbová má tloušťku 1 m. Celková délka 485 m je tvořena z 32 pasů. Každý z pasů je dlouhý 15 m a spojeny jsou pomocí pérových kloubů. Tyto klouby byly použity z důvodů, aby zabránily stupňovitému sedání.

#### **2.5.3.1 Komunikační chodba**

Hlavní funkcí komunikační chodby je komunikační spojení věžového objektu a vrátnice. Chodba je rozdělena cihlovou příčkou. Levá část chodby slouží pro účely vedení kabelových tras. Pravá část je prázdná a vede zde pouze potrubí s pitnou vodou a chladicím vzduchem.

#### **2.5.3.2 Odpadní chodba**

Jak již dříve bylo zmíněno, odpadní chodba se nachází pod chodbou komunikační. Skládá se ze dvou stejných rovnoběžných částí. Každá z částí je 5 m široká a až 3,8 m vysoká. Tloušťka dělicí stěny je 0,6 m. Dvě samostatné a nezávislé chodby byly zvoleny z důvodů případných oprav a revizí, aniž by byl omezen provoz vodního díla.

### **2.5.4 Přelivný objekt a skluz**

Hlavním účelem přelivného objektu a skluzu je převádění velkých vod. Objekty jsou situovány v levé části hráze. Bezpečnostní přeliv se skládá ze tří polí. Levé krajní pole po směru toku, označeno jako č. 1, je hrazeno hydrostatickým segmentem, střední pole jako č. 2, je hrazeno segmentem zdvižným a pravé krajní pole jako č. 3, je hrazeno hydrostatickým



segmentem. Skluz se skládá z několika částí a po své délce má proměnlivý podélný sklon i sklony břehů. Je zakončen odrazníky a vývarem.



Obr. 2.3 - Pole bezpečnostního přelivu

#### 2.5.4.1 Přelivný objekt

Původně byl tvořen třemi poli. Každé pole bylo široké 15 m s hradicí výškou 3,9 m. Po stavební úpravě středního pole byla šířka zúžena na 13 m s tím, že obě krajní pole zůstala bez změn. Všechny tři hradicí uzávěry jsou ovládány z velínu pod mostovkou umístěného nad středním polem.

##### 2.5.4.1.1 Krajní pole přelivu

Dvě krajní pole přelivu označeny, jako pole č. 1 a pole č. 3 jsou z pohledu stavebních úprav totožné. Ve spodní stavbě je prostor, který je přizpůsoben rozměrům a tvaru hydrostatického segmentu. V případě plného vyhrazení je celé těleso uzávěry skryto v tělese spodní stavby. V blízkosti osy otáčení se nachází betonový stupeň, který slouží k revizi, případně údržbu nebo výměnu ložiska.

##### 2.5.4.1.2 Střední pole přelivu

Střední pole označeno jako pole č. 2 prošlo v roce 2004 rekonstrukcí. Došlo zde k výměně původního hydrostatického segmentu za segment zdvižný. Tato úprava vedla ke zvýšení ovladatelného prostoru objektem na cca 106 mil. m<sup>3</sup>.

Původní betonový práh středního přelivu byl vybourán na kótu 263,00 m n. m. Dále bylo provedeno bourání do hloubky 300 mm v celé ploše desky, kde byla osazena nosná a napojovací výztuž pro rozšíření pilířů. Šířka středního pole byla po stavebních úpravách zmenšena z 15 metrů na 13 metrů.

V místě dosednutí segmentu byl zapuštěn dosedací práh a v místě provizorního hrazení byly osazeny ocelové patky s roznášecím mechanismem a druhým dosedacím prahem.

Pilíře přiléhající k přelivu segmentu jsou spojeny pomocí deformovatelných trnů k přibetonovaným stěnám.

Vtoková část je hydraulicky zaoblena. Zaoblení vtokové části má tvar válcové plochy v horizontální poloze s dvěma poloměry 3500 a 9900 mm.

#### 2.5.4.2 Skluz

Na výše zmíněné tři přelivné pole navazuje obdélníkový betonový skluz dělený na tři samostatné obdélníkové profily, které se zužují v místě přemostění a šířka ve dně je 39,8 m. Mostní objekt je vzdálen od osy hráze 82,3 m. Za mostním objektem je skluz jednotný s lichoběžníkovým profilem o šířce ve dně 26 m se sklony svahů 1 : 2. Na konci skluzu se nachází pět mohutných betonových rozrážeců a 110 m dlouhý vývar. Celková délka skluzu 592 m je rozdělena dle podélného sklonu na horní a dolní část. V horní části je podélný sklon 1,5 % a v dolní 2,5 %. Kóta dna vývaru je v úrovni 216,70 m n. m.

Koryto řeky Ohře v místě napojení vývaru je opevněno betonovými panely.

Informace o stavební části byly převzaty z Provozního řádu VD Nechanice. [10]

## 2.6 Strojní část

### 2.6.1 Věžový objekt

#### 2.6.1.1 Česle

Na VD Nechanice jsou použity dvě sady jemných česlí na ochranu turbíny a spodních výpustí. Každá sada se skládá z tří polí umístěných v rámu. Jednotlivá pole lze samostatně vyjmout pomocí závěsné traverzy a hradídlového jeřábu. Povrch česlových polí je ošetřen zinkem a opatřen syntetickým ochranným nátěrem.

### 2.6.1.2 Rozstříkovací uzávěr

Rozstříkovací uzávěry DN 1800, PN 6 jsou osazeny na dvou spodních výpustech, které jsou připojeny na odbočkách spirál turbín. Jejich osa je na kótě 222,85 m n. m.

Konstrukce těchto uzávěrů s výtokem pod hladinou je pro účely výpustné a regulační funkce. Ovládání je řešeno pomocí mechanických převodů a elektrických servomotorů.

Maximální průtok jedním uzávěrem při maximální hladině v nádrži je 49,3 m<sup>3</sup>/s. Při použití obou uzávěrů najednou nemá celkový průtok přesáhnout hodnotu 55 – 60 m<sup>3</sup>/s.

Mechanismus ovládání uzávěru se skládá z elektrického servomotoru o příkonu 5,5 kW. Servomotor je uchycen mezi přírubou k ovládacímu stojanu. Pomocí soustavy převodových skříní, spojovacích hřídelí, hnacích hřídelí a dvou pohybových šroubů je síla přenášena na uzavírací plášť.

### 2.6.1.3 Zařízení vodní elektrárny

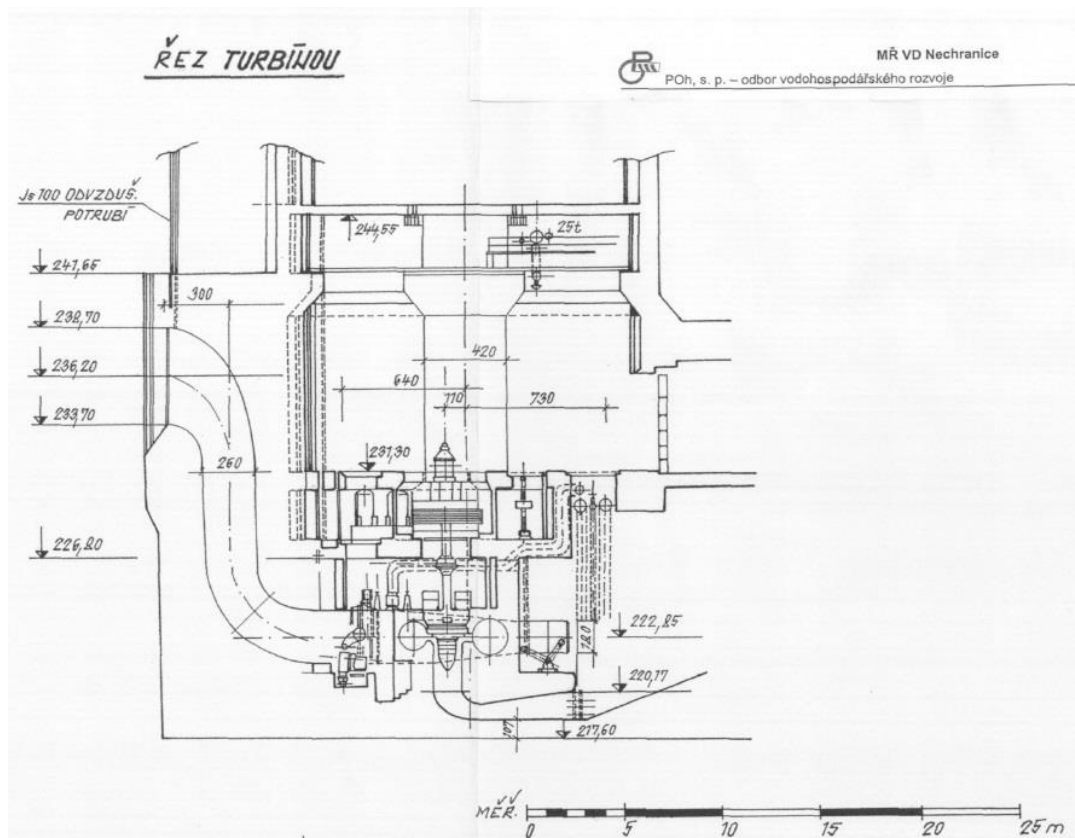
Mezi zařízení elektrárny patří rychlouzávěrná klapka; DN 2600, PN 6, která je na koncových přírubách přírodních potrubí a plní funkci bezpečnostního uzávěru přítoku vody v případě poruchy ovládání turbín.

Dalším důležitým prvkem je zavzdušňovací ventil potrubí; DN 500, PN 6, který slouží k uvolnění vzduchu při naplnění potrubí vodou. V opačném případě k nasátí vzduchu při prázdnění potrubí a spirály.

#### 2.6.1.3.1 Turbína

Instalovány jsou zde dvě Kaplanovy turbíny vertikálního typu 6-K-50 s přímým napojením na vertikální generátory. Jedna turbína je levotočivá (TG2), druhá pravotočivá (TG1). Oběžné kolo je regulovatelné a jeho průměr je 1460 mm.

Užitečný spád je 44 až 30 m. Hltnost turbín se pohybuje v intervalu od 8 do 16 m<sup>3</sup>/s. Při největším spádu; tj. 44 m je jmenovitý výkon na spojce 5940 kW.



Obr. 2.4 – Řez turbínou

## 2.6.2 Přelivný objekt

### 2.6.2.1 Zdvizný segmentový uzávěr

Jedná se o uzávěr č. 2 středního přelivného pole. Světla šířka uzávěru činí 13 m. Výška uzávěru je 5,15 m a jeho maximální zatížení je dimenzováno na 11 m vodního sloupce. Zdvihací síla potřebná k manipulaci se segmentem je 400 kN. Kóta dolního prahu je 263,00 m n. m.

Segment je konstruován jako regulační. Manipulace je zajištěna mechanismem Gallova řetězu na levé straně segmentu. V případě poruchy nebo nouzového stavu je možnost vyhradit těleso pomocí lana, kladek a autojeřábu. Možná je také ruční nouzová manipulace pomocí ručního mechanismu při výpadku elektrické energie. Mechanická aretace segmentu je možná v horní poloze.

Samotný segment je svařen z plechů a válcovaných profilů s poloměrem zaoblení 8000 mm. Celková konstrukce segmentu se skládá z hradičích plechu, vodorovného skříňového nosníku, systému svislých a podélných výtuh a šikmých vzpěrných ramen. Na bocích

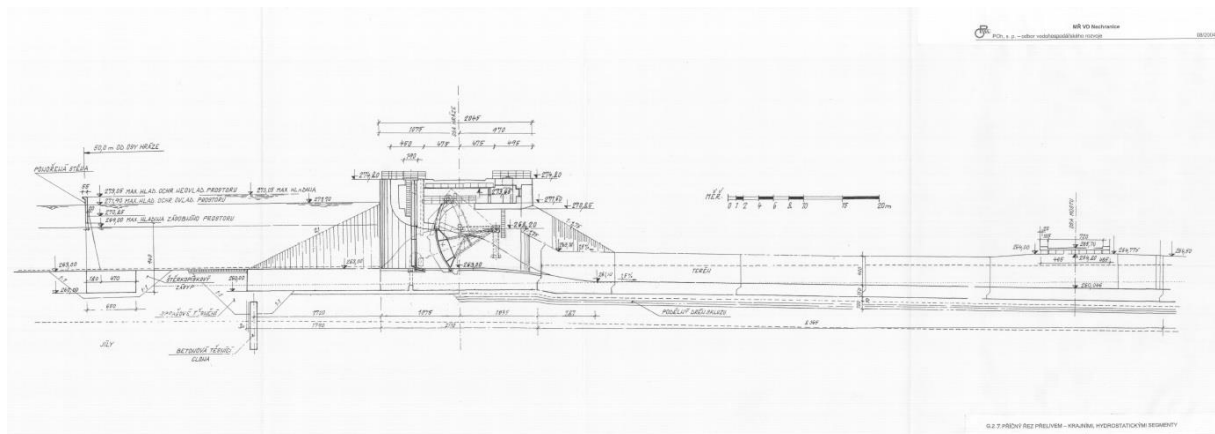
segmentu jsou umístěna závěsná zařízení pro osazení Gallova řetězu a závěsu s lanovou kladkou. Nad závěsem je umístěna opěrná patka pro aretaci.

Skříňový nosník s příčným vyžebrováním je taktéž svařen z plechu tl. 12 mm. Mezi výztuhami jsou olemované otvory, které slouží ke vstupu pro údržbu.

Na stranách je segment opatřen čtyřmi vodícími kladkami, pod kterými je umístěn podkladní plech, který vymezuje boční vůle. Kladky mají bronzová pouzdra a nerezové čepy.

Ložiska segmentu se skládají ze stavitelného excentrického čepu, radiálního a axiálního naklápějícího ložiska, skříňového nosníku, víka a těsnění ložiska. Mazání ložisek je na vnější povrch náboje a na víko do maznic.

Těsnění zdvižného segmentu se skládá z dvojice vodorovného a dvojice svislého těsnění. Dolní prahové těsnění je pryžové s obdélníkovým průřezem uchycené pomocí nerezových šroubů a příložek. Boční pryžové těsnění je ve tvaru noty. Je uchycené z vnitřní strany ke krycímu plechu přes úhelník. Vodorovné horní těsnění je zdvojené z důvodů zamezení stříkání vody nad horní práh v jakékoliv poloze.



**Obr. 2.5 - Příčný řez přelivem – středním, zdvižným segmentem**

viz. Manipulační řád vodního díla Nechanice [9]

#### 2.6.2.2 Hydrostatický segmentový uzávěr

Jedná se o uzávěry č. 1 a č. 3 krajních polí jezu. Každý z uzávěrů je samostatně regulovatelný.

Těleso segmentu se skládá z ocelových svařených desek o tl. 10 mm, které tvoří uzavřené těleso trojúhelníkového tvaru. Návodní stěna je válcová o poloměru 5 100 mm, pře-padová stěna je taktéž válcová o poloměru 12 000 mm. Tyto dvě válcové stěny jsou spojeny třetí rovnou stěnou. Segment je po celé délce vyztužen úhelníky a v příčném směru je vyztužen pomocí rámmů, které jsou ve vzdálenostech po cca 2 000 mm. Boční strany dutého

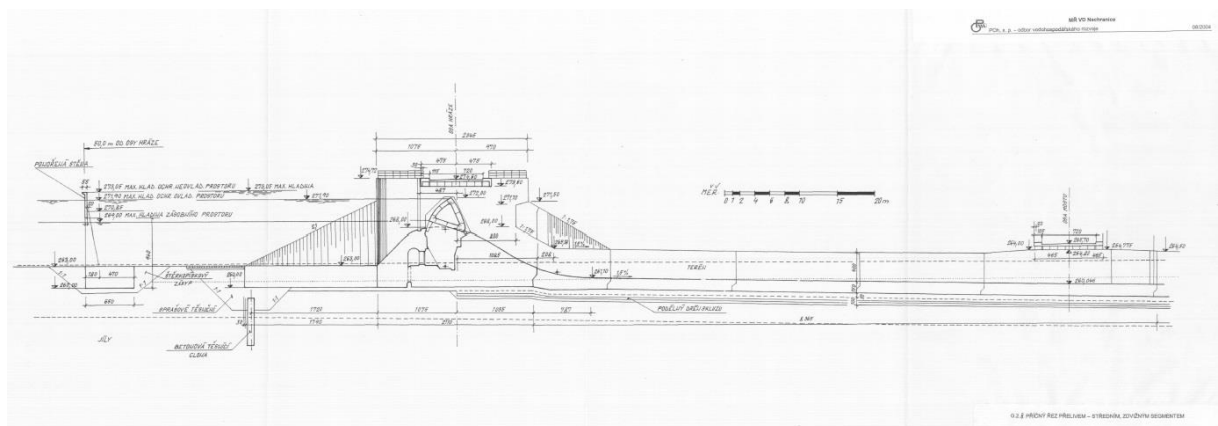
tělesa jsou uzavřeny pomocí plechu o stejné tloušťce 10 mm. Vzniká tak plovák, který se pohybuje v čepch ložisek.

Manipulace spočívá v napouštění nebo vypouštění vody tlačné komory v prostoru pod segmentem. Pomocí osmi ložisek je těleso segmentu uchyceno do spodní stavby jezu. Vstup do vnitřních prostor je umožněn dvěma vodotěsnými kryty.

Návodní těsnění hydrostatického segmentu profilovou pryží je umístěno na bočních štítech, které nejsou vyhřívány, ale pouze natřeny barvou proti namrzání. Spodní část segmentu je utěsněna také pomocí pryže, která je upevněna na prahovou armaturu. Těsnění na povodní straně je z průběžné pásové pryže, která je uchycena z jedné strany k armatuře a z druhé strany k jezu.

Napouštěcí potrubí o velikosti DN 250 je vybaveno dvěma uzávěry; klapka a šoupě. Napouštěcí potrubí o stejném rozměru DN 250 je rovněž vybaveno dvěma uzávěry. Tyto uzávěry poháníme pomocí servopohonů nebo ručně. Segment je možno zaaretovat v horní poloze. Polohu je možné snímat optickým snímačem polohy pootočení.

Informace o strojní části byly převzaty z Provozního řádu VD Nechanice. [10]



**Obr. 2.6 - Příčný řez přelivem – krajními, hydrostatickými segmenty**

viz. Manipulační řád vodního díla Nechanice [9]

## 3 ROZBOR VODOHOSPODÁŘSKÉ FUNKCE VD NECHANICE

### 3.1 Účel vodního díla Nechanice

#### 3.1.1 Hlavní účely

Zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod VD v profilu Stranná, ten je stanoven manipulačním řádem na hodnotu 8 m<sup>3</sup>/s.

Nadlepšování k zajištění odběrů pro účely: vodárenské, průmysl a energetiku, zemědělství a rekultivace.

Snížení velkých vod na Ohři a částečná ochrana území pod vodním dílem před povodněmi. Ochranný objem zajišťuje snížení kulminačního průtoku 100leté povodňové vlny z hodnoty 753 m<sup>3</sup>/s na 462 m<sup>3</sup>/s. Očekává-li se na základě hydrologické předpovědi příchod povodně, lze nádrž předvypustit podle ustanovení kap. C.6 Manipulačního řádu. Manipulace v ochranném prostoru se při povodni řídí dle Manipulačního řádu kap. C.4.

Výroba elektrické energie v MVE Nechanice. Dosažitelný výkon dvou osazených Kaplanových turbín při spádu 44 m je 10 MW.

#### 3.1.2 Vedlejší účely

Likvidace následků havárií. V případě havárie na toku pod nádrží, lze z nádrže Nechanice vypustit celý asanační objem 10 mil. m<sup>3</sup>.

Ovlivňování zimního průtokového režimu pod vodním dílem za účelem omezení nežádoucích ledových jevů. V zimním období je možno při rozpouštění ledové pokrývky na toku pod vodním dílem zvýšit odtok až na požadovanou hodnotu. K rozpouštění ledu je možno použít pouze odtok ze spodních výpustí. Vlastní manipulace operativně řídí VHD na základě zhodnocení celkové situace.

Vodní sporty, sportovní rybolov a rekreace.

Informace byly převzaty z Manipulačního řádu VD Nechanice. [9]

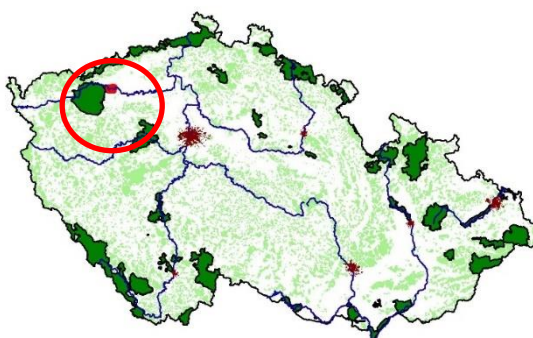
## 4 ROZBOR VLIVŮ VD NECHRANICE NA OKOLNÍ PROSTŘEDÍ

VD Nechanice má značný vliv na kvalitu vody v nádrži i pod hrází VD. Dochází k podstatnému zvýšení kvality vody ve vodním toku pod nádrží, čímž se zlepšují podmínky pro život v řece. Ohře se tak dostává svou kvalitou na úroveň vod pstruhových. [11]

Zátopa VD Nechanice vytváří obrovský prostor pro rozmanitou rybí obsádku, ale také pro život řas a sinic. Kvalita vody v nádrži je na velmi dobré úrovni. V letním období je možný výskyt řas a sinic, omezující rekreační využití nádrže. Jakost vody je důkladně sledována. V období 2012-2015 na nádrži probíhal projekt Technologické agentury ČR „Metody optimalizace návrhu opatření v povodí vodních nádrží vedoucí k účinnému snížení jejich eutrofizace“. [12]

Nádrž je zařazena do evropské soustavy chráněných území Natura 2000 jako Ptačí oblast Nádrž vodního díla Nechanice. Předmětem ochrany je zde husa polní (*Anser fabalis*) a vodní ptáci vyskytující se na zimovišti v počtu vyšším než 20000 exemplářů. [13]

Ornitologický význam Nechanické nádrže je dán velikostí její vodní plochy, jejím položením na tahové cestě vodních ptáků ze severní Evropy za Krušnými horami na kraji Žatecké roviny (dle geomorfologického členění České republiky Mostecká pánev – Žatecko, Lounsko, Radonicko) a navazujícími vhodnými pastevními plochami pro zimující husy polní (*Anser fabalis*). Význam lokality jako tahové zastávky a zimoviště vodních ptáků se zvyšuje každým rokem, což lze dokumentovat výsledky pravidelného sčítání vodních ptáků na tahu a při zimování od roku 1980. [13]



© AOPK ČR, datový podklad MŽP 2008

Obr. 4.1 - Rozšíření Husy polní na území ČR

Existence VD Nechanice značně upravuje rozkolísanost průtoků a umožňuje zachovat ve vodním toku pod nádrží průtok na optimální úrovni.



## 5 STUDIE VHODNÉHO UZÁVĚRU NA BEZPEČNOSTNÍM PŘELIVU

Studie byla založena na Metodice pro rozbor a srovnání spolehlivosti uzávěrů hydrotechnických staveb. Hlavním účelem bylo zjistit prvky náchylné na poruchu a navrhnout konkrétní řešení pro bezpečnou a spolehlivou funkci uzávěru. Dále lze pomocí expertního kvalitativního hodnocení stanovit oblasti s největším součtem nepříznivých vlastností a tím stanovit pořadí priorit pro opatření vedoucí k optimalizaci spolehlivosti za extrémních situací. [4]

### 5.1 Popis metodiky

Metodika vychází z rozdělení konstrukce na čtyři základní části.

- spodní stavba
- hradící těleso
- podpěry, těsnění a ovládání
- pohony

Jednotlivé konstrukční celky konstrukce jsou hodnoceny samostatně a později jsou vyhodnoceny jako celek. Každá část je rozdělena dále do několika kategorií, u kterých se hodnotí vždy dva ukazatelé.

*„Základním ukazatelem hodnocení spolehlivosti uzávěru je součinitel pohotovosti. Tento součinitel získáme z doby bezporuchové provozuschopnosti uzávěru a z doby potřebné k opravě nebo k jinému podobnému postupu uvedení do bezporuchového stavu.“ [6]*

$$K = (T - P)/T$$

kde

K – součinitel pohotovosti (bezrozměrný v hodnotách 0 až 1)

P – doba opravy (měsíce)

T – doba mezi poruchami (měsíce)

Společným součinem jednotlivých kategorií získáme součinitel pohotovosti jednotlivé části konstrukce. Pouze po vynásobení všech čtyř zjištěných součinitelů pohotovosti získáme konečnou spolehlivost daného uzávěru. [7]

Druhým ukazatelem je hodnocení bodováním. U každého prvku bylo postupně vybráno, zda se jedná o prvek s příznivým nebo nepříznivým vlivem na konstrukci. Tímto rozbořem a následným vyhodnocením bylo stanoveno pořadí potenciálních příčin selhání funkce uzávěru. Pomocí tohoto ukazatele je možné stanovit priority nápravných kroků vedoucích k optimalizaci uzávěru a tím dosáhnout co nejvyššího součinitele spolehlivosti. [7]

*„Hlavním kritériem pro správnou a spolehlivou funkci je v tomto případě otevření uzávěru, tedy uvedení do takového provozního stavu, kdy vodní dílo bezpečně převede povodeň nebo uvolní průtočný profil tak, jak je požadováno manipulačním řádem pro povodňové stavy a podobné situace závislé na otevření uzávěru a současně bez neočekávaného poškození vodního díla.“ [4]*

Vzhledem k naší zeměpisné poloze je zapotřebí, vlivem rozdílných klimatických podmínek, hodnotit spolehlivost konstrukce ve dvou režimech, a to zimní a letní režim. [4]

Pomocí této metodiky lze jednoduchým objektivním způsobem stanovit priority různých technologických úprav, rekonstrukcí a údržby uzávěru. Při doplnění ekonomické náročnosti dané úpravy, případně údržby, může být provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení vedoucí k maximálnímu zvýšení spolehlivosti za vynaložení minimálních finančních nákladů. [4]

Porovnání spolehlivosti je možné jak pro jeden uzávěr ve variantních řešeních, tak pro zhodnocení skupiny uzávěrů. Při hodnocení jednoho uzávěru ve variantách modifikací prvku lze dosáhnout té nejvyšší spolehlivosti daného uzávěru. V druhém případě hodnocení skupiny uzávěrů lze vytipovat uzávěr s nejmenší spolehlivostí a navrhnout úpravy tak, aby nebyla negativně ovlivněna spolehlivost ostatních uzávěrů v soustavě. Výrazně slabé články v systému mohou vést k ohrožení spolehlivosti celého systému. [7]

## 5.2 Rozbor spolehlivosti

Hlavním cílem není určit pravděpodobnost poruchy uzávěru, ale stanovit objektivní postup pro srovnávací analýzu vedoucí ke zlepšení spolehlivosti, a tím i k bezpečnějšímu provozu. [5]

Kvantitativní hodnocení spolehlivosti lze provádět tabelárně v tabelárním procesoru, nebo ručně do předepsaných formulářů. [5]

### 5.2.1 Hydrostatický uzávěr

Nejvíce poruchovou částí hydrostatického uzávěru je těsnění a ovládací prvky regulačních kanálů. Nejvíce náchylným prvkem na poruchu, který má významný vliv na celkovou spolehlivost uzávěru je tlačná komora. Jedná o opakující se jev zanášení komory sedimentem a problémy s jejím těsněním. [4]

Hydrostatické uzávěry jsou velmi odolné proti nahodilým jevům při povodni a proti účinkům mrazu. [4]

Investice do výzkumu a vývoje problematiky těsnění tlačných komor může mít zásadní a hlavně pozitivní vliv ke zkvalitnění koncepce a spolehlivosti hydrostatických uzávěrů. [4] Neméně vhodnou investicí do výzkumu a vývoje by byla varianta pro zachycení sedimentů před vtokovým objektem do regulačních kanálů, nebo jinde v systému mimo tlačné komory, kde musí dojít po určité míře zanesení k odstávce uzávěru a vyčistění.

Příloha č.1-4

### 5.2.2 Klapkový uzávěr

Za nejméně spolehlivé části klapkového uzávěru bylo na základě zkušeností z údržby a provozu zvoleno těsnění, ložiska klapky a ovládací prvky umístěné především v průtočném profilu. U ovládacích prvků dochází především k zachycování nesených předmětů vodním proudem. Nejen tento jev, ale i další mohou zapříčínovat opakované negativní jevy, jako jsou například vibrace. Příčiny častého chvění nebyly doposud jednoznačně vysvětleny. Spolehlivost tohoto typu uzávěru je ovlivňována především nahodilými událostmi. Z pohledu pohotovosti a bezpečnosti uzávěru je žádoucí preventivní předcházení nahodilých situací různými konstrukčními úpravami těchto citlivých částí. [5]

Příloha č. 5-8

### 5.2.3 Segmentový uzávěr

Na spolehlivost segmentového uzávěru mají převážně vliv mimořádné události, než opakující se určité konstrukční problémy. Nejcitlivější prvky segmentu jsou ložiska, boční těsnění, vedení a ovládání. Při nesynchronní manipulaci s uzávěrem může dojít ke vzpříčení mezi pilíři. Zvýšení spolehlivosti je tak jedině docíleno preventivním předcházením mimořádných událostí robustním návrhem uzávěru včetně jeho příslušenství a precizní údržba. Dále je možnost vhodné úpravy citlivých částí za provozu. [6]

Příloha č. 9-12

#### 5.2.4 Stavidlový uzávěr

Nejcitlivějšími prvky stavidlových uzávěrů je těsnění a podvozky stavidel. Častým problémem jsou také široké drážky v pilířích, které negativně ovlivňují proudění. V těchto drážkách také dochází k uvíznutí předmětů nesených vodou mezi pohyblivou a nepohyblivou částí pilíře.

Spolehlivost stavidlového uzávěru je především ovlivněna nenadálou událostí, než opakující se konstrukční vadou. Možným zlepšením spolehlivosti celé konstrukce jsou konstrukční úpravy citlivých částí, které těmto nenadálým událostem pomohou včas předejít. [7]

Příloha č. 13-16

### 5.3 Vyhodnocení výsledků studie

Na základě metodického postupu jsme schopni objektivně identifikovat prvky vykazující malou spolehlivost v provozu a zvolit vhodná nápravná opatření pro zvýšení provozní spolehlivosti. Hodnocení je objektivní, tudíž nejsou výsledky postupu ovlivněny hodnotitelem a lze tyto výsledky porovnávat z pohledu spolehlivosti nejen mezi jednotlivými správci vodních děl, ale i odbornými institucemi. [4]

Z výsledku studie bylo zjištěno, že současná varianta hydrostatického segmentového uzávěru je v porovnání s ostatními nejspolehlivější. Ovšem vezmeme-li v potaz problémy, se kterými se v současné době obsluha potýká, bylo rozhodnuto, na základě studie, přistoupit na druhou variantu hradící konstrukce a tou je klapkový uzávěr. Tento uzávěr by měl vyřešit všechny nedostatky a problémy, se kterými se současná konstrukce potýká. Myšleny jsou tím například problémy týkající se netěsnosti komor a tím spojená nepřesná regulace kóty přelivné hrany. Dále bylo zjištěno, že při dosažení určité výšky přepadového paprsku má konstrukce tendenci vlivem síly od přepadající vody klesat, a tím dochází k velmi obtížné regulaci průtoku. Použití klapkového uzávěru je z hlediska stavebních úprav spodní stavby, přesnosti manipulace kóty přelivné hrany a velmi pozitivních ohlasů od správců z jiných vodních děl, kde klapkový uzávěr byl již navržen a zkonstruován, nejvhodnějším řešením.

Hydrostatický segment		
konstrukční část	priorita	souč. pohotovosti
Spodní stavba	0.33	0.95
Hradící těleso	0.33	0.95
Podpěry a těsnění	5	0.75
Pohony	0	0.98
Spolehlivost konstrukce		0.66
Klapkový uzávěr		
konstrukční část	priorita	souč. pohotovosti
Spodní stavba	0.67	0.90
Hradící těleso	0.50	0.90
Podpěry a těsnění	1	0.62
Pohony	0.50	0.89
Spolehlivost konstrukce		0.44
Segmentový uzávěr		
konstrukční část	priorita	souč. pohotovosti
Spodní stavba	0.67	0.91
Hradící těleso	0.50	0.86
Podpěry a těsnění	5	0.62
Pohony	1	0.89
Spolehlivost konstrukce		0.43
Stavidlový uzávěr		
konstrukční část	priorita	souč. pohotovosti
Spodní stavba	0.67	0.91
Hradící těleso	0.25	0.70
Podpěry a těsnění	0.8	0.65
Pohony	0.5	0.90
Spolehlivost konstrukce		0.37

Obr. 5.1 - Výsledky studie spolehlivosti jednotlivých jezových konstrukcí

## 6 STAVBA FYZIKÁLNÍHO MODELU

### 6.1 Vstupní a modelové podmínky

Fyzikální model VD Nechanice se skládá z hráze, předpolí, vlnolamu, přelivu, skluzu a rozrážečů. Všechny tyto části byly navrženy a vybudovány v měřítku  $M - 1:50$ . Toto měřítko bylo zvoleno na základě rozboru geometrických, průtokových, časových, tíhových a kvalitativních podmínek. [8]

*„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.“*  $Fr = \sqrt{\frac{\alpha v^2}{gy}}$ , [8]

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 proudění dle Froudova zákona může mít vliv povrchové napětí vody, tudíž musí být dodrženo několik následujících pravidel. Přepadová výška na modelu  $h \geq 20$  mm, povrchová rychlost proudu má být  $u \geq 230$  mm.s<sup>-1</sup>, aby vlivem kapilárních sil nedocházelo k bránění vzniku povrchových vln vlivem gravitačních sil, světlá šířka přelivového pole na modelu  $b_0 \geq 60$  mm, výtokový otvor  $a \geq 60$  mm, aby výtokový jev a tvar paprsku nebyl ovlivněn drsností dna a stěn koryta vlivem povrchového napětí, hloubka vodního proudu na modelu  $h \geq 15$  mm – důležité u říčních modelů. Nezbytně nutné je zachování stejného režimu proudění na modelu a skutečném díle. [8]

Velikost nádrže fyzikálního modelu byla určena pomocí matematického modelu. Byly testovány dvě varianty nátoky. První varianta nátoky z čelní strany a druhá varianta z čelní strany a stran bočních. Obě tyto varianty byly porovnány a vznikl návrh velikosti nádrže o rozměrech: 3 m x 3 m x 1 m. Návrh velikosti nádrže fyzikálního modelu byl potvrzen pro

obě uspořádání nátoky porovnáním kapacit přelivu na maximální hladinu v nádrži dle manipulačního řádu. Tolerance přesnosti fyzikálního modelu se udává 1 % až 3 %. Rozdíl při výpočtu matematickým modelem a výsledků měření na fyzikálním modelu vyjádřen v procentech byl 0,5 % pro klapku a 0,6 % pro ½ segmentu, což je pod výše zmíněnou hranicí přesnosti. [8]

## 6.2 Měřítka podobností fyzikálního modelu

*„Měřítka modelu je dáno na základě mezních podmínek modelové podobnosti, možnosti laboratoře, konstrukčních podmínek a podmínek reprezentativního výzkumu. Na základě těchto podmínek bylo zvoleno měřítko  $M_l = 1:50$ .“ [8]*

Pro měřítko rychlostí platí  $M_v = M_l^{\frac{1}{2}}$ , pro měřítko průtoků platí  $M_Q = M_l^{\frac{5}{2}}$  a pro měřítko času platí  $M_t = M_l^{\frac{1}{2}}$

Celková délka modelu  $L = 13,5$  m, výška  $H = 1,0$  m a šířka  $B = 1,4$  m. Voda byla čerpána pomocí čerpadla a přiváděna pomocí rozváděcího potrubí do nádrže modelu VD Nechanice, která slouží k uklidnění vody. Průtok byl měřen pomocí indukčního průtokoměru. Odvádění vody bylo řešeno pomocí sběrné šachty, která se nachází v podzemních prostorech vodohospodářské laboratoře a je zaústěna do centrální sběrné nádrže. [8]

## 6.3 Popis fyzikálního modelu

Hydraulický fyzikální model VD Nechanice byl vyroben převážně z PVC materiálů (tvrzené, pěnění, průhledné), z pozinkovaného plechu, z překližek a ocelových nosníků. Jednotlivé části modelu byly barevně odlišeny z důvodů snadné orientace. Rozdělení bylo zvoleno následující:

- šedá – skluz, předpolí bezpečnostního přelivu, hráz, přídavné zavzdušnění klapky
- okrová – návodní hrana přelivů krajních polí, spodní (povodní) stavba hydrostatických segmentů, navýšení stěn skluzu
- modrá – pilíře na přelivu, zavzdušnění klapky mostovka na přelivu, nátoková horní stěna na střední pole přelivu
- černá – mostovka nad skluzem
- béžová – silnice na mostě nad přelivem, silnice na mostě nad skluzem
- bílá – stěny uklidňovací nádrže, nosné konstrukce částí modelu
- zelená – klapkové uzávěry

- červená – zdvižný segment
- světle červená – stěny navazující na střední pilíře
- světle růžová – spodní (povodní) stavba klapkových uzávěrů
- oranžová – rozrážeče na konci skluzu
- hnědá – hydrostatický segment
- žlutá – vlnolam, rozrážeče [8]

Výrobní tolerance fyzikálního modelu VD Nechanice byla  $\pm 1$  mm – tj. ve skutečnosti  $\pm 50$  mm. [8]

#### 6.4 Měření veličin na fyzikálním modelu

Průtok byl měřen pomocí indukčního průtokoměru s přesností  $\pm 1$  % v rozsahu měřených průtoků od  $11,3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $75,2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na přesnou hodnotu průtoku bylo zapotřebí vyčkat vždy cca 20 minut, aby došlo k ustálení. [8]

Poloha hladiny v nádrži byla odečítána hrotovým měřítkem. Pro správné stanovení hladiny vody v nádrži bylo potřeba hodnotu odečítat několikrát, dokud nedošlo k ustálení hladiny. Doba ustálení závisela na typu výtoku nebo přepadu. V případě přepadu probíhalo ustálení hladiny rychleji, než v případě výtoku pod segmentem. [8]

Poloha hladiny ve skluzu byla měřena pomocí nalepených měřítok, které byly graficky upraveny v měřítku na základě sklonu břehu. [8]

#### 6.5 Program měření

Na základě studie použití vhodného uzávěru a měření provedených na Katedře hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze (M3-M6) bylo rozhodnuto o měření konzumční křivky návrhového stavu klapkových uzávěrů a zdvižného segmentu.

Prvně bylo uskutečněno měření pouze zdvižného segmentu. Jde o měření M9-M12. Následně byly odměřeny pouze klapkové uzávěry, kde se jednalo o měření M13-M17. Měření M15 bylo z měření vyřazeno, jelikož nebylo provedeno adekvátní těsnění klapkových uzávěrů.



	<b>popis měření</b>
Měření 3	stávající stav, s vlnolamem
Měření 4	stávající stav, bez vlnolamu
Měření 5	návrhový stav - duté jezové klapky, bez vlnolamu, přídavné zavzdušnění v drážce
Měření 6	návrhový stav - duté jezové klapky, s vlnolamem, přídavné zavzdušnění v drážce

*Obr. 6.1 - Přehled převzatých měření na fyzikálním modelu VD Nechanice Katedra hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze*

	<b>popis měření</b>
Měření 9	návrhový stav - s vlnolamem, segment vytažen na 1/4
Měření 10	návrhový stav - s vlnolamem, segment vytažen na 1/2
Měření 11	návrhový stav - s vlnolamem, segment vytažen na 3/4
Měření 12	návrhový stav - s vlnolamem, segment vytažen
Měření 13	návrhový stav - s vlnolamem, L+P klapka plně sklopená
Měření 14	návrhový stav - s vlnolamem, L+P klapka 3/4 sklopená
Měření 15	návrhový stav - s vlnolamem, L+P klapka 1/2 sklopená, netěsněno
Měření 16	návrhový stav - s vlnolamem, L+P klapka 1/2 sklopená
Měření 17	návrhový stav - s vlnolamem, L+P klapka 1/4 sklopená

*Obr. 6.2 - Přehled měření na fyzikálním modelu VD Nechanice*

## 7 VÝPOČET KONZUMČNÍ KŘIVKY VYBRANÝCH VARIANT

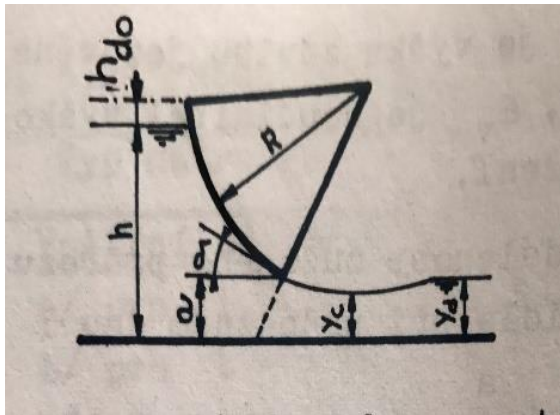
Na základě studie vhodného použití uzávěru na bezpečnostním přelivu VD Nechanice bylo rozhodnuto, že měřenou variantou bude varianta s klapkovými uzávěry na krajních polích bezpečnostního přelivu a zdvižným segmentovým uzávěrem ve středním poli bezpečnostního přelivu.

Výpočet konzumční křivky byl proveden na základě známé kóty hladiny v nádrži, výkresové dokumentace a volených součinitelů ze skript. Pomocí těchto podkladů byl ze známé hladiny dopočítán průtok. Jednotlivý postup výpočtu byl popsán v kapitolách 7.1 a 7.2.

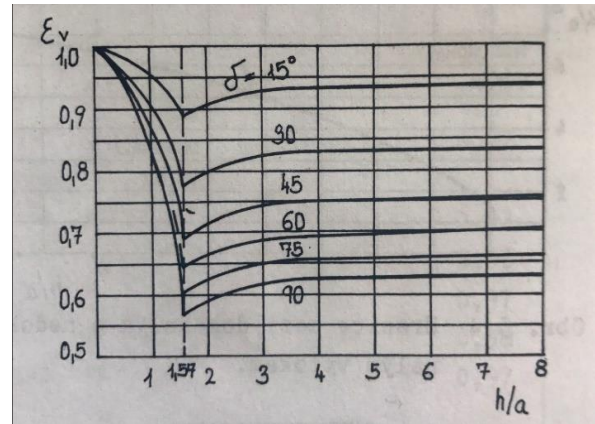
## 7.1 Segmentový uzávěr

Před samotným výpočtem byl potřeba vybrat správný přístup, jelikož při menších průtocích voda protéká pod uzávěrem, aniž by byla samotným uzávěrem ovlivněna. Tento stav byl počítán jako proudění přes širokou korunu. Pro vyšší průtoky toto tvrzení neplatí. Bylo vycházeno z toho, že s narůstajícím průtokem voda nestačí uzávěr podtékat a vznikne zde tlakové proudění. Po překročení kóty hladiny nad spodní hranu segmentového uzávěru byl výpočet uvažován jako výtok velkým otvorem. Viz. Výpočet měření M9 v kapitole 8.1.1.

Druhým možným výpočtem tlakového proudění výtoku pod zdvižným segmentem byl výpočet výtoku otvorem pod hradíci konstrukcemi viz. skriptu Hydraulika, Havlík, Marešová, kde bylo uvažováno zaoblení návodní strany segmentového uzávěru na základě úhlu  $\delta$ .



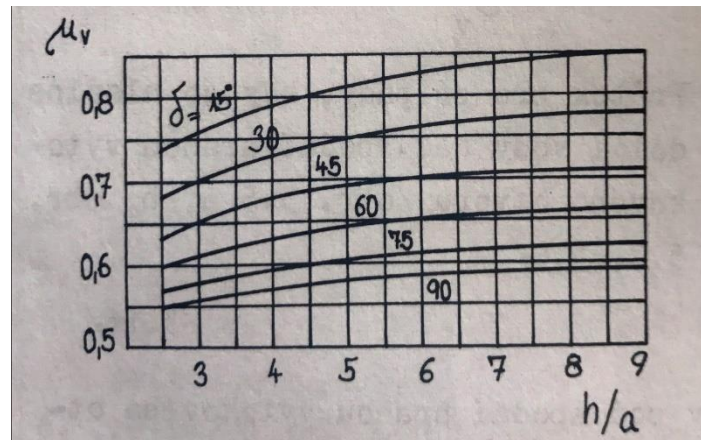
Obr. 7.1 - Výtok pod segmentem určení úhlu  $\delta$



Obr. 7.2 - Hodnoty  $\epsilon_v$  pro segment

Poměrem  $h/a$  a úhlu  $\delta$  bylo stanoveno  $\epsilon_v$  viz. Obr. 7.1, které bylo potřebné pro určení zúžené hloubky  $y_c$ , která byla později použita pro výpočet průtoku.

Součinitel přepadu  $\mu_v$ , byl zvolen podobně pomocí poměru  $h/a$  a známého úhlu  $\delta$  z Obr.7.2. [1]

Obr. 7.3 - Hodnoty  $\mu_v$  pro segment

$$q = \mu_v \cdot a \sqrt{2g \cdot (E_0 - y_c)} \quad [1]$$

Z důvodu atypických nátokových a dalších jiných vlivů nelze na VD Nechanice jednoznačně zvolit ideální postup výpočtu, který by spolehlivě popisoval reálný stav.

Pro výpočet konzumční křivky byl zvolen výpočet výtoku velkým otvorem, který je blíže popsán v kapitole 7.1.1.

### 7.1.1 Výpočet měření M9

Výpočet odpovídá stavu, kdy bylo uvažováno vyhrazení segmentového uzávěru v jedné čtvrtině hrazené výšky.

První část výpočtu konzumční křivky byla uvažována jako proudění přes širokou korunu. Výpočet byl proveden dle vzorce pro dokonalý přepad přes širokou korunu:

$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}}$ ; kde  $m$  – součinitel přepadu [-];  $b$  – šířka koruny [m];  $h_0$  – přepadová výška vody [m].

Součinitel přepadu  $m$  byl vybrán z tabulky součinitelů pro přepad přes širokou korunu, jako  $m = 0,36$  pro stav, kdy celá vstupní část prahu je dobře zaoblena. [1]

Druhá část výpočtu byla uvažována jako dokonalý ustálený výtok velkým otvorem ve stěně. *Výtok kapaliny z nádoby otvorem ve stěně je ustálený, když je vyteklé množství kapaliny stále doplňováno tak, že hladina v nádrži je stále na stejné úrovni. Podmínkou tedy je, že přítok  $Q_p$  se rovná odtoku  $Q$ .* [2]

„U velkého otvoru v šikmé stěně se nevystačí s průměrnou hodnotou rychlostí. Vyjde se z proudového vlákna mezi hladinou v nádobě a výtokovým otvorem v obecně proměnlivé hloubce  $z$  o ploše průřezu  $S$ .“ [2]

Bernoulliho rovnice při srovnávací rovině průřezu je

$$z + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}$$

$$z = \frac{v^2}{2g} (1 + \zeta); \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}$$

$$v = \varphi \sqrt{2g(z + h_{d0})}$$

$$dQ = v dS$$

$$Q = \mu_v \frac{b}{\sin \delta} \sqrt{2g} \int_{z_1}^{z_2} (z + h_{d0})^{\frac{1}{2}} dz$$

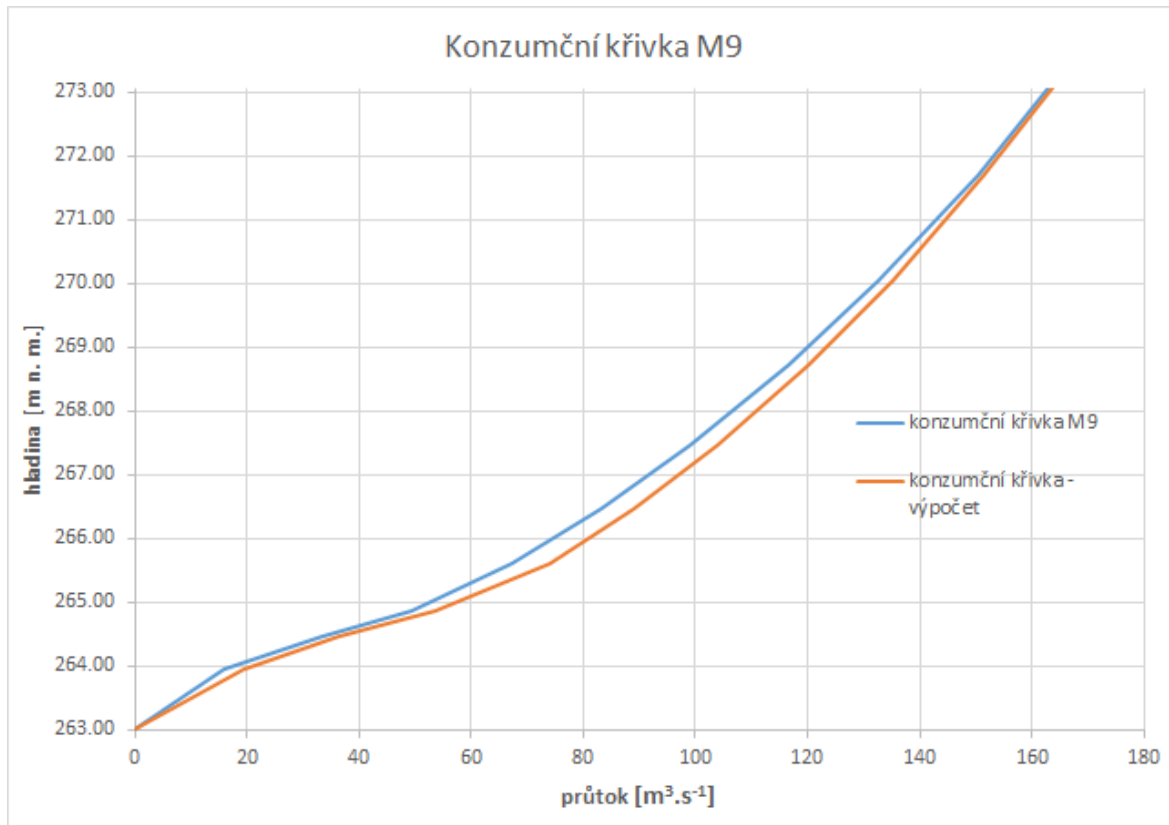
kde  $\mu_v$  je součinitel výtoku pro celý otvor,  $h_{d0}$  odpovídá průřezové rychlosti přítoku. Integrací dostaneme

$$Q = \frac{2}{3} \mu_v \frac{b}{\sin \delta} \sqrt{2g} [(z_2 + h_{d0})^{\frac{3}{2}} - (z_1 + h_{d0})^{\frac{3}{2}}]$$

když je stěna svislá ( $\sin \delta = 1$ )

Segmentový uzávěr výpočet měření M9																	
přístup k výpočtu	staničení [m]																
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[-]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%	
	h		m	b	v	$h_{d0}$	a	$z_1$	$z_2$	$u_v$	$Q_{výp.}$	$Q_{naměř.}$	rozdíl				
Přepad přes širokou korunu	13.2	0	<b>263.00</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>0</b>	0	0			
	32.3	0.96	<b>263.96</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>19.35</b>	15.91	3.44	-21.60		
	42.3	1.46	<b>264.46</b>	0.36	13	0.09	0.000					<b>36.40</b>	33.59	2.81	-8.37		
	50.8	1.88	<b>264.88</b>	0.36	13	0.13	0.001					<b>53.47</b>	49.50	3.97	-8.03		
Výtok velkým otvorem	65.3	2.61	<b>265.61</b>		13	0.14	0.001	1.325	1.28	2.61	0.7	<b>74.09</b>	67.18	6.91	-10.29		
	82.3	3.46	<b>266.46</b>		13	0.14	0.001	1.325	2.13	3.46	0.7	<b>89.05</b>	83.09	5.97	-7.18		
	102.4	4.46	<b>267.46</b>		13	0.13	0.001	1.325	3.14	4.46	0.7	<b>103.96</b>	98.99	4.96	-5.01		
	127.7	5.73	<b>268.73</b>		13	0.12	0.001	1.325	4.40	5.73	0.7	<b>120.09</b>	116.67	3.42	-2.93		
	154.2	7.05	<b>270.05</b>		13	0.11	0.001	1.325	5.73	7.05	0.7	<b>134.93</b>	132.58	2.34	-1.77		
	187.3	8.71	<b>271.71</b>		13	0.10	0.001	1.325	7.38	8.71	0.7	<b>151.42</b>	150.26	1.16	-0.77		
222	10.44	<b>273.44</b>		13	0.10	0.000	1.325	9.12	10.44	0.7	<b>166.97</b>	166.17	0.80	-0.48			

Obr. 7.4 - Výpočet konzumní křivky M9



Obr. 7.5 - Konzumční křivka M9

Hodnoty naměřené na fyzikálním modelu jsou přibližně o 8 % nižší, než hodnoty stanovené výpočtem. Jako výchozí hodnoty byly uvažovány naměřené hodnoty na fyzikálního modelu.

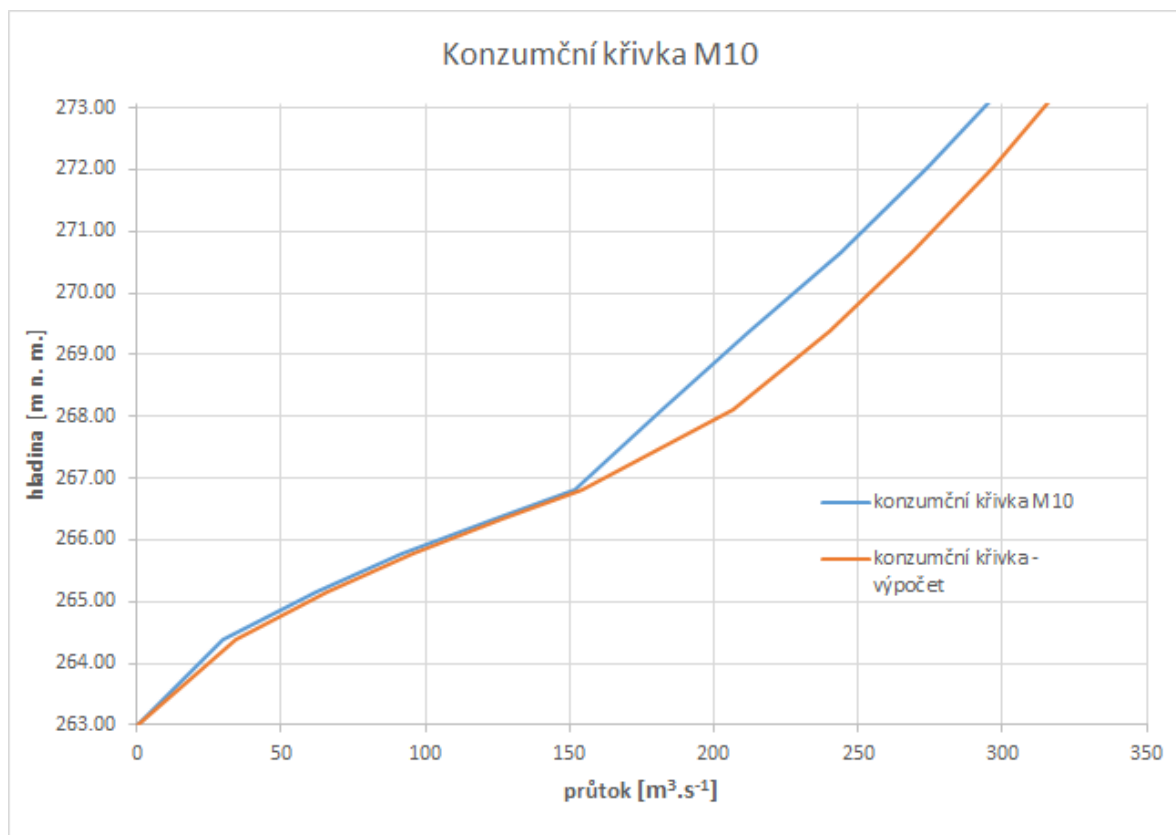
### 7.1.2 Výpočet měření M10

Výpočet odpovídá stavu, kdy bylo uvažováno vyhrazení segmentového uzávěru v jedné polovině hrazené výšky.

Výpočet konzumční křivky M10 byl uvažován stejným postupem jako v předchozím případě výpočet M9. Rozdíl zde nastal pouze v průtočné ploše, jelikož byl zdvižný segmentový uzávěr vyhrazen na polovinu hrazené výšky, a tím byl rozšířen soubor dat počítaných jako přepad přes širokou korunu.

Segmentový uzávěr výpočet měření M10															
přístup k výpočtu	staničení [m]			[-]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	nádrž	h	[m n. m.]												
Přepad přes širokou korunu	13.2	0	<b>263.00</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>0</b>	0	0	
	41.2	1.40	<b>264.40</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>34.34</b>	30.05	4.29	-14.27
	56.4	2.16	<b>265.16</b>	0.36	13	0.11	0.001					<b>65.83</b>	61.87	3.96	- 6.40
	68.6	2.77	<b>265.77</b>	0.36	13	0.16	0.001					<b>95.63</b>	91.92	3.71	- 4.04
	80	3.34	<b>266.34</b>	0.36	13	0.19	0.002					<b>126.64</b>	123.74	2.90	- 2.34
	89.4	3.81	<b>266.81</b>	0.36	13	0.22	0.003					<b>154.32</b>	152.03	2.29	- 1.50
Výtok velkým otvorem	115.5	5.12	<b>268.12</b>		13	0.20	0.002	2.65	2.47	5.12	0.7	<b>206.92</b>	182.08	24.84	-13.64
	141	6.39	<b>269.39</b>		13	0.22	0.002	2.65	3.74	6.39	0.7	<b>239.76</b>	212.13	27.63	-13.02
	166.3	7.66	<b>270.66</b>		13	0.21	0.002	2.65	5.01	7.66	0.7	<b>268.30</b>	243.95	24.34	- 9.98
	194.2	9.05	<b>272.05</b>		13	0.20	0.002	2.65	6.40	9.05	0.7	<b>296.56</b>	274.00	22.55	- 8.23
	224.5	10.57	<b>273.57</b>		13	0.19	0.002	2.65	7.92	10.57	0.7	<b>324.45</b>	305.12	19.33	- 6.33

Obr. 7.6 - Výpočet konzumní křivky M10



Obr. 7.7 - Konzumní křivka M10

Naměřené hodnoty konzumní křivky M10 se od hodnoty průtoku 150 m<sup>3</sup>/s značně liší od výpočtu. Tento jev, kdy výpočet je přibližně o 9 % kapacitnější, nastává pouze v oblasti výpočtu výtoku velkým otvorem, což může být způsobeno nátokovými podmínkami a tvarem pilířů.

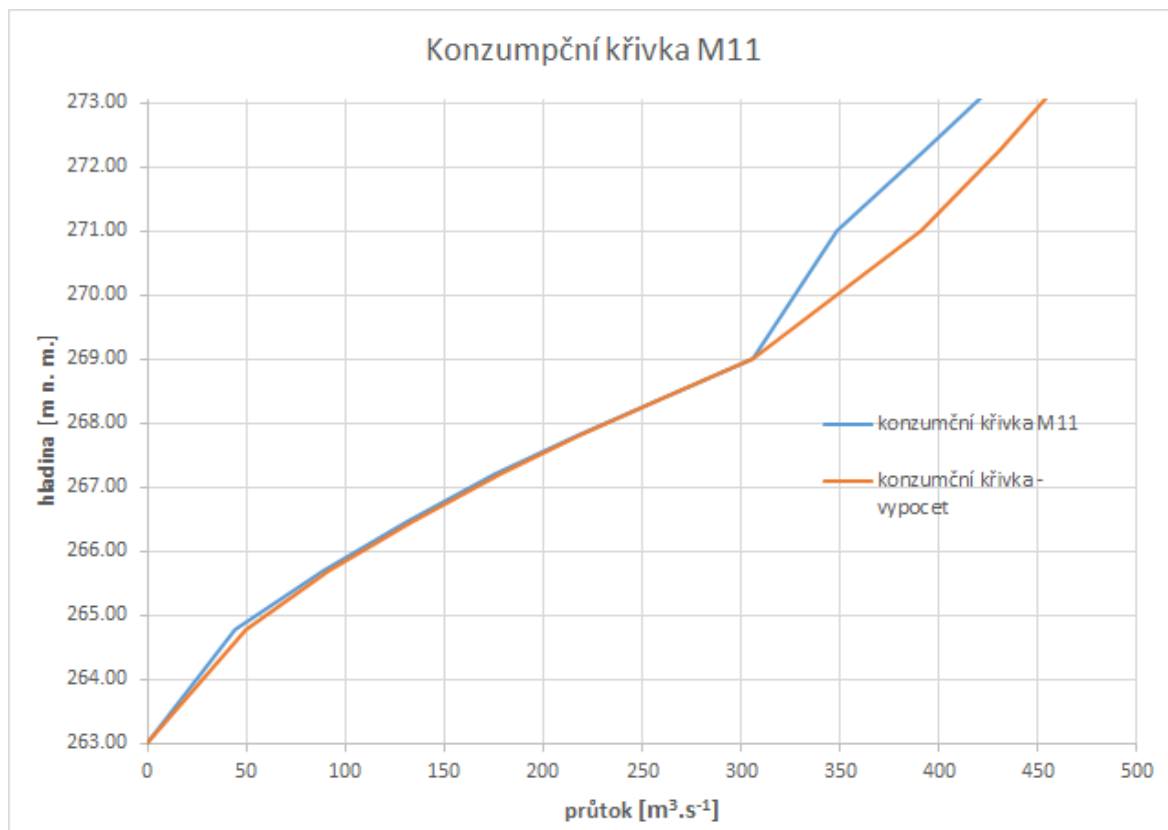
### 7.1.3 Výpočet měření M11

Výpočet konzumční křivky M11, byl uvažován stejným postupem jako v případě výpočtu M9. Rozdíl zde nastal pouze v průtočné ploše, jelikož byl zdvižný segmentový uzávěr vyhrazen na  $\frac{3}{4}$  hrazené výšky, a tím byl rozšířen soubor dat počítaných jako přepad přes širokou korunu.

Segmentový uzávěr výpočet měření M11															
přístup k výpočtu	staničení [m]			[-]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	nádrž	h	[m n. m.]												
				m	b	v	h <sub>00</sub>	a	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	u <sub>v</sub>	Q <sub>vyp.</sub>	Q <sub>naměř.</sub>	rozdíl	
Přepad přes širokou korunu	13.2	0	<b>263.00</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>0</b>	0	0	
	48.8	1.78	<b>264.78</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>49.23</b>	44.19	5.04	-11.39
	67	2.69	<b>265.69</b>	0.36	13	0.12	0.001					<b>91.50</b>	88.39	3.11	- 3.52
	82.5	3.47	<b>266.47</b>	0.36	13	0.18	0.002					<b>133.80</b>	130.81	2.98	- 2.28
	97.2	4.20	<b>267.20</b>	0.36	13	0.21	0.002					<b>178.58</b>	175.01	3.57	- 2.04
	109	4.79	<b>267.79</b>	0.36	13	0.25	0.003					<b>217.53</b>	217.44	0.10	- 0.05
Výtok velkým otvorem	121.5	5.42	<b>268.42</b>	0.36	13	0.27	0.004					<b>261.48</b>	261.63	-0.15	0.06
	133.3	6.01	<b>269.01</b>	0.36	13	0.29	0.004					<b>305.37</b>	305.82	-0.45	0.15
	173.3	8.01	<b>271.01</b>		13	0.25	0.003	3.975	4.03	8.01	0.7	<b>391.32</b>	348.25	43.07	-12.37
	198.5	9.27	<b>272.27</b>		13	0.28	0.004	3.975	5.29	9.27	0.7	<b>430.99</b>	392.44	38.55	- 9.82
	223.5	10.52	<b>273.52</b>		13	0.27	0.004	3.975	6.54	10.52	0.7	<b>466.92</b>	435.75	31.17	- 7.15

Obr. 7.8 Výpočet konzumční křivky M11

Ve výpočtu konzumční křivky M11 bylo obdobně dosaženo podobného jevu, kdy výpočet byl oproti naměřeným hodnotám na fyzikálním modelu kapacitnější, než naměřené hodnoty. Tento jev byl dosažen opět v oblasti výpočtu, kdy bylo počítáno dle vzorců pro výtok velkým otvorem. Tato odchylka výpočtu od naměřených hodnot v řádech 9 % byla vysvětlena vlivem nátokových podmínek. Právě pro tyto případy, kdy nelze přesně vzorci vystihnout a popsat tvar, nátokové podmínky a další aspekty ovlivňující kapacitu zvolené konstrukce, bylo zapotřebí přistoupit na stavbu fyzikálního modelu.



Obr. 7.9 Konzumční křivka M11

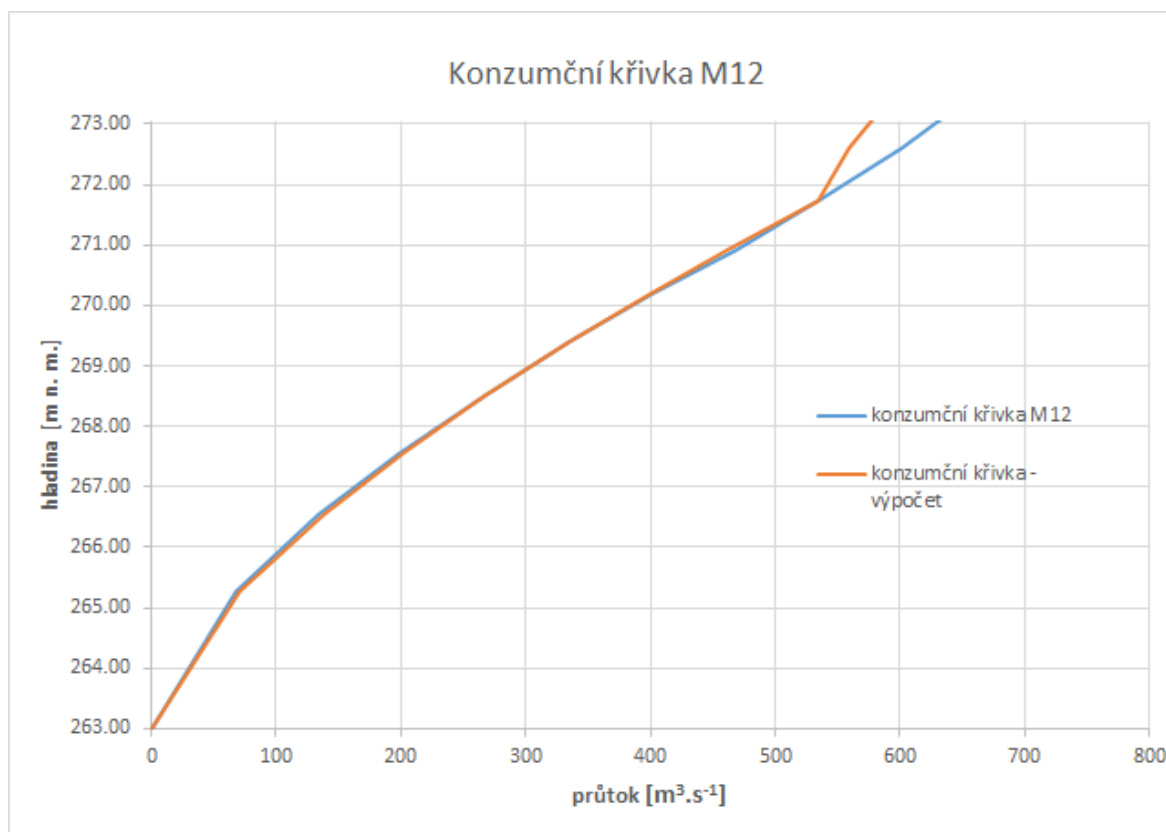
#### 7.1.4 Výpočet měření M12

Výpočet konzumční křivky M12, byl uvažován stejným postupem jako v případě výpočtu M9. Rozdíl zde nastal pouze v průtočné ploše, jelikož byl zdvižný segmentový uzávěr vyhrazen na polovinu hrazené výšky, a tím byl rozšířen soubor dat počítaných jako přepad přes širokou korunu.

Segmentový uzávěr výpočet měření M12															
přístup k výpočtu	staničení [m]			[-]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m³.s⁻¹]	[m³.s⁻¹]	[-]	%
	nádrž	h	[m n. m.]												
	m			m	b	v	h <sub>g0</sub>	a	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	u <sub>v</sub>	Q <sub>vyp.</sub>	Q <sub>naměr.</sub>	rozdíl	
Přepad přes širokou korunu	13.2	0	<b>263.00</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>0</b>	0	0	
	58.5	2.27	<b>265.27</b>	0.36	13	0.00	0.000					<b>70.66</b>	67.18	3.49	- 5.19
	83.9	3.54	<b>266.54</b>	0.36	13	0.13	0.001					<b>137.83</b>	134.35	3.48	- 2.59
	104.3	4.56	<b>267.56</b>	0.36	13	0.20	0.002					<b>201.66</b>	199.76	1.90	- 0.95
	123	5.49	<b>268.50</b>	0.36	13	0.24	0.003					<b>266.88</b>	266.93	-0.05	0.02
	141	6.39	<b>269.40</b>	0.36	13	0.28	0.004					<b>335.16</b>	335.88	-0.72	0.21
	156.9	7.19	<b>270.19</b>	0.36	13	0.31	0.005					<b>399.65</b>	401.28	-1.63	0.41
	171.4	7.91	<b>270.92</b>	0.36	13	0.34	0.006					<b>461.67</b>	468.46	-6.78	1.45
187.5	8.72	<b>271.72</b>	0.36	13	0.35	0.006					<b>533.91</b>	533.87	0.05	- 0.01	
Výtok velkým otvorem	204.9	9.59	<b>272.59</b>		13	0.37	0.007	5.3	4.29	9.59	0.7	<b>559.36</b>	601.04	-41.68	6.94
	225.5	10.62	<b>273.62</b>		13	0.35	0.006	5.3	5.32	10.62	0.7	<b>600.32</b>	668.22	-67.90	10.16

Obr. 7.10 - Výpočet konzumční křivky M12





Obr. 7.11 - Konzumční křivka M12

Ve výpočtu konzumční křivky M12 bylo zajímavé, že na rozdíl od předešlých výpočtů M9 – M11, byl spočten průtok méně kapacitní, než naměřené hodnoty, což bylo přesně naopak než v předešlých měřeních, kdy výpočet vycházel kapacitnější, než naměřené hodnoty.

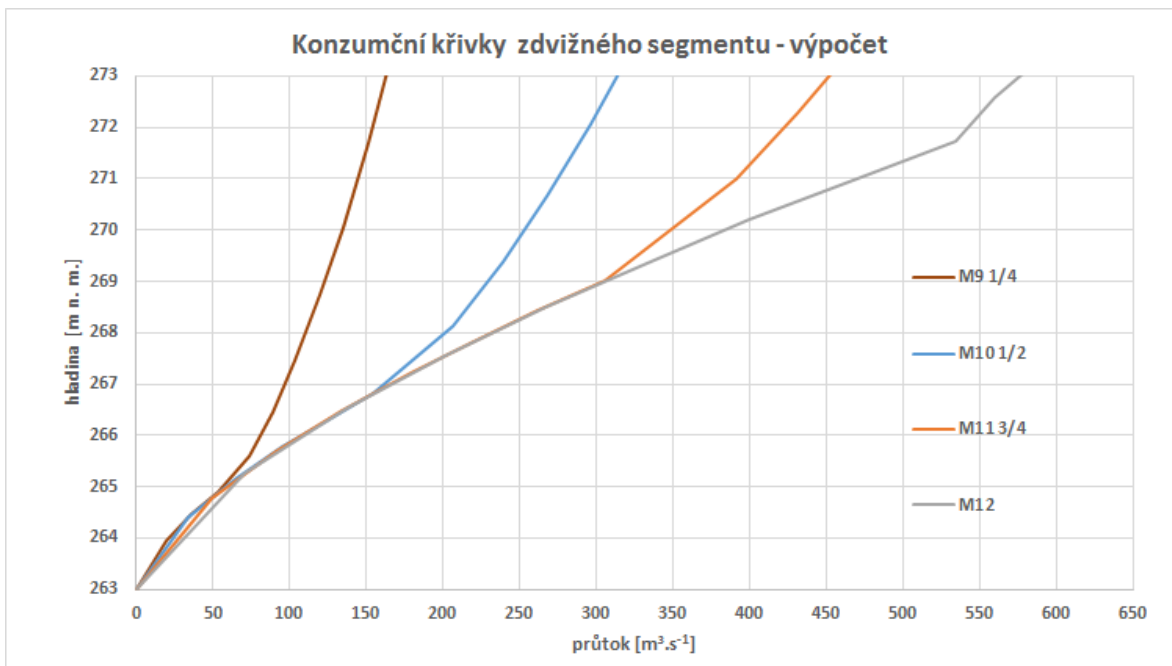
### 7.1.5 Závěr a rekapitulace výpočtu konzumčních křivek segmentového uzávěru

Závěrem je nutno podotknout, že výsledky výpočtů pomocí vzorců a součinitelů jsou stále v dnešní době často odlišné od hodnot naměřených na fyzikálních nebo matematických modelech. Konstrukce vodních děl bývají často velmi specifické svým tvarem a podmínkami, tudíž je velmi obtížné spolehlivě a zároveň obecně popsat probíhající jevy tak, aby byly výsledky dostatečně přesné.

Pro přesné stanovení konzumční křivky bylo nutné sestavit fyzikální model v odpovídajícím měřítku a hodnoty naměřit. Další z možností ověření výpočtu byl matematický model, který je ovšem také vhodné ověřit a porovnat s modelem fyzikálním. Matematické modelování bylo provedeno na Katedře hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. Výsledky matematického modelu byly velmi blízké modelovému stavu. Blíže o matematickém modelování bylo pojednáno ve zprávě o provedeném výzkumu. [8]

segment 1/4 vytažen		segment 1/2 vytažen		segment 3/4 vytažen		segment úplně vytažen	
M9		M10		M11		M12	
0.00	263.00	0.00	263.00	0.00	263.00	0.00	263.00
19.35	263.96	34.34	264.40	49.23	264.78	70.66	265.27
36.40	264.46	65.83	265.16	91.50	265.69	137.83	266.54
53.47	264.88	95.63	265.77	133.80	266.47	201.66	267.56
74.09	265.61	126.64	266.34	178.58	267.20	266.88	268.50
89.05	266.46	154.32	266.81	217.53	267.79	335.16	269.40
103.96	267.46	206.92	268.12	261.48	268.42	399.65	270.19
120.09	268.73	239.76	269.39	305.37	269.01	461.67	270.92
134.93	270.05	268.30	270.66	391.32	271.01	533.91	271.72
151.42	271.71	296.56	272.05	430.99	272.27	559.36	272.59
166.97	273.44	324.45	273.57	466.92	273.52	600.32	273.62

Obr. 7.12 - Rekapitulace výpočtů konzumních křivek segmentového zdvižného uzávěru



Obr. 7.13 - Konzumní křivky zdvižného segmentu v různých polohách - výpočet

## 7.2 Klapkový uzávěr

Na výpočet konzumní křivky klapkového uzávěru bylo nahlíženo dvěma přístupy. Důvodem bylo vzájemné porovnání výsledků, jelikož v současné době neexistuje ideální spolehlivý výpočetní postup, který by popisoval přepad vody přes klapkový uzávěr umístěný na Jamborově prahu.

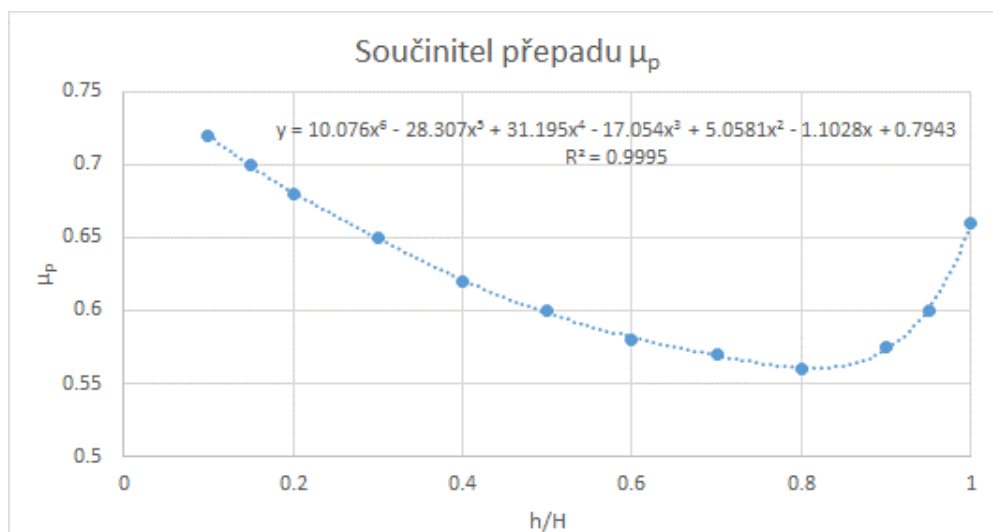
Prvním postupem výpočtu byl vzorec pro přepad přes ostrou hranu ve tvaru

$$Q = m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}}; \text{ kde } m - \text{ součinitel přepadu } [-]; b_0 - \text{ účinná šířka koruny } [m];$$

$h_0$  – přepadová výška vody (včetně rychlostní výšky) [m]. Pro účinnou šířku přelivu platí  $b_0 = b - 0,1 \cdot \xi \cdot n \cdot h_0$ ; kde  $b$  – součet světlostí jednotlivých polí přelivu [m];  $\xi$  – součinitel tvaru pilířů;  $n$  – počet míst zúžení (2 pro každé pole);  $h_0$  – energetická výška přepadu  $h_0 = h + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$ . [1] Výpočet jednotlivých poloh uzávěru byl ovlivněn součinitelem přepadu  $m$ , který je závislý na tvaru přelivného tělesa. O jednotlivých součinitelích bylo podrobněji pojednáno v následujících kapitolách.

Základem pro druhý přístup výpočtu byl vzorec ve tvaru  $Q = \frac{2}{3} \cdot \mu_p \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}}$ ; kde  $\mu_p$  – součinitel přepadu [-];  $b_0$  – šířka koruny [m];  $h$  – přepadová výška vody (bez vlivu rychlostní výšky). Pro účinnou šířku přepadu přes pohyblivý jez

$b_0 = \sum b_1 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k)h_0$ ; kde  $b_1$  – je navržená šířka jezového pole;  $n$  – počet kontrakcí návodních pilířů (každý pilíř 2);  $\varepsilon_p$  – tvarový součinitel návodního pilíře;  $\varepsilon_k$  – tvarový součinitel bočních křídel břehového pilíře;  $h_0$  – výška přepadového paprsku. [3] Součinitel přepadu  $\mu_p$  pro typovou klapku byl zvolen dle Obr. 7.14.



Obr. 7.14 - Součinitel přepadu pro typovou klapku

Graf byl vytvořen na základě grafického zpracování viz. skriptu Hydrotechnické stavby 1, Doc Medřický.

Spodní stavba obou krajních klapkových uzávěru byla uvažována jako Jamborův práh.

Výpočet byl proveden pro stejné sklopení obou klapkových uzávěrů. Výsledná konzumní křivka je tedy platná pro oba klapkové uzávěry v souběhu.

### 7.2.1 Výpočet měření M13

První počítaný stav byl pro manipulaci úplného sklopení klapkového uzávěru. Na výpočet tohoto stavu bylo nahlíženo jako přepad přes Jamborův práh.

*„Jamborův práh je nízký práh se zaoblenou korunou, který způsobí malé vzdutí a používá se u pohyblivých jezů jako spodní stavba, čímž se zmenšuje výška hradící konstrukce.“*

[1]

Klapkový uzávěr výpočet měření M13													
přístup k výpočtu	staničení [m]			[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	nádrž	[m]	[m n. m.]										
	h		m	b	b <sub>0</sub>	v	h <sub>d0</sub>	Q <sub>vyp.</sub>	Q <sub>naměř.</sub>	rozdíl			
Přepad přes Jamborův práh	13.2	0	<b>267.85</b>	0.46	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	0	
	142.3	1.61	<b>269.46</b>	0.46	30	29.68	0.00	0.00	<b>123.02</b>	93.69	29.32	-31.30	
	158.3	2.41	<b>270.26</b>	0.46	30	29.52	0.34	0.01	<b>225.35</b>	185.62	39.74	-21.41	
	172.4	3.11	<b>270.96</b>	0.46	30	29.38	0.48	0.01	<b>330.59</b>	279.31	51.28	-18.36	
	184.4	3.71	<b>271.56</b>	0.46	30	29.25	0.59	0.02	<b>429.77</b>	371.23	58.54	-15.77	
	195.7	4.28	<b>272.13</b>	0.46	30	29.14	0.67	0.02	<b>530.09</b>	464.92	65.17	-14.02	
	205.8	4.79	<b>272.64</b>	0.46	30	29.04	0.74	0.03	<b>625.18</b>	558.61	66.57	-11.92	
	215.5	5.27	<b>273.12</b>	0.46	30	28.94	0.79	0.03	<b>720.71</b>	650.54	70.17	-10.79	
	224.1	5.71	<b>273.56</b>	0.46	30	28.85	0.84	0.04	<b>808.93</b>	742.46	66.47	- 8.95	
	232.9	6.15	<b>274.00</b>	0.46	30	28.76	0.88	0.04	<b>901.97</b>	836.15	65.81	- 7.87	
	241.1	6.56	<b>274.41</b>	0.46	30	28.68	0.92	0.04	<b>991.47</b>	929.85	61.63	- 6.63	

Obr. 7.15 - Výpočet konzumní křivky M13 – výpočet I

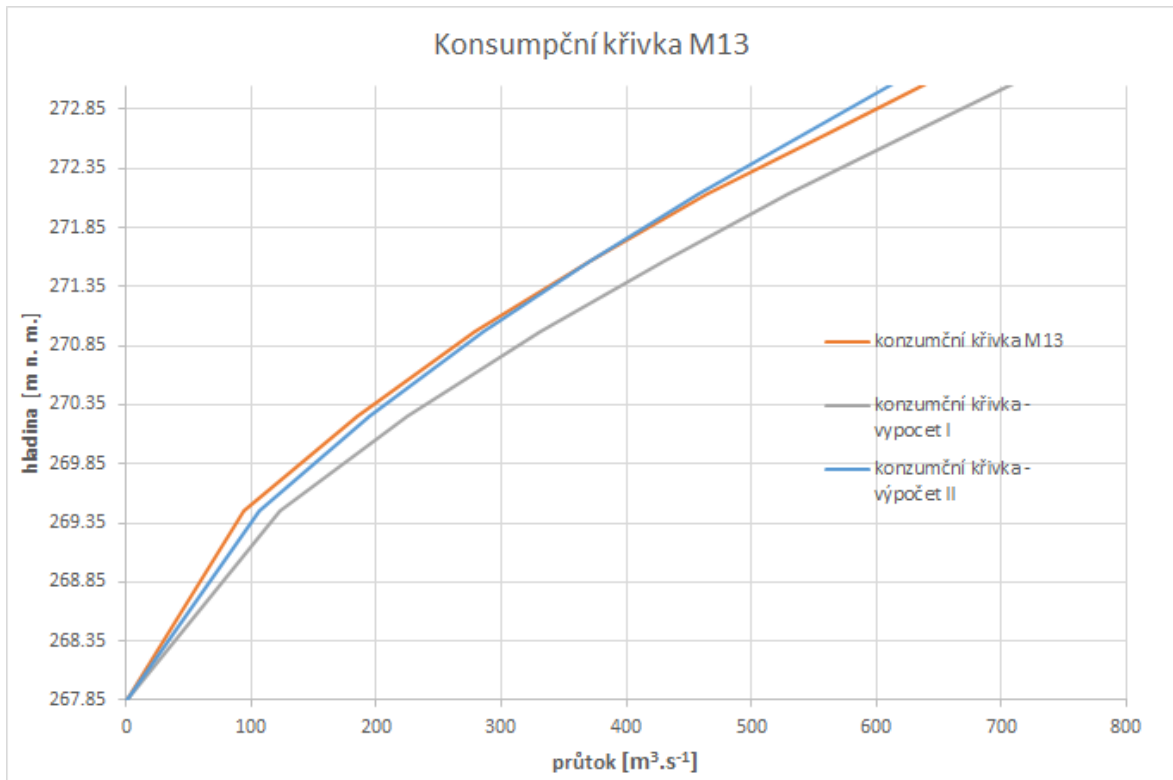
Na základě tvaru Jamborova prahu byl zvolen pro výpočet I součinitel přepadu  $m = 0,46$ .

Klapkový uzávěr výpočet měření M13														
přístup k výpočtu	staničení [m]			[m]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	nádrž	[m]	[m n. m.]											
	h		H	h/H	μ <sub>p</sub>	b	b <sub>0</sub>	v	h <sub>d0</sub>	Q <sub>vyp.</sub>	Q <sub>naměř.</sub>	rozdíl		
Přepad vody přes typovou klapku	13.2	0	<b>267.85</b>	0	0	0.79	30	30.00	0	0	<b>0</b>	0	0	0
	142.3	1.61	<b>269.46</b>	3.21	0.50	0.60	30	29.73	0.00	0.00	<b>106.82</b>	93.69	13.13	-14.02
	158.3	2.41	<b>270.26</b>	4.81	0.50	0.60	30	29.59	0.30	0.00	<b>195.14</b>	185.62	9.52	- 5.13
	172.4	3.11	<b>270.96</b>	6.23	0.50	0.60	30	29.47	0.42	0.01	<b>285.91</b>	279.31	6.60	- 2.36
	184.4	3.71	<b>271.56</b>	7.43	0.50	0.60	30	29.37	0.51	0.01	<b>371.36</b>	371.23	0.13	- 0.04
	195.7	4.28	<b>272.13</b>	8.56	0.50	0.60	30	29.27	0.58	0.02	<b>458.00</b>	464.92	-6.92	1.49
	205.8	4.79	<b>272.64</b>	9.58	0.50	0.60	30	29.19	0.64	0.02	<b>540.09</b>	558.61	-18.53	3.32
	215.5	5.27	<b>273.12</b>	10.55	0.50	0.60	30	29.10	0.68	0.02	<b>622.74</b>	650.54	-27.80	4.27
	224.1	5.71	<b>273.56</b>	11.41	0.50	0.60	30	29.03	0.73	0.03	<b>699.00</b>	742.46	-43.46	5.85
	232.9	6.15	<b>274.00</b>	12.30	0.50	0.60	30	28.95	0.76	0.03	<b>779.73</b>	836.15	-56.42	6.75
	241.1	6.56	<b>274.41</b>	13.12	0.50	0.60	30	28.88	0.79	0.03	<b>857.32</b>	929.85	-72.53	7.80

Obr. 7.16 - Výpočet konzumní křivky M13 – výpočet II

Součinitel přepadu pro výpočet II byl použit z rovnice na Obr.7.14, kde dosazením poměru  $h/H$  za neznámou  $x$  byl získán součinitel  $\mu_p$ .

Zúžená šířka přepadu  $b_0$  byla vypočtena dle vzorce  $b_0 = \sum b_1 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k)h_0$ ; kde byla vybrána hodnota tvarového součinitele návodního pilíře  $\varepsilon_p = 0,045$  a hodnota tvarového součinitele bočních křídel břehových pilířů  $\varepsilon_k = 0,04$ . Hodnoty tvarových součinitelů byly dle tvaru pilířů vybrány ze skript Hydrotechnické stavby 1, Doc Medřický. [3]



Obr. 7.17 - Konzumní křivka M13

Z Obr. 7.17 je jednoznačně vidět, že pro plně sklopené klapkové uzávěry bylo vhodnější použít postup výpočtu II. Tento postup výpočtu II se liší přibližně o 5 % od naměřených hodnot na fyzikálním modelu. Výpočet I se liší přibližně až o 12 % a navíc je výsledný průtok velmi nadhodnocen.

### 7.2.2 Výpočet měření M14

Výpočet měření M14 odpovídá stavu, kdy byl klapkový uzávěr vyhrazen do  $\frac{1}{4}$  hrazené výšky. Horní hrana uzávěru byla uvažována na úrovni 269,10 m n. m.

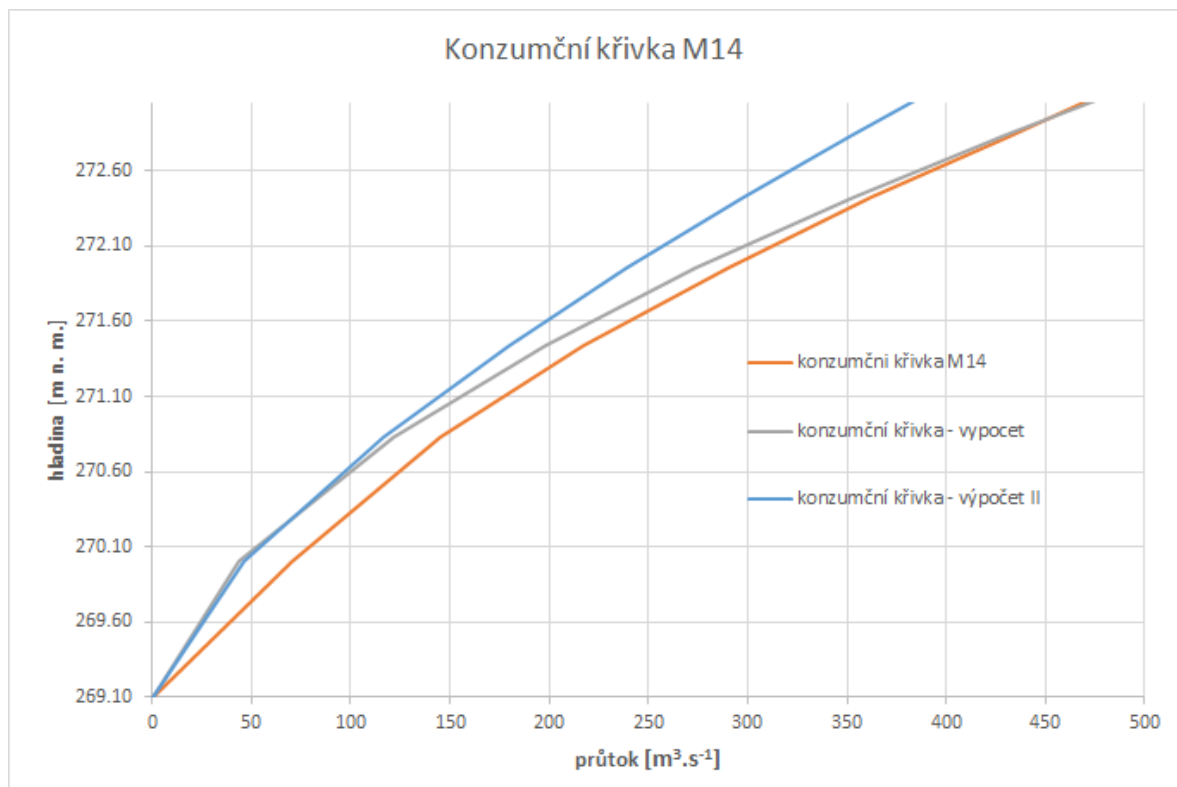
Rebhok uvádí součinitel přepadu pro polokruhový přeliv

$\mu_p = 0,55 + 0,22 \frac{h}{s}$ ,  $m = \frac{2}{3} \mu_p$ ; kde h – přepadová výška paprsku, s – výška od dna k přepadové hraně. [1]

Klapkový uzávěr výpočet měření M14														
přístup k výpočtu	staničení [m]													
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[m]		[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	h		H	h/H	$\mu_p$	b	b <sub>0</sub>	v	h <sub>d0</sub>	Q <sub>vyp.</sub>	Q <sub>naměř.</sub>	rozdíl		
Přepad vody přes typovou klapku	13.2	0	<b>269.10</b>	1.25	0.00	0.79	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	0
	153.2	0.90	<b>270.00</b>	2.15	0.42	0.62	30	29.82	0.00	0.00	<b>46.35</b>	70.71	-24.36	34.45
	169.8	1.73	<b>270.83</b>	2.98	0.58	0.58	30	29.65	0.18	0.00	<b>116.54</b>	144.96	-28.42	19.60
	182	2.34	<b>271.44</b>	3.59	0.65	0.57	30	29.53	0.33	0.01	<b>179.60</b>	217.44	-37.84	17.40
	192.2	2.85	<b>271.95</b>	4.10	0.70	0.57	30	29.43	0.42	0.01	<b>238.46</b>	289.91	-51.46	17.75
	201.7	3.33	<b>272.43</b>	4.58	0.73	0.57	30	29.33	0.48	0.01	<b>297.77</b>	362.39	-64.62	17.83
	210	3.74	<b>272.84</b>	4.99	0.75	0.56	30	29.25	0.53	0.01	<b>352.93</b>	433.10	-80.17	18.51
	218.5	4.17	<b>273.27</b>	5.42	0.77	0.56	30	29.16	0.56	0.02	<b>412.48</b>	505.58	-93.11	18.42
	226.5	4.57	<b>273.67</b>	5.82	0.79	0.56	30	29.08	0.60	0.02	<b>471.26</b>	578.06	-106.80	18.48
	242.6	5.38	<b>274.48</b>	6.63	0.81	0.56	30	28.92	0.58	0.02	<b>597.12</b>	685.89	-88.78	12.94
	245.4	5.52	<b>274.62</b>	6.77	0.82	0.56	30	28.89	0.72	0.03	<b>620.05</b>	723.02	-102.97	14.24

Obr. 7.18 - Výpočet konzumní křivky M14 – výpočet II

Součinitel přepadu pro výpočet II byl použit z rovnice v Obr.7.14, kde dosazením poměru h/H za x byl získán součinitel  $\mu_p$ .



Obr. 7.19 - Konzumní křivka M14

Zúžená přepadová šířka  $b_0$  byla vypočtena dle vzorce  $b_0 = \sum b_1 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k)h_0$ ; kde byla vybrána hodnota tvarového součinitele návodního pilíře  $\varepsilon_p = 0,045$  a hodnota tvarového součinitele bočních křídel břehových pilířů  $\varepsilon_k = 0,04$ . Hodnoty tvarových součinitelů byly dle tvaru pilířů vybrány ze skript Hydrotechnické stavby 1, Doc Medřický. [3]

Pro stav, kdy jsou klapkové uzávěry vytaženy v  $\frac{1}{4}$  na kótě 269,1 m n. m. se jeví jako lepší varianta použít postup výpočtu I, jelikož se konzumní křivka s rostoucím průtokem přibližuje konzumní křivce naměřené na fyzikálním modelu. Naopak konzumní křivka výpočtu II se čím dál více rozchází.

### 7.2.3 Výpočet měření M16

Výpočet měření M16 odpovídá stavu, kdy byl klapkový uzávěr vyhrazen do  $\frac{1}{2}$  hrazené výšky. Horní hrana uzávěru byla uvažována na úrovni 270,35 m n. m.

Rebhok uvádí součinitel přepadu pro polokruhový přeliv

$\mu_p = 0,55 + 0,22 \frac{h}{s}$ ,  $m = \frac{2}{3} \mu_p$ ; kde  $h$  – přepadová výška paprsku,  $s$  – výška od dna k přepadové hraně. [1]

Klapkový uzávěr výpočet měření M16													
přístup k výpočtu	staničení [m]												
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	h		s	$\mu_p$	b	$b_0$	v	$h_{d0}$	$Q_{výp.}$	$Q_{naměř.}$	rozdíl		
Přepad přes polokruhový přeliv	13.2	0	<b>270.35</b>	7.5	0.00	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	0
	179.4	0.96	<b>271.31</b>	7.5	0.58	30	29.81	0.00	0.00	<b>47.87</b>	37.12	10.75	-28.95
	188.4	1.41	<b>271.76</b>	7.5	0.59	30	29.72	0.23	0.00	<b>87.14</b>	76.01	11.13	-14.64
	195.8	1.78	<b>272.13</b>	7.5	0.60	30	29.64	0.33	0.01	<b>125.80</b>	114.90	10.90	- 9.48
	202	2.09	<b>272.44</b>	7.5	0.61	30	29.58	0.40	0.01	<b>162.36</b>	152.03	10.33	- 6.80
	207.8	2.38	<b>272.73</b>	7.5	0.62	30	29.52	0.45	0.01	<b>199.83</b>	190.92	8.91	- 4.67
	213.3	2.66	<b>273.01</b>	7.5	0.63	30	29.47	0.50	0.01	<b>238.23</b>	228.04	10.19	- 4.47
	218.3	2.91	<b>273.26</b>	7.5	0.64	30	29.42	0.55	0.02	<b>275.58</b>	265.17	10.41	- 3.93
	223.2	3.15	<b>273.50</b>	7.5	0.64	30	29.37	0.58	0.02	<b>314.32</b>	304.06	10.27	- 3.38
	227.6	3.37	<b>273.72</b>	7.5	0.65	30	29.32	0.62	0.02	<b>351.01</b>	341.18	9.83	- 2.88
	232.2	3.60	<b>273.95</b>	7.5	0.66	30	29.28	0.65	0.02	<b>391.09</b>	380.07	11.02	- 2.90

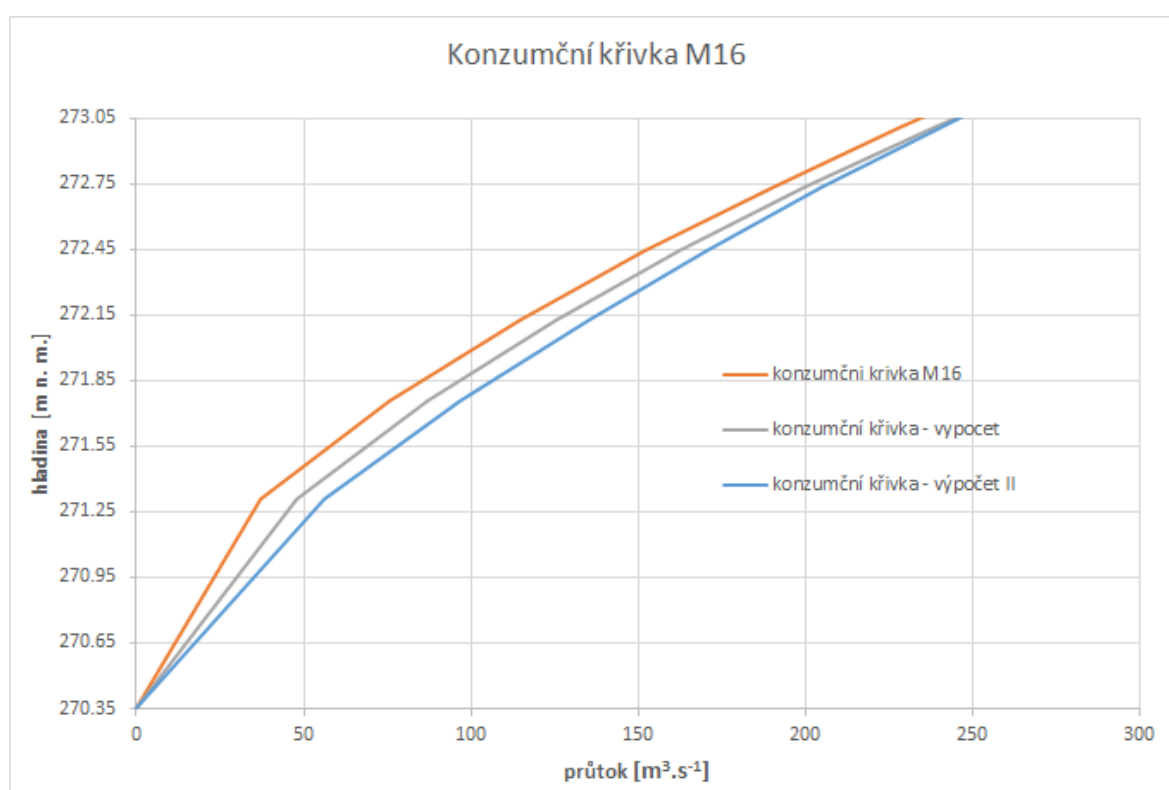
Obr. 7.20 - Výpočet konzumní křivky M16 – výpočet I

Součinitel přepadu pro výpočet II byl použit z rovnice v Obr. 7.14, kde dosazením poměru  $h/H$  za  $x$  byl získán součinitel  $\mu_p$ .

Zúžená přepadová šířka  $b_0$  byla vypočtena dle vzorce  $b_0 = \sum b_1 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k)h_0$ ; kde byla vybrána hodnota tvarového součinitele návodního pilíře  $\varepsilon_p = 0,045$  a hodnota tvarového součinitele bočních křídel břehových pilířů  $\varepsilon_k = 0,04$ . Hodnoty tvarových součinitelů byly dle tvaru pilířů vybrány ze skrip Hydrotechnické stavby 1, Doc Medřický. [3]

Klapkový uzávěr výpočet měření M16														
přístup k výpočtu	staničení [m]													
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[m]		[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[-]	%
	h		H	h/H	$\mu_p$	b	$b_0$	v	$h_{a0}$	$Q_{výp.}$	$Q_{naměř.}$	rozdíl		
Přepad vody přes typovou klapku	13.2	0	<b>270.35</b>	2.50	0.00	0.79	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	0
	179.4	0.96	<b>271.31</b>	4.42	0.22	0.68	30	29.81	0.00	0.00	<b>55.93</b>	37.12	18.80	-50.65
	188.4	1.41	<b>271.76</b>	5.32	0.27	0.66	30	29.72	0.26	0.00	<b>97.02</b>	76.01	21.01	-27.63
	195.8	1.78	<b>272.13</b>	6.06	0.29	0.65	30	29.64	0.36	0.01	<b>135.44</b>	114.90	20.54	-17.88
	202	2.09	<b>272.44</b>	6.68	0.31	0.65	30	29.58	0.43	0.01	<b>170.46</b>	152.03	18.43	-12.12
	207.8	2.38	<b>272.73</b>	7.26	0.33	0.64	30	29.52	0.48	0.01	<b>205.33</b>	190.92	14.41	- 7.55
	213.3	2.66	<b>273.01</b>	7.81	0.34	0.64	30	29.47	0.52	0.01	<b>240.17</b>	228.04	12.12	- 5.32
	218.3	2.91	<b>273.26</b>	8.31	0.35	0.63	30	29.42	0.55	0.02	<b>273.24</b>	265.17	8.08	- 3.05
	223.2	3.15	<b>273.50</b>	8.80	0.36	0.63	30	29.37	0.58	0.02	<b>306.89</b>	304.06	2.83	- 0.93
	227.6	3.37	<b>273.72</b>	9.24	0.36	0.63	30	29.32	0.61	0.02	<b>338.10</b>	341.18	-3.08	0.90
232.2	3.60	<b>273.95</b>	9.71	0.37	0.63	30	29.28	0.63	0.02	<b>371.70</b>	380.07	-8.37	2.20	

Obr. 7.21 - Výpočet konzumní křivky M16 – výpočet II



Obr. 7.22 - Konzumní křivka M16

Oba výpočty mají podobný průběh konzumní křivky a také průtoky vycházejí v obou případech vyšší, než naměřené na modelu. Výpočet II je při nižších průtocích velmi nepřesný, ale postupným nárůstem kóty hladiny v nádrži dochází k přesnosti s naměřenými hodnotami okolo 2 %.



## 7.2.4 Výpočet měření M17

Výpočet měření M17 odpovídá stavu, kdy byl klapkový uzávěr vyhrazen do  $\frac{3}{4}$  hrazené výšky. Horní hrana uzávěru byla uvažována na úrovni 271,60 m n. m.

Klapkový uzávěr výpočet měření M17													
přístup k výpočtu	staničení [m]			poloměr klapky r= 10.25 m								rozdlil	%
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]		
	h			s	$\mu_p$	b	$b_0$	v	$h_{d0}$	$Q_{výp.}$	$Q_{naměř.}$		
Přepad přes kruhově zaoblený přeliv	13.2	0	<b>271.60</b>	8.75	0.00	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	0
	197.3	0.61	<b>272.21</b>	8.75	0.57	30	29.88	0.00	0.00	<b>23.85</b>	16.44	7.41	-45.10
	203	0.89	<b>272.49</b>	8.75	0.58	30	29.82	0.18	0.00	<b>43.10</b>	33.59	9.51	-28.32
	207.3	1.11	<b>272.71</b>	8.75	0.59	30	29.78	0.26	0.00	<b>60.18</b>	49.50	10.68	-21.57
	211.1	1.30	<b>272.90</b>	8.75	0.59	30	29.74	0.31	0.00	<b>76.90</b>	65.41	11.49	-17.57
	214.5	1.47	<b>273.07</b>	8.75	0.59	30	29.71	0.35	0.01	<b>93.11</b>	83.09	10.03	-12.07
	217.4	1.61	<b>273.21</b>	8.75	0.60	30	29.68	0.39	0.01	<b>107.84</b>	98.99	8.85	- 8.94
	220.3	1.76	<b>273.36</b>	8.75	0.60	30	29.65	0.41	0.01	<b>123.33</b>	114.90	8.43	- 7.33
	222.9	1.89	<b>273.49</b>	8.75	0.60	30	29.62	0.44	0.01	<b>137.90</b>	130.81	7.09	- 5.42
	225.9	2.04	<b>273.64</b>	8.75	0.61	30	29.59	0.45	0.01	<b>155.40</b>	148.49	6.91	- 4.65
	228.2	2.15	<b>273.75</b>	8.75	0.61	30	29.57	0.48	0.01	<b>169.45</b>	164.40	5.05	- 3.07

Obr. 7.23 - Výpočet konzumní křivky M17 – výpočet I

Součinitel přepadu byl zvolen podle Kramera a platí,

$$\mu_p = 1,02 - \frac{1,015}{\frac{h}{r} + 2,08} + \left[ 0,04 \left( \frac{h}{r} + 0,19 \right)^2 + 0,0223 \right] \frac{r}{s}, m = \frac{2}{3} \mu_p; \text{ kde } h - \text{přepadová}$$

výška paprsku, r – poloměr polokruhového přelivu, s – výška od dna k přepadové hraně.

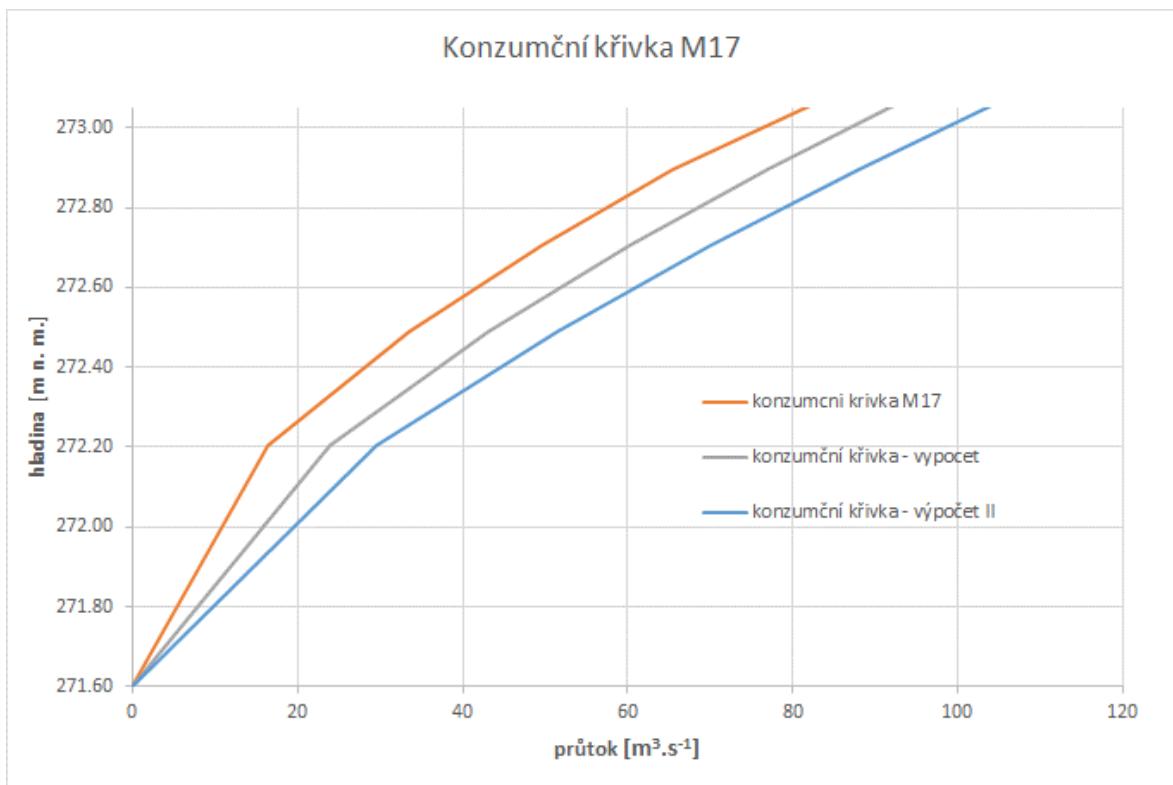
[1]

Klapkový uzávěr výpočet měření M17														
přístup k výpočtu	staničení [m]			poloměr klapky r= 10.25 m								rozdlil	%	
	nádrž	[m]	[m n. m.]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]			
	h			H	h/H	$\mu_p$	b	$b_0$	v	$h_{d0}$	$Q_{výp.}$			$Q_{naměř.}$
Přepad vody přes typovou klapku	13.2	0	<b>271.60</b>	3.75	0.00	0.79	30	30.00	0.00	0.00	<b>0</b>	0	0	
	197.3	0.61	<b>272.21</b>	4.96	0.12	0.71	30	29.88	0.00	0.00	<b>29.49</b>	16.44	13.05	-79.38
	203	0.89	<b>272.49</b>	5.53	0.16	0.69	30	29.82	0.22	0.00	<b>51.37</b>	33.59	17.79	-52.96
	207.3	1.11	<b>272.71</b>	5.96	0.19	0.69	30	29.78	0.31	0.00	<b>70.08</b>	49.50	20.59	-41.59
	211.1	1.30	<b>272.90</b>	6.34	0.20	0.68	30	29.74	0.36	0.01	<b>87.98</b>	65.41	22.57	-34.51
	214.5	1.47	<b>273.07</b>	6.68	0.22	0.67	30	29.71	0.40	0.01	<b>104.97</b>	83.09	21.88	-26.34
	217.4	1.61	<b>273.21</b>	6.97	0.23	0.67	30	29.68	0.43	0.01	<b>120.14</b>	98.99	21.15	-21.36
	220.3	1.76	<b>273.36</b>	7.26	0.24	0.67	30	29.65	0.46	0.01	<b>135.91</b>	114.90	21.00	-18.28
	222.9	1.89	<b>273.49</b>	7.52	0.25	0.66	30	29.62	0.48	0.01	<b>150.51</b>	130.81	19.70	-15.06
	225.9	2.04	<b>273.64</b>	7.82	0.26	0.66	30	29.59	0.49	0.01	<b>167.91</b>	148.49	19.41	-13.07
	228.2	2.15	<b>273.75</b>	8.05	0.27	0.66	30	29.57	0.52	0.01	<b>181.61</b>	164.40	17.21	-10.47

Obr. 7.24 - Výpočet konzumní křivky M17 – výpočet II

Součinitel přepadu pro výpočet II byl použit z rovnice v Obr. 7.14, kde dosazením poměru h/H za x byl získán součinitel  $\mu_p$ .

Zúžená přepadová šířka  $b_0$  byla vypočtena dle vzorce  $b_0 = \sum b_1 - (n\varepsilon_p + 2\varepsilon_k)h_0$ ; kde byla vybrána hodnota tvarového součinitele návodního pilíře  $\varepsilon_p = 0,045$  a hodnota tvarového součinitele bočních křídel břehových pilířů  $\varepsilon_k = 0,04$ . Hodnoty tvarových součinitelů byly dle tvaru pilířů vybrány ze skrip Hydrotechnické stavby 1, Doc Medřický. [3]



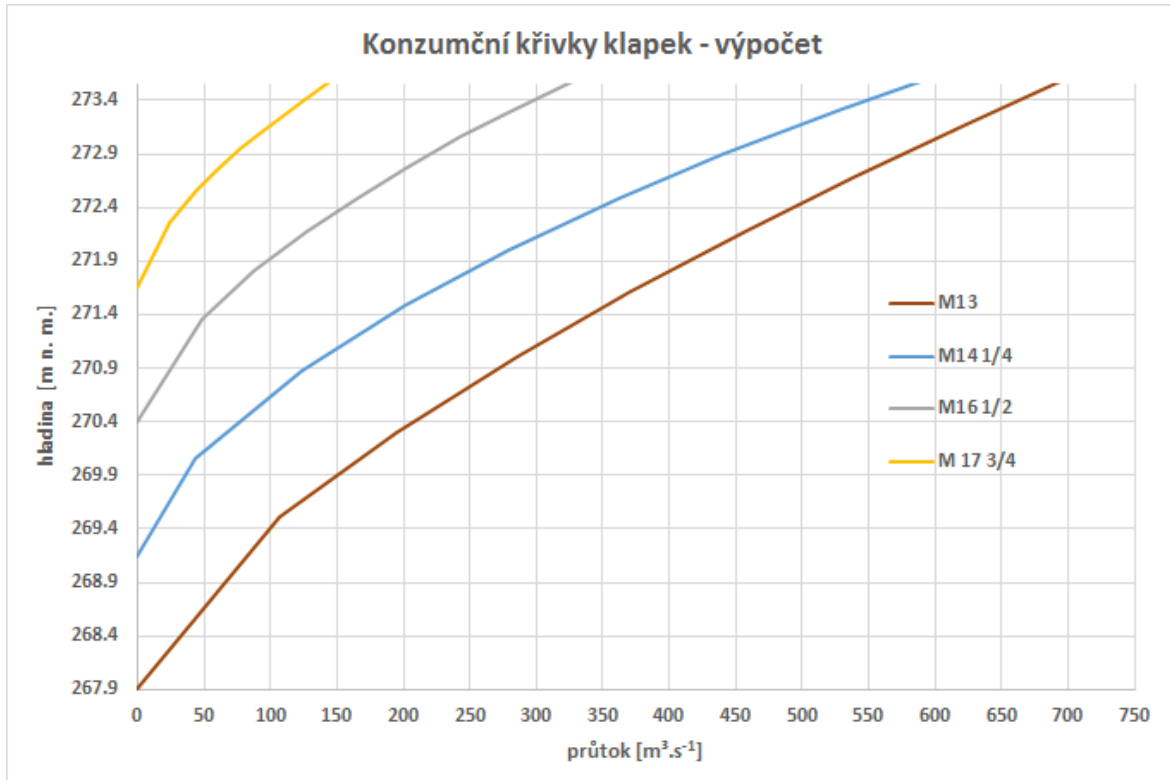
Obr. 7.25 - Konzumční křivka M17

Odchylka od měření na fyzikálním modelu je v obou případech výpočtu poměrně značná. Nicméně konzumční křivka dle výpočtu I se naměřeným hodnotám přibližuje více.

## 7.2.5 Závěr výpočtů konzumčních křivek klapkového uzávěru

Závěrem je nutno podotknout, že výsledky výpočtů pomocí vzorců a součinitelů jsou stále v dnešní době často odlišné od hodnot naměřených na fyzikálních nebo matematických modelech. Bylo by vhodné se touto problematikou do budoucna zabývat, jelikož klapkové uzávěry jsou velmi oblíbenou hradicí konstrukcí. Výhody jsou v přesné manipulaci kóty přepadové hrany v řádech centimetrů, pohon pomocí hydrostatických válců a odolnost konstrukce na tuhost v kroucení.

Pro přesné stanovení konzumční křivky bylo nutné sestavit fyzikální model v odpovídajícím měřítku a hodnoty naměřit. Další z možností výpočtu byl matematický model, který je ovšem také vhodné ověřit a porovnat s modelem fyzikálním. Matematické modelování bylo provedeno na Katedře hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. Výsledky matematického modelu byly velmi blízké modelovému stavu. Blíže o matematickém modelování bylo pojednáno ve zprávě o provedeném výzkumu. [8]



Obr. 7.26 - Konzumční křivky klapkového uzávěru pro různé polohy

dutá jezová klapka sklopená		dutá jezová klapka 3/4 sklopená		dutá jezová klapka 1/2 sklopená		dutá jezová klapka 1/4 sklopená	
<b>M13</b>		<b>M14</b>		<b>M16</b>		<b>M17</b>	
0.00	267.85	0.00	269.10	0.00	270.35	0.00	271.60
106.82	269.46	44.02	270.00	48.18	271.31	23.95	272.21
195.14	270.26	123.39	270.83	87.98	271.76	43.36	272.49
285.91	270.96	201.53	271.44	127.33	272.13	60.63	272.71
371.36	271.56	279.17	271.95	164.69	272.44	77.58	272.90
458.00	272.13	361.36	272.43	203.11	272.73	94.04	273.07
540.09	272.64	441.17	272.84	242.61	273.01	109.03	273.21
622.74	273.12	530.30	273.27	281.14	273.26	124.82	273.36
699.00	273.56	621.44	273.67	321.21	273.50	139.69	273.49
779.73	274.00	823.35	274.48	359.27	273.72	157.58	273.64
857.32	274.41	865.72	274.62	400.94	273.95	171.97	273.75

Obr. 7.27 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumčních křivek klapkového uzávěru

## 8 MĚŘENÍ KONZUMČNÍ KŘIVKY VYBRANÝCH VARIANT

Měření na fyzikálním modelu VD Nechanice probíhalo ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT v Praze.

Předmětem měření bylo stanovení konzumční křivky jednotlivých poloh uzávěrů. Konzumční křivka je závislost objemového průtoku na výšce přepadového paprsku vody. Může být pro jednotlivé hradící tělesa vyjádřena analyticky nebo empiricky z měření vodních stavů.

Před vlastním měřením vybraných variant bylo vycházeno z měření, které bylo provedeno katedrou Hydrotechniky ČVUT v Praze. Jedná se o převzatá měření M3 – M6 ze zprávy o hydrotechnickém výzkumu rekonstrukce krajních polí bezpečnostního přelivu VD Nechanice.

Následně na základě studie vhodného použití uzávěru na bezpečnostním přelivu VD Nechanice z kapitoly 6 bylo rozhodnuto, že měřenou variantou bude varianta s klapkovými uzávěry na krajních polích bezpečnostního přelivu a zdvižným segmentovým uzávěrem ve středním poli bezpečnostního přelivu.

Prvním úkolem bylo zjištění konzumční křivky středního pole zdvižného segmentového uzávěru. Měření tohoto uzávěru probíhalo celkem ve čtyřech polohách. První poloha pro čtvrtinu vyhrazeného uzávěru, druhá pro polovinu vyhrazeného uzávěru, třetí pro tři čtvrtiny vyhrazeného uzávěru a nakonec pro plně vyhrazený uzávěr.

Další měření byla provedena na krajních polích nově navržených klapkových uzávěrů. Postupnou manipulací byly pro měření konzumčních křivek těchto uzávěrů taktéž zvoleny čtyři polohy. První měřenou polohou byla poloha zcela vyhrazených klapkových uzávěrů, v druhé poloze byla čtvrtina zahrazena, v třetí poloze byla zahrazena polovina a v poslední čtvrté poloze byly zahrazeny tři čtvrtiny manipulačního rozsahu klapky. Měření probíhalo vždy v souběhu obou klapkových uzávěrů.

Celkem bylo naměřeno osm variant. Čtyři varianty pro zdvižný segment středního pole a čtyři varianty pro krajní pole klapkového uzávěru. Další čtyři měření byla převzata z výzkumné zprávy Katedry hydrotechniky (M3-M6).

## 8.1 Postup měření

Před každým měřením bylo potřeba nastavit pomocí nivelačního přístroje zvolenou polohu uzávěru. Po nastavení polohy byl fyzikální model utěsněn a připraven pro měření.

Dalším krokem bylo zjištění takového maximálního průtoku pro danou polohu uzávěru, kdy hladina v nádrži nekolísá a zároveň je na maximální bezpečné hladině. Tímto krokem byl získán maximální průtok pro danou polohu uzávěru, který byl následně rovnoměrně rozdělen na deset hodnot. Rovnoměrným rozdělením průtoku na několik dílčích hodnot byla získána vstupní data pro měření bodů konzumční křivky.

Pomocí uzávěru na trubním rozvodu v laboratoři a průtokoměru byly postupně nastaveny zvolené průtoky. Po ustálení hladiny v nádrži bylo provedeno čtení. Doba potřebná pro ustálení hladiny v nádrži se v jednotlivých případech lišila. Pro výtok pod segmentovým uzávěrem byla doba potřebná pro ustálení hladiny výrazně delší než pro přepad vody přes klapkové uzávěry. Měření kóty hladiny bylo proto měřeno v časových intervalech dvou minut, dokud sledované rozdíly v čtení nebyly marginální.

Tentýž postup byl následně opakován pro každou polohu uzávěru. Výstupem tedy byl stejný počet konzumčních křivek jako byl počet poloh jednotlivých uzávěrů.

Společně s hladinou v nádrži byla zaznamenávána i data ohledně průběhu hladiny ve skluzu. Měřena byla hladina na levé a pravé straně, celkem ve dvanácti profilech, vždy společně s čtením hladiny v nádrži.

### 8.1.1 Segmentový uzávěr

Před samotným měřením bylo zapotřebí zahradit krajní klapkové uzávěry a řádně je zatěsnit, aby nedocházelo k průsakům. Průsaky by mohly vnášet do měření nežádoucí chyby. Po nastavení polohy uzávěru byl fyzikální model dotěsněn a připraven pro měření.

Dalším krokem bylo zjištění takového maximálního průtoku pro danou polohu uzávěru, kdy hladina v nádrži nekolísá a zároveň je na maximální bezpečné hladině. Tímto krokem byl získán maximální průtok pro danou polohu uzávěru, který byl následně rovnoměrně rozdělen na deset hodnot. Rovnoměrným rozdělením průtoku na několik dílčích hodnot byla získána vstupní data pro měření bodů konzumční křivky.

Pomocí uzávěru na trubním rozvodu v laboratoři a průtokoměru byly postupně nastaveny zvolené průtoky. Po ustálení hladiny v nádrži bylo provedeno čtení. Doba potřebná pro ustálení hladiny v nádrži se v jednotlivých případech lišila. Pro výtok pod segmentovým uzávěrem byla doba potřebná pro ustálení hladiny výrazně delší než pro přepad vody přes

klapkové uzávěry. Měření kóty hladiny bylo proto měřeno v časových intervalech dvou minut, dokud sledované rozdíly v čtení nebyly marginální.

Společně s hladinou v nádrži byla zaznamenávána i data ohledně průběhu hladiny ve skluzu. Měřena byla hladina na levé a pravé straně, celkem ve dvanácti profilech, vždy společně s čtením hladiny v nádrži.

### 8.1.2 Klapkové uzávěry

Měření konzumční křivky klapkového uzávěru probíhalo v provozu obou krajních uzávěru ve stejné poloze, v souběhu. Výsledkem byla tedy konzumční křivka, která popisuje závislost průtoku na kótě hladiny v nádrži, při funkci obou krajních uzávěru najednou. Pro získání konzumční křivky pouze jednoho uzávěru by bylo nutné uskutečnit další měření, kdy by bylo v provozu jen jedno zvolené pole (pouze v případě nestejných polí bezpečnostního přelivu). Střední pole segmentového uzávěru bylo pečlivě utěsněno po celém obvodu uzávěru, jelikož při přepadu vody přes klapkové uzávěry byl segmentový uzávěr celý pod hladinou vody. Po nastavení polohy uzávěru pomocí nivelačního přístroje byl fyzikální model dotěsněn a připraven pro měření.

Dalším krokem bylo zjištění takového maximálního průtoku pro danou polohu uzávěru, kdy hladina v nádrži nekolísá a zároveň je na maximální bezpečné hladině. Tímto krokem byl získán maximální průtok pro danou polohu uzávěru, který byl následně rovnoměrně rozdělen na deset hodnot. Rovnoměrným rozdělením průtoku na několik dílčích hodnot byla získána vstupní data pro měření bodů konzumční křivky.

Pomocí uzávěru na trubním rozvodu v laboratoři a průtokoměru byly postupně nastaveny zvolené průtoky. Po ustálení hladiny v nádrži bylo provedeno čtení. Doba potřebná pro ustálení hladiny v nádrži se v jednotlivých případech lišila. Pro přepad vody přes klapkový uzávěr byla doba potřebná pro ustálení hladiny výrazně kratší. Měření kóty hladiny bylo proto měřeno v časových intervalech dvou minut, dokud sledované rozdíly v čtení nebyly marginální.

Společně s hladinou v nádrži byla zaznamenávána i data ohledně průběhu hladiny ve skluzu. Měřena byla hladina na levé a pravé straně, celkem ve dvanácti profilech, vždy společně s čtením hladiny v nádrži.

## 8.2 Výsledky a závěr z měření konzumční křivky na fyzikálním modelu

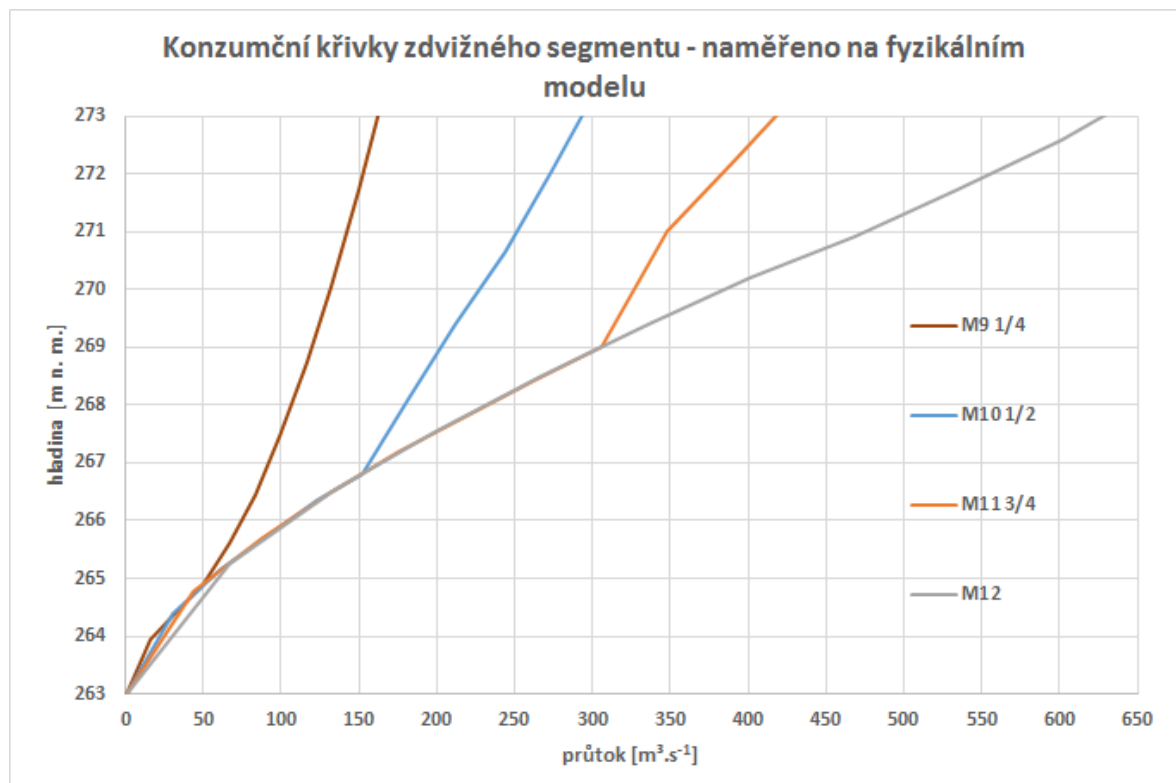
Naměřené hodnoty byly přepsány do tabulky, ze které byly vytvořeny grafy pro názorné srovnání jednotlivých poloh uzávěrů.

Z provedeného modelového výzkumu vyplývá, že fyzikální model je vybudován dle skutečných rozměrů vodního díla. Výrobní tolerance nepřesahuje  $\pm 1$  mm tj.  $\pm 50$  mm ve skutečnosti. Skutečné proudění vody na vodním díle je věrohodně popsáno fyzikálním modelem. [8]

Matematický model, který byl použit pro hydrotechnický výzkum na Katedře hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, byl verifikován porovnáním s daty naměřenými na fyzikálním modelu a byla zjištěna dobrá shoda získaných dat porovnáním matematického a fyzikálního výzkumu. [8]

Ze zprávy o hydrotechnickém výzkumu vyplývá, že naměřené hodnoty jednotlivých uzávěrů nelze kombinovat prostým součtem, protože naměřené hodnoty variant v porovnání s variantami pouze prostě sečtenými vykazují rozdíl kolem 4 %. [8]

### 8.2.1 Segmentový uzávěr



Obr. 8.1 - Konzumční křivky zdvižného segmentu v závislosti na poloze uzávěru

Na výše uvedeném Obr. 8.1 byla graficky znázorněna závislost průtoku (vodorovná osa v  $\text{m}^3/\text{s}$ ) na kótě hladiny v nádrži (svislá osa v m n. m.). Byly zde znázorněny čtyři konzumční křivky pro čtyři různé polohy uzávěru.

První konzumční křivka M9 reprezentuje polohu uzávěru při vyhrazení v jedné čtvrtině. Následně křivka M10 odpovídá poloze v jedné polovině vyhrazení, M11 ve třech čtvrtinách a M12 při plném vyhrazení.

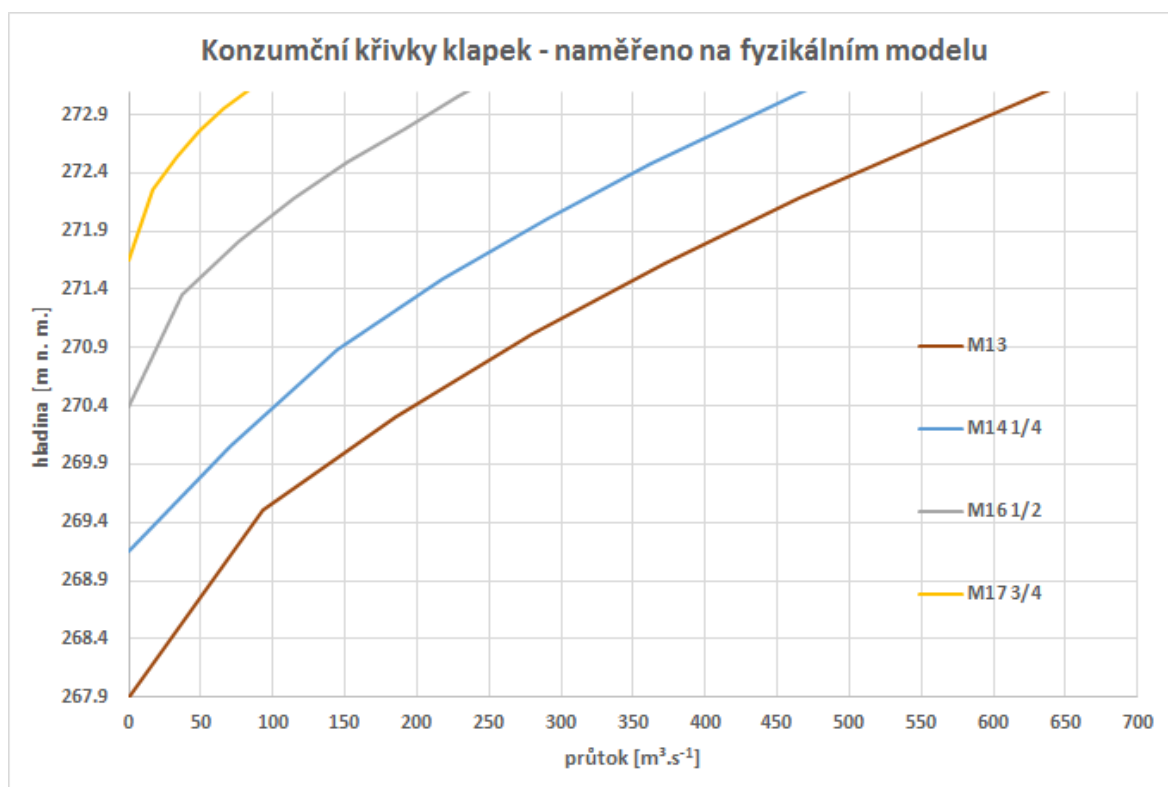
Na první pohled lze zpozorovat, že charakter konzumční křivky M11 se mírně od ostatních křivek liší. Z fotografií, které byly pořízeny v průběhu měření, nebyla odhalena příčina. Bylo by vhodné zkusit hodnotu přeměřit, jelikož mohlo dojít k nedostatečnému ustálení hladiny v nádrži.

segment 1/4 vytažen		segment 1/2 vytažen		segment 3/4 vytažen		segment vytažen	
<b>M9</b>		<b>M10</b>		<b>M11</b>		<b>M12</b>	
0.00	263.00	0.00	263.00	0.00	263.00	0.00	263.00
15.91	263.96	30.05	264.40	44.19	264.78	67.18	265.27
33.59	264.46	61.87	265.16	88.39	265.69	134.35	266.54
49.50	264.88	91.92	265.77	130.81	266.47	199.76	267.56
67.18	265.61	123.74	266.34	175.01	267.20	266.93	268.50
83.09	266.46	152.03	266.81	217.44	267.79	335.88	269.40
98.99	267.46	182.08	268.12	261.63	268.42	401.28	270.19
116.67	268.73	212.13	269.39	305.82	269.01	468.46	270.92
132.58	270.05	243.95	270.66	348.25	271.01	533.87	271.72
150.26	271.71	274.00	272.05	392.44	272.27	601.04	272.59
166.17	273.44	305.12	273.57	435.75	273.52	668.22	273.62

Obr. 8.2 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumčních křivek zdvižného segmentu



### 8.2.2 Klapkový uzávěr



Obr. 8.3 - Konzumční křivky dutých klapek v závislosti na poloze uzávěru

Na výše uvedeném Obr. 8.3 byla popsána závislost průtoku (vodorovná osa v m<sup>3</sup>/s) na kótě hladiny v nádrži (svislá osa v m n. m.). Byly zde znázorněny čtyři konzumční křivky pro čtyři různé polohy uzávěru.

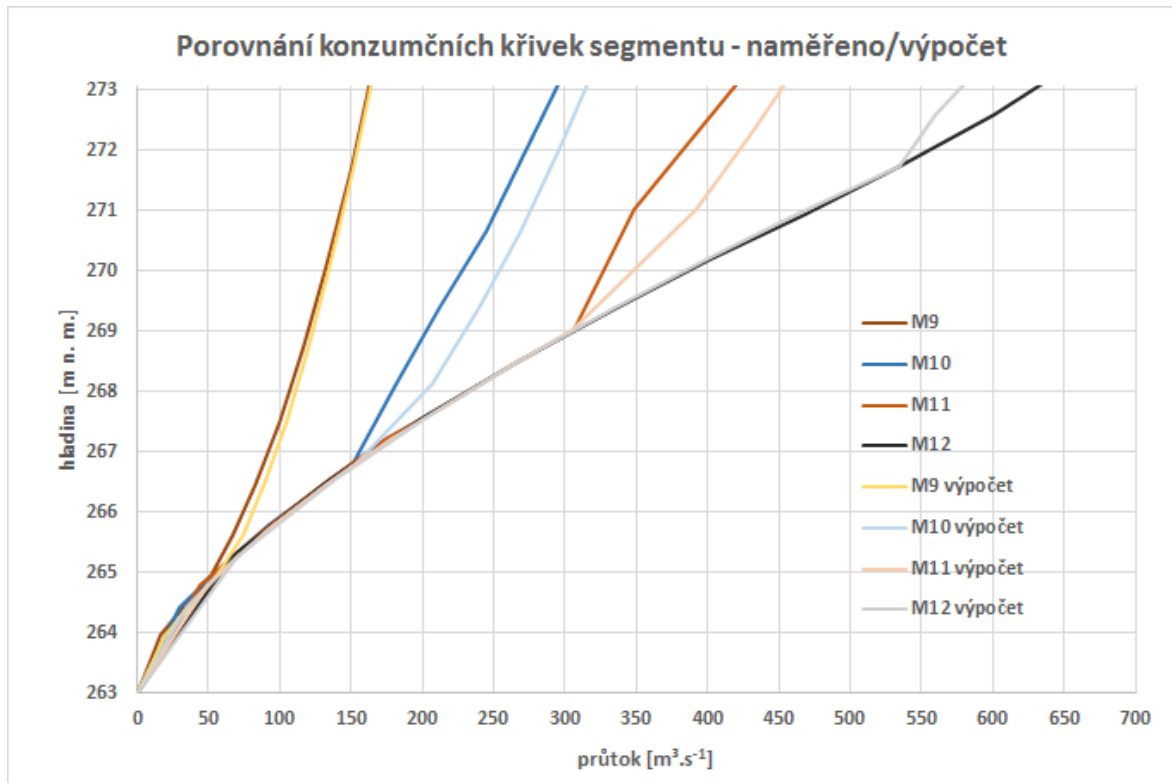
První konzumční křivka M13 reprezentuje polohu klapkového uzávěru při úplném sklopení. Následně křivka M14 odpovídá poloze vyhrazení v jedné čtvrtině, M16 v jedné polovině a M17 při vyhrazení v třech čtvrtinách.

Měření M15 ve vykreslení chybí, jelikož nebyly uzávěry dostatečně utěsněny a měření neproběhlo za korektních podmínek.

dutá jezová klapka sklopená		dutá jezová klapka 1/4 vytažen		dutá jezová klapka 1/2 vytažen		dutá jezová klapka 3/4 vytažen	
<b>M13</b>		<b>M14</b>		<b>M16</b>		<b>M17</b>	
0.00	267.85	0.00	269.10	0.00	270.35	0.00	271.60
93.69	269.46	70.71	270.00	37.12	271.31	16.44	272.21
185.62	270.26	144.96	270.83	76.01	271.76	33.59	272.49
279.31	270.96	217.44	271.44	114.90	272.13	49.50	272.71
371.23	271.56	289.91	271.95	152.03	272.44	65.41	272.90
464.92	272.13	362.39	272.43	190.92	272.73	83.09	273.07
558.61	272.64	433.10	272.84	228.04	273.01	98.99	273.21
650.54	273.12	505.58	273.27	265.17	273.26	114.90	273.36
742.46	273.56	578.06	273.67	304.06	273.50	130.81	273.49
836.15	274.00	685.89	274.48	341.18	273.72	148.49	273.64
929.85	274.41	723.02	274.62	380.07	273.95	164.40	273.75

*Obr. 8.4 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumních křivek klapkového uzávěru*

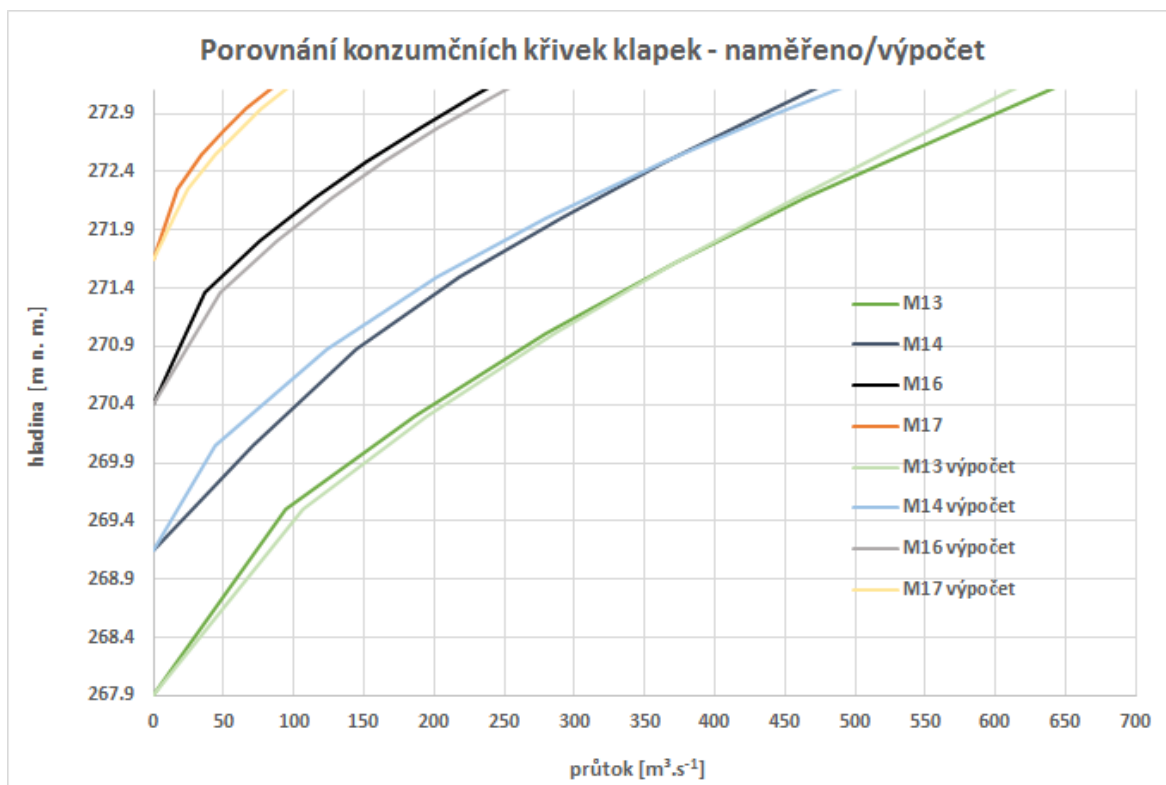
## 9 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM



Obr. 9.1 – Porovnání naměřených konzumčních křivek segmentového uzávěru s výpočtem

Z Obr. 9.1 a Obr. 9.2, kde byly graficky znázorněny konzumční křivky pro jednotlivé polohy uzávěru jsou vidět rozdíly mezi výpočtem a naměřenými hodnotami. Toto zjištění nám potvrzuje, jak důležitá byla stavba fyzikálního modelu. Samotný matematický výpočet nelze totiž unifikovat pro všechny možné modelové stavy. Některé konstrukce mohou být svým tvarem velmi unikátní a popsat takové tvary konstrukcí pouze pomocí matematických výpočtů je nereálné. Právě pro tyto případy nám slouží fyzikální modely, nebo případně matematické modelování, které je ovšem také velmi dobré ověřit právě s výsledky fyzikálního modelu.

Na první pohled je zřejmé, že výpočet konzumční křivky viz. Obr. 9.1 je odlišný od naměřených hodnot až od části výpočtu výtoku velkým otvorem. Pravděpodobně byly hodnoty měření ovlivněny tvarem pilířů a tvarem vodorovné nátokové konstrukce v oblasti nad zdvižným segmentem. V oblastech, kde dochází k rozdílům naměřených hodnot, by bylo vhodné hodnoty naměřit znovu podrobněji a vyhodnotit je.

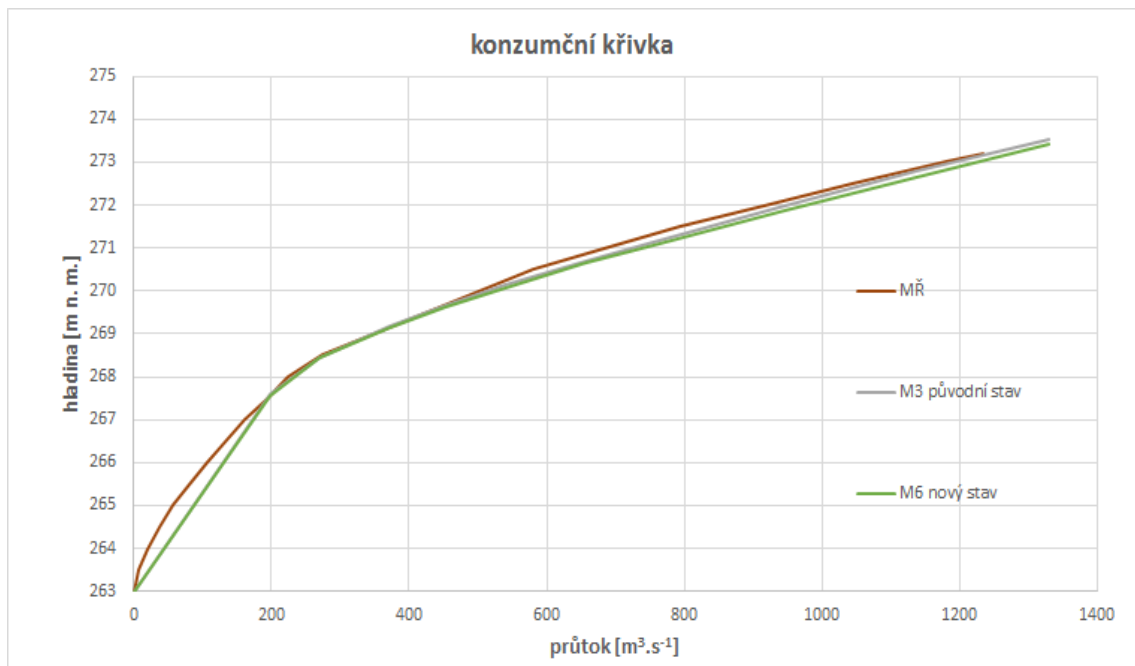


Obr. 9.2 - Porovnání naměřených konzumčních křivek dutých klapek s výpočtem

Porovnání konzumčních křivek u klapkového uzávěru poukazuje na rozdílné výsledky různých přístupů výpočtů a měření. Výpočty byly vypočteny dvěma různými způsoby, ani jeden z nich nebyl dostatečně přesný.

Bylo by vhodné se numerickým výpočtem konzumční křivky pomocí vzorců zabývat, jelikož klapkové uzávěry jsou u správců vodních děl velmi oblíbenou hradící konstrukcí a doposud není znám vzorec s adekvátními výstupy.

# 10 POROVNÁNÍ KONZUMČNÍCH KŘIVEK PŮVODNÍHO A NOVÉHO STAVU S MANIPULAČNÍM ŘÁDEM



Obr. 10.1 - Porovnání konzumčních křivek nového a starého stavu s Manipulačním řádem

Dle Manipulačního řádu VD Nechanice byly na Obr. 10.1 porovnány naměřené hodnoty na fyzikálním modelu pro starý a nový stav krajních polí bezpečnostního přelivu. Pro danou kótu přelivné hrany jsou naměřené hodnoty kapacitnější, než je uvedeno v Manipulačním řádu VD Nechanice. Nově plánovaná rekonstrukce krajních polí, která reprezentuje měření M6 dokáže převést při kóte přelivné hrany 273,05 o 2,4 % větší průtok než původní stav M3, což je o 29 m<sup>3</sup>.

H	M3	M6	
[m n. m.]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[%]
273.05	1206	1235	2.4
271	725	739	1.9
269	349	350	0.3

Obr. 10.2 – Porovnání měření M3 a M6

## 11 SKLUZ S VÝVAREM

### 11.1 Geometrie - popis

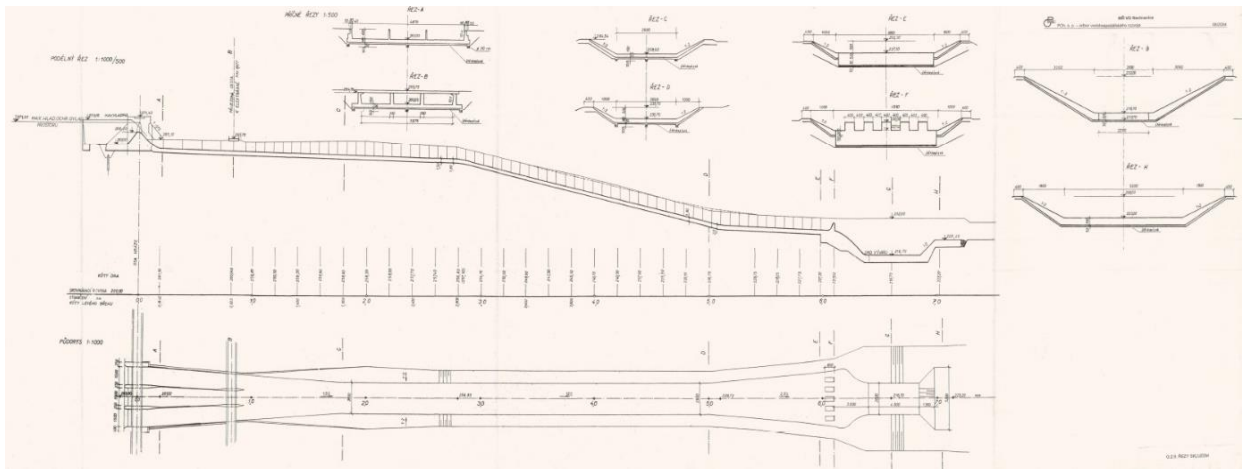
Na trojici přelivných bloků plynule navazuje betonový skluz, který je dlouhý 592 m. Přes skluz bezpečnostního přelivu vede most vzdálený 82,3 m od osy hráze. Každé z přelivných polí má vlastní obdélníkový profil, který se zužuje v místě přemostění na šířku 39,8 m ve dně. Tyto obdélníkové profily jsou rozděleny pomocí betonových dělicích stěn až k mostním pilířům. Dále profil přechází do společného neděleného lichoběžníkového profilu se sklony svahů 1 : 2 a o šířce ve dně 26 m. Skluz je ukončen pěti mohutnými betonovými rozrážeci a betonovým vývarem o délce 110 m. Sklon dna skluzu není jednotný. V horní části je sklon dna skluzu 1,5 %, ve střední části je sklon dna skluzu 12 % a v dolní části je sklon dna skluzu 2,5 %. Horní oblast skluzu je rozdělena do tří samostatných profilů. Pětice mohutných rozrážeců spolu s dlouhým vývarem má za úkol společně zvýšit tlumicí účinek. Dolní koryto řeky Ohře je v místě napojení opevněno betonovými panely. [10]



*Obr. 11.1 - Fotografie horní části skluzu bezpečnostního přelivu VD Nechanice*



Obr. 11.2 - Fotografie střední a dolní části skluzu bezpečnostního přelivu VD Nechanice



Obr. 11.3 - Podélný a příčné řezy skluzem

## 11.2 Výpočet režimu proudění v otevřeném korytě skluzu

Na základě rozsahu měřených průtoků, byly zvoleny čtyři hodnoty průtoku, u kterých byla vypočtena hodnota Froudova čísla, stanoven režim proudění a vypočítán podélný profil hladin. Každý zvolený průtok byl počítán v pěti různých charakteristických profilech. Způsob pro určení režimu proudění v otevřeném korytě byl zvolen pomocí porovnání hodnoty Froudova čísla  $Fr$  s jeho mezní hodnotou pro kritické proudění  $Fr = 1$ .

Výchozí rovnicí pro výpočet Froudova čísla je rovnice  $E_d = y + \frac{\alpha Q^2}{2gS^2}$ ; kde vyřešením minima funkce v níž  $S = f(y)$  získáme obecnou podmínku kritického proudění  $\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S_k^3}{B_k}$

Po dosazení za  $Q = B \cdot y_s \cdot v$  a následné úpravě získáme vzorec pro výpočet Froudova čísla ve tvaru  $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y_s}}$ . [1]

Froudovo číslo je bezrozměrná veličina, jelikož jde o poměr okamžité rychlosti s rychlostí kritickou. Při

kritickém proudění  $v = v_k$  je  $Fr = 1$

řičním proudění  $v < v_k$  je  $Fr < 1$

bystřinném proudění  $v > v_k$  je  $Fr > 1$  [1]

Ve všech případech výpočtu (viz. Obr 11.2) bylo dosaženo podmínky kdy  $Fr > 1$ , tudíž bylo uvažováno bystřinné proudění v celé délce skluzu.

Výpočet režimu proudění byl vypočten pro účely výpočtu průběhu hladiny a posouzení vývaru.



<b>Q = 199.8 m<sup>3</sup>/s</b>					
	Příčný řez A	Příčný řez B	Příčný řez C	Příčný řez D	Příčný řez E
y [m]	1.37	1.67	0.95	0.51	0.50
B [m]	16	12.2	26	26	43.6
S [m <sup>2</sup> ]	22.00	20.41	26.64	13.90	22.23
O [m]	18.75	15.55	30.27	28.30	28.23
R [-]	1.17	1.31	0.88	0.49	0.79
i [-]	0.015	0.015	0.015	0.12	0.025
n [-]	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
C [-]	68.47	69.76	65.26	59.22	64.06
v [m.s <sup>-1</sup> ]	9.08	9.79	7.50	14.38	8.99
Q [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	199.80	199.80	199.80	199.80	199.80
<b>Fr [-]</b>	<b>2.47</b>	<b>2.42</b>	<b>2.37</b>	<b>6.28</b>	<b>4.02</b>
<b>Q = 468.5 m<sup>3</sup>/s</b>					
	Příčný řez A	Příčný řez B	Příčný řez C	Příčný řez D	Příčný řez E
y [m]	2.39	2.97	1.58	0.85	0.84
B [m]	16	12.2	26	26	43.6
S [m <sup>2</sup> ]	38.22	36.19	46.02	23.67	37.85
O [m]	20.78	18.13	33.06	29.82	29.74
R [-]	1.84	2.00	1.39	0.79	1.27
i [-]	0.015	0.015	0.015	0.12	0.025
n [-]	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
C [-]	73.79	74.81	70.45	64.15	69.40
v [m.s <sup>-1</sup> ]	12.26	12.94	10.18	19.80	12.38
Q [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	468.50	468.50	468.50	468.50	468.50
<b>Fr [-]</b>	<b>2.53</b>	<b>2.40</b>	<b>2.44</b>	<b>6.62</b>	<b>4.24</b>
<b>Q = 668.2 m<sup>3</sup>/s</b>					
	Příčný řez A	Příčný řez B	Příčný řez C	Příčný řez D	Příčný řez E
y [m]	3.03	3.80	1.94	1.05	1.04
B [m]	16	12.2	26	26	43.6
S [m <sup>2</sup> ]	48.44	46.40	58.06	29.63	47.40
O [m]	22.05	19.81	34.69	30.71	30.64
R [-]	2.20	2.34	1.67	0.96	1.55
i [-]	0.015	0.015	0.015	0.12	0.025
n [-]	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
C [-]	76.01	76.83	72.64	66.27	71.69
v [m.s <sup>-1</sup> ]	13.80	14.40	11.51	22.55	14.10
Q [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	668.20	668.20	668.20	668.20	668.20
<b>Fr [-]</b>	<b>2.53</b>	<b>2.36</b>	<b>2.46</b>	<b>6.74</b>	<b>4.32</b>
<b>Q<sub>10 000</sub> = 1407 m<sup>3</sup>/s</b>					
	Příčný řez A	Příčný řez B	Příčný řez C	Příčný řez D	Příčný řez E
y [m]	2.23	2.68	2.99	1.63	1.63
B [m]	48	36.6	26	26	43.6
S [m <sup>2</sup> ]	107.09	97.93	95.45	47.85	76.61
O [m]	52.46	41.95	39.35	33.31	33.31
R [-]	2.04	2.33	2.43	1.44	2.30
i [-]	0.015	0.015	0.015	0.12	0.025
n [-]	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
C [-]	75.09	76.78	77.28	70.82	76.59
v [m.s <sup>-1</sup> ]	13.14	14.37	14.74	29.40	18.37
Q [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	1407.00	1407.00	1407.00	1407.00	1407.00
<b>Fr [-]</b>	<b>2.81</b>	<b>2.80</b>	<b>2.46</b>	<b>6.92</b>	<b>4.42</b>

Obr. 11.4 - Shrnutí výpočtu režimu proudění

### 11.3 Průběh hladiny ve skluzu bezpečnostního přelivu

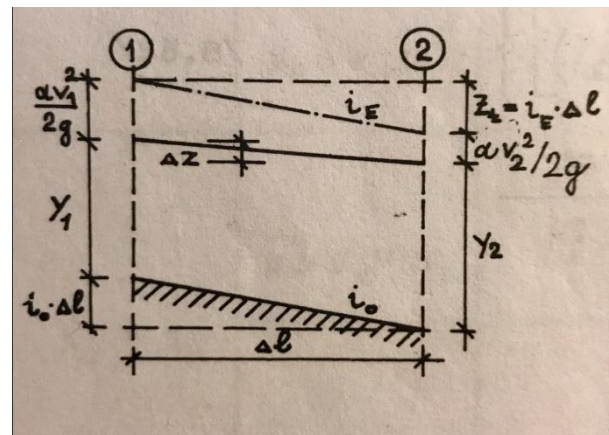
Úroveň hladiny ve skluzu byla při všech měřeních průchodu povodně v korytě skluzu. U žádného z měřených stavů nebyly pozorovány nežádoucí hydraulické jevy, které by ovlivňovaly bezpečnost nebo funkčnost vodního díla. Pouze v horní části skluzu dochází ke značnému namáhání dělicích stěn od proudící vody. Namáhání dělicích stěn by bylo vhodné spolu se dnem skluzu staticky posoudit. [8]

#### 11.3.1 Výpočet hladiny nerovnoměrného proudění

Hlavním důvodem výpočtu průběhu hladiny nerovnoměrného proudění ve skluzu bezpečnostního přelivu VD Nechanice bylo ověření naměřených hodnot na fyzikálním modelu a získání vstupních dat pro posouzení vývaru. Zvolené hodnoty pro numerický výpočet byly N-leté průtoky  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{10\,000}$ , které byly převzaty z Manipulačního řádu.

Princip výpočtu vychází z řešení Bernoulliho rovnice pro úsek koryta o délce  $\Delta l$  mezi dvěma průřezy. [1]

$$i_0 \cdot \Delta l + y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} + i_e \cdot \Delta l$$



Obr. 11.5 Schéma výpočtu hladiny nerovnoměrného proudění

Postupovat lze dvěma způsoby: pro volený rozdíl hladin  $\Delta z$  hledáme odpovídající vzdálenost  $\Delta l$ , nebo naopak pro volenou vzdálenost  $\Delta l$  hledáme rozdíl hladin  $\Delta z$ . [1]

Pro tento případ byl zvolen přístup, kdy pro zvolený rozdíl hladin  $\Delta z$  hledáme vzdálenost  $\Delta l$ . Z předchozího výpočtu v kapitole 12.2, kde byl vypočten režim proudění, bylo zjištěno, že v celé délce skluzu se jedná o proudění bystrinné, proto bylo ve výpočtu postupováno po směru toku vody. [1]

Rovnice pro zjištění vzdálenosti  $\Delta l$  při známé hloubce v horním profilu  $y_1$  a zvolené hloubce  $y_2$ :

$$\Delta l(i_e - i_0) = y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} - \left( y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} \right)$$

Do této rovnice zavádí Čarnomskij energetickou výšku průřezu:

$$\Delta l = \frac{E_{d1} - E_{d2}}{i_e - i_0} = \frac{\left(y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g}\right) - \left(y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g}\right)}{i_0 - \frac{Q^2}{C_p^2 \cdot S_p^2 \cdot R_p}}$$

Postup výpočtu:

1. Známe hloubku  $y_1$
2. Odhadneme hloubku  $y_2$
3. Vypočteme rychlosti  $v_1$ ,  $v_2$  a všechny průměrné hodnoty
4. Vypočte se  $\Delta l$
5. Odhadnutá hloubka  $y_2$  je výchozí hloubkou pro výpočet dalšího úseku a postup se opakuje
6. Pro určení celkové délky vzduť je  $l = \sum \Delta l_i$ .

Výpočet je vhodné uspořádat tabelárně a volit větší počet menších kroků. Čím jsou úseky kratší, tím je lépe popsán skutečný průběh a řešení je přesnější. [1]

Tabelární výpočet viz. Příloha č.17,18, 19, 20

### 11.3.2 Výstupy z měření a výpočtu průběhu hladiny nerovnoměrného proudění

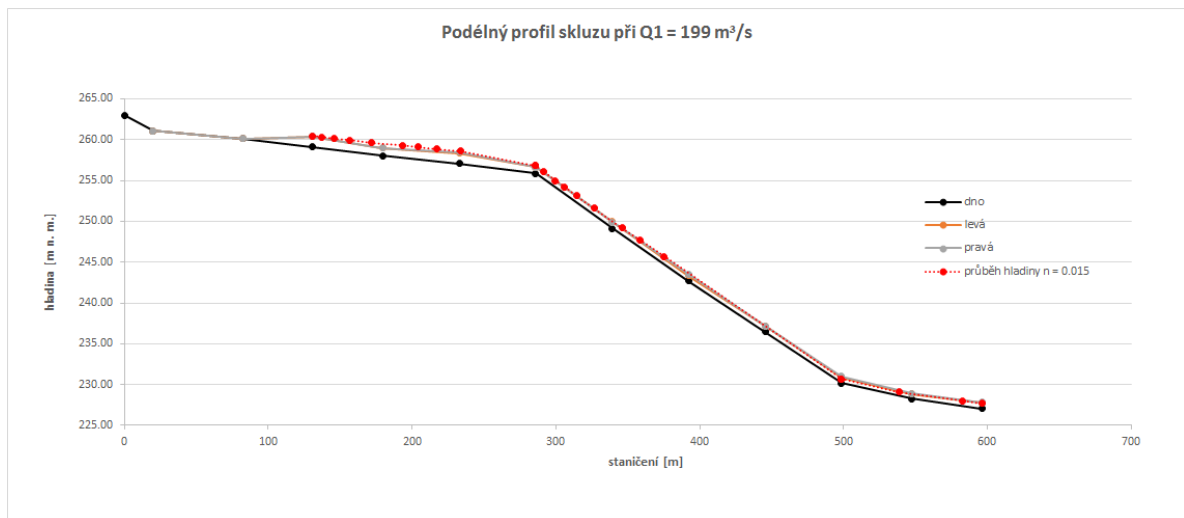
Průběh hladin ve skluzu bezpečnostního přelivu byl pozorován pro hodnoty N-letých průtoků  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{10\,000}$ , které byly převzaty z Manipulačního řádu.

Z naměřených hodnot úrovně hladiny převzatých z měření M6, byly vyneseny hodnoty hladiny v levé a pravé části skluzu viz. Obr.11.6, Obr.11.7, Obr.11.8, Obr.11.9.

V dalším kroku byl proveden výpočet průběhu hladiny nerovnoměrného proudění, který byl blíže popsán v kapitole 11.3.1.

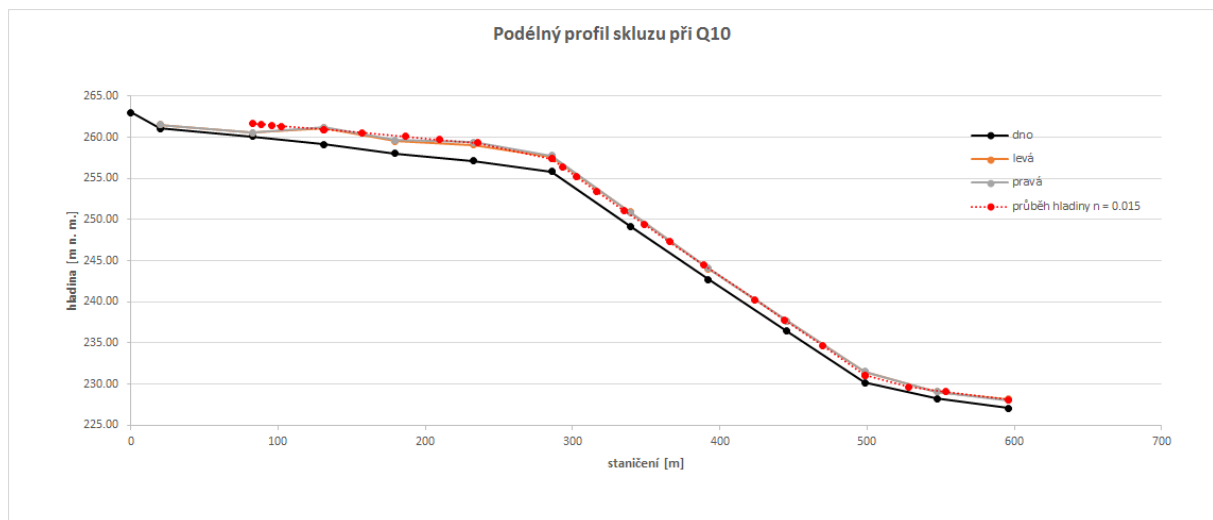
Hodnota Manningova drsnostního součinitele  $n = 0.015$  pro otevřená betonová koryta byla vybrána ze skript Hydraulika, Doc Havlík, Marešová, str. 200, Tab. 8.5. Podrobněji o Manningově drsnostním součiniteli v kapitole 12.3.3.

Na Obr.11.6 byl graficky znázorněn průběh naměřené kóty hladiny na fyzikálním modelu (oranžová - levá strana skluzu, šedá - pravá strana skluzu) a kóty hladiny získané výpočtem (červená) pro průtok  $Q_1$ . Z Obr. 11.6 bylo detailním zkoumáním usouzeno, že výpočet je velmi blízký naměřeným hodnotám a lze ho využít pro další výpočty.

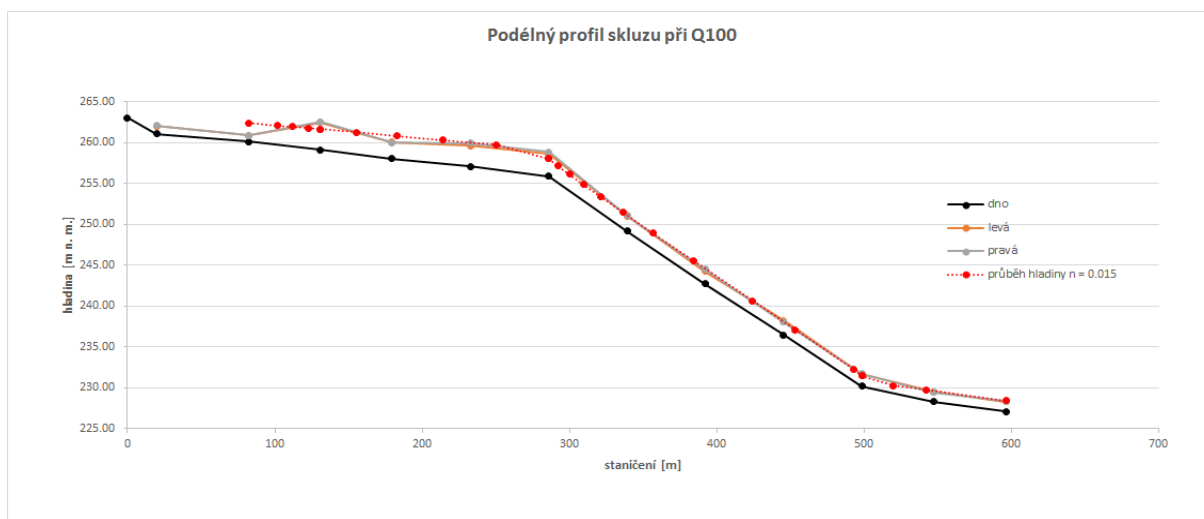


Obr. 11.6 - Porovnání průběhu hladin pro  $N$ -letý průtok  $Q_1$  ve skluzu bezpečnostního přelivu

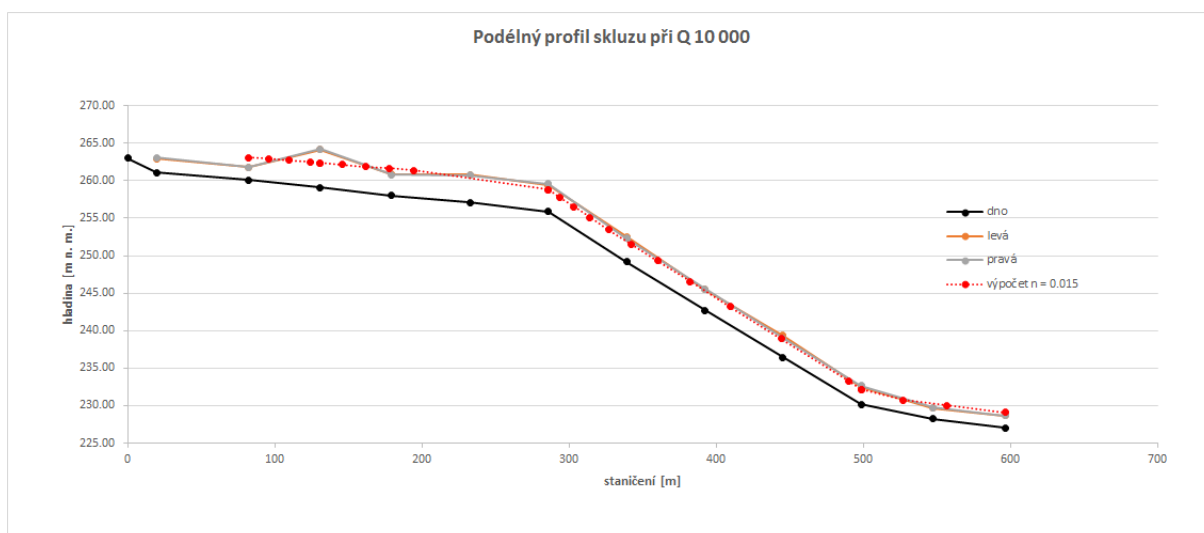
Na Obr.11.7, Obr.11.8 a Obr.11.9 byl průběh hladiny znázorněn obdobně, ovšem pro  $N$ -letý průtok  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{10\,000}$ .



Obr. 11.7 - Porovnání průběhu hladin pro  $N$ -letý průtok  $Q_{10}$  ve skluzu bezpečnostního přelivu



Obr. 11.8 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok  $Q_{100}$  ve skluzu bezpečnostního přelivu



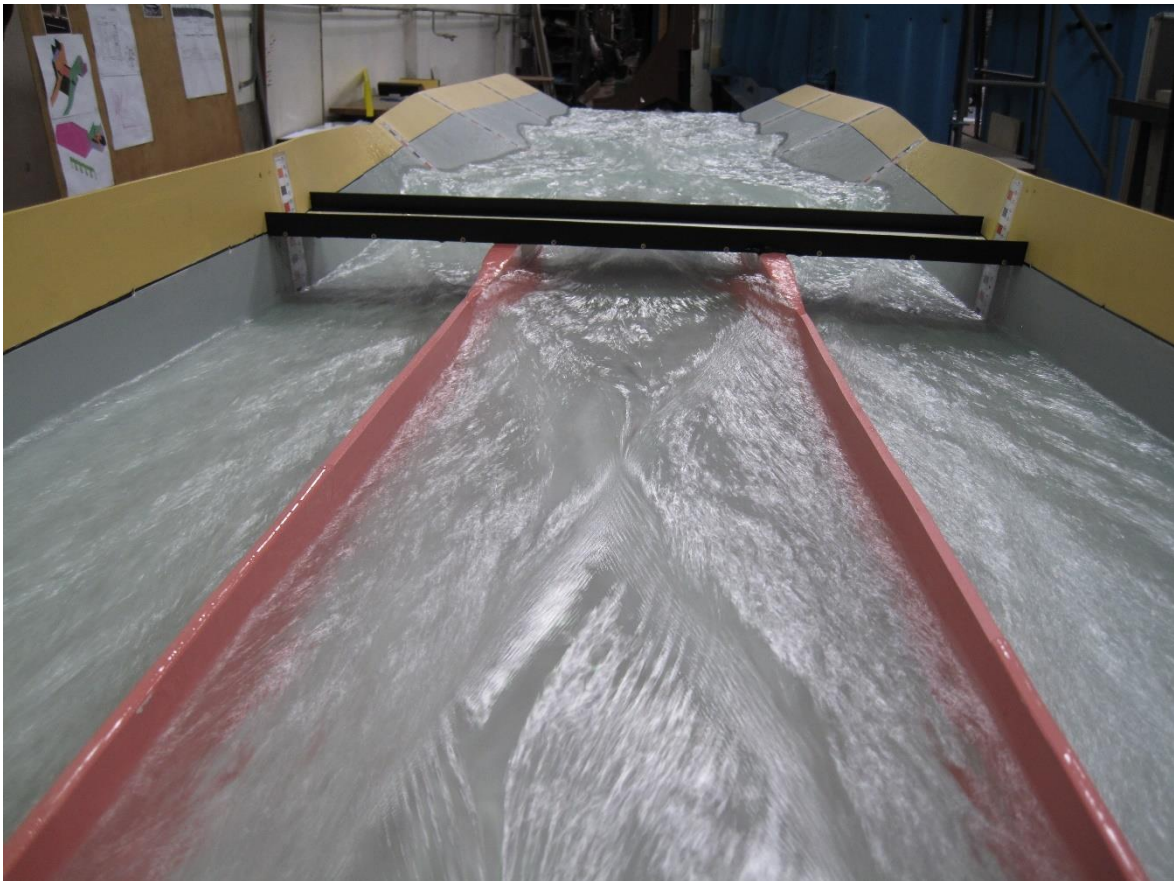
Obr. 11.9 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok  $Q_{10\ 000}$  ve skluzu bezpečnostního přelivu

Rozdíl naměřené a výchozí úrovně počítané hladiny byl dán podélně - příčnými vlnami, které při různých průtocích mírně mění svou polohu. Vlny byly lokalizovány již přímo za výtokem přes uzávěr a postupně se dále šíří skluzem.

Hlavním rozdílem ve výpočtu a měření byla oblast příčného řezu, kde byla hladina vody zkoumána. V případě, kdy hladina byla měřena, byl odečet prováděn na stranách skluzu. V případě výpočtu byla úroveň hladiny uvažována stejně po šířce skluzu. Výskyt

podélně - příčných vln, který byl již dříve zmíněn, hrál roli v určení výchozí úrovně hladiny pro numerický výpočet. Bylo nutné kalkulovat s okamžitou polohou podélných vln, což vysvětluje rozdíl v počáteční úrovni hladiny naměřené a vypočtené.

Pro názornost byla přiložena fotografie viz. Obr. 11.10, z měření na fyzikálním modelu, která demonstruje polohu podélných vln a vliv na hloubku proudící vody.



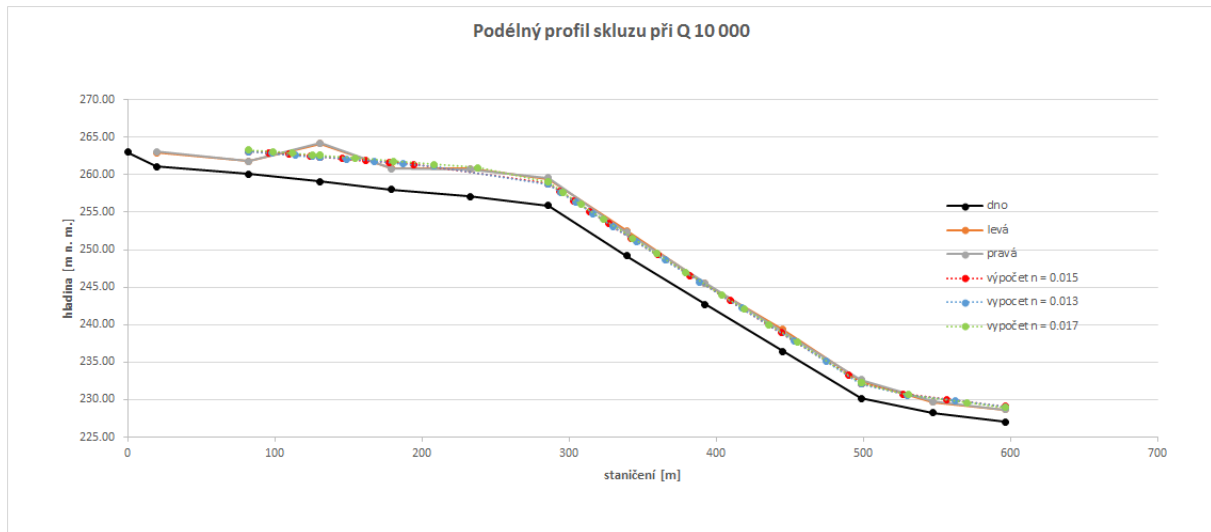
*Obr. 11.10 – Fotografie z měření M3 při průtoku  $Q_{10\,000}$*

### **11.3.3 Citlivostní analýza vlivu drsnostního součinitele na průběh hladiny ve skluzu**

U výpočtu průběhu hladiny pro  $Q_{10\,000}$  byla provedena citlivostní analýza, která spočívala ve stanovení vlivu drsnostního součinitele na výpočet.

Hodnoty Manningova drsnostního součinitele byly voleny:  $n = 0.013$ ,  $n = 0.015$ ,  $n = 0.017$

Na základě rozdílů naměřených a vypočítaných hodnot byl pomocí statistického výpočtu jako výchozí součinitel drsnosti zvolen součinitel  $n = 0,015$ . Samotný vliv součinitele drsnosti na průběh hladiny při rozdílu hladiny počáteční podmínky 1,3 m byl pouze 3.8 %, což bylo přibližně 5 cm.



Obr. 11.11 - Porovnání průběhu hladin pro  $N$ -letý průtok  $Q_{10\,000}$  pro různé hodnoty Manningova drsnostního součinitele

## 11.4 Vývar

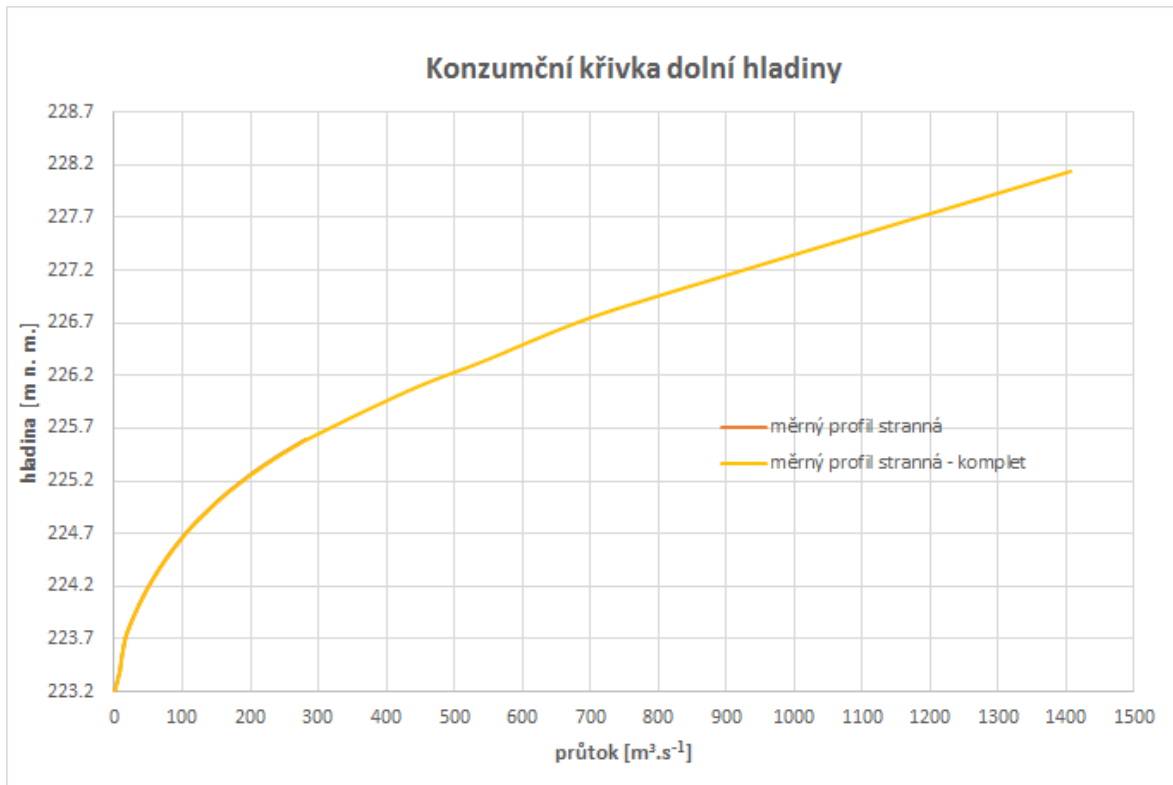
Hlavním účelem vývaru je tlumení kinetické energie vodního proudu, aby dno koryta pod vodním dílem bylo schopno odolávat nepříznivým účinkům vody. Kinetickou energii vody tlumíme ve vývaru, rozrážeci, odražeci, prahem nebo bezvývarovým způsobem pomocí vodního skoku.

Přechod z bystrinného proudění na říční je pomocí vodního skoku. Nejvýhodnějším způsobem je vytvoření přilehlého vodního skoku ve vývaru nebo kombinací rozrážeců a vývaru.

### 11.4.1 Geometrie

Vývar na vodním díle Nechanice má lichoběžníkový tvar o délce 75 m se sklony svahů 1:2. Šířka dna je 26 m s kótou 216,7 m n. m. Tloušťka betonové desky dna je 3 m s vrstvou šterkopísku o tloušťce 50 cm. Břehové hrany jsou na úrovni 232 m n. m a postupně se od paty dna vývaru zužují. Pojezdová cesta u horní hrany svahů má šířku 4 m. [9]

### 11.4.2 Úroveň hladiny dolní vody



Obr. 11.12 - Konzumční křivka dolní hladiny profilu Stranná

### 11.4.3 Výpočet a posouzení kapacity vývaru bezpečnostního přelivu

Prvním úkolem pro správný návrh a posouzení vývaru bylo určení návrhového průtoku tak, aby hloubka vývaru byla dostatečná pro všechny možné průtoky.

Vstupní hodnoty horní hladiny byly převzaty z výpočtu průběhu hladin v kap. 11.3.2. Hodnoty úrovně dolní hladiny vody byly na základě známého průtoku odečteny z konzumční křivky viz. Obr. 11.12.

Pro návrh hloubky vývaru byla zapotřebí stanovit vzájemné hloubky  $y_1$  bystrinného proudění a  $y_2$  říčního proudění. [3]

Vztah vychází z Bernoulliho rovnice:

$$E_0 = y_1 + \frac{v^2}{2g\varphi^2} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2\varphi^2}$$

kde  $q$  je specifický průtok na 1 m šířky

$\varphi$  rychlostní součinitel vyjadřující poměr skutečné a teoretické rychlosti



Z věty o hybnosti je možný výpočet druhé vzájemné hloubky pro lichoběžníkové koryto například Newtonovou metodou. [3]

$$Z_T = \frac{y}{6} \left( \frac{3 \cdot b + 2 \cdot m \cdot y}{b + m \cdot y} \right)$$

kde  $m$  je sklon svahu 1:m  
 $b$  šířka ve dně

$$\pi_y = \frac{\beta \cdot Q^2}{g \cdot S} + S \cdot Z_T$$

kde  $\beta$  Boussinesquovo číslo, které charakterizuje nerovnoměrné rozdělení hybnosti v průřezu  
 $S$  plocha průtočného průřezu  
 $Z_T$  hloubka těžiště průřezu pod hladinou

Pro výpočet vzájemných hloubek platí:  $\pi_{y_1} = \pi_{y_2}$

Výpočet délky vývaru byl vypočten dle Nováka pro který platí vztah:

$$l_v = K \cdot (y_2 - y_1)$$

kde pro  $3 < \frac{y_2}{y_1} < 4$  je  $K = 5,5$        $6 < \frac{y_2}{y_1} < 20$  je  $K = 4,5$   
 $4 < \frac{y_2}{y_1} < 6$  je  $K = 5$        $\frac{y_2}{y_1} > 20$  je  $K = 4$

K celkové délce vývaru je ovšem třeba uvažovat i doskok paprsku  $l_p$

$$l_p = 0,3h_0 + 1,65\sqrt{h_0(s_d + 0,32h_0)}$$

Výsledná délka vývaru je:  $l_v = l_p + l_s$

Výsledná délka i hloubka vývaru je zaokrouhlena na 5 cm. [1]

Výpočet dimenze vývaru bezpečnostního přelivu VD Nechanice byl stanoven pro průtoky  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{10\,000}$  viz. Obr. 11.13.

Hloubka vývaru činí 6,5 m. Z návrhu vychází hloubka vývaru 6,4 m. Na základě výpočtu bylo rozhodnuto, že hloubka stávajícího vývaru je dostatečná.

Celková délka vývaru je 75 m, z toho je délka doskoku 30 m a délka samotného vývaru 45 m. Výpočtem bylo zjištěno, že požadovaná délka vývaru je 75.7 m.

Závěrem porovnání stávajícího stavu a vypočítaného návrhu bylo usouzeno, že stávající stav je dostatečně nadimenzován pro bezpečné převedení  $Q_{10\,000}$ .

N [rok]	1	10	100	10000
$Q_N$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	199.0	453.0	753.0	1407.0
b [m]	46.8	46.8	46.8	46.8
q [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	4.25	9.68	16.09	30.06
$y_d$ [m]	2.02	2.92	3.66	4.94
h [m]	0.75	1.02	1.38	2.04
v [ $m \cdot s^{-1}$ ]	5.67	9.46	11.68	14.70
$h_{D0}$ [m]	1.64	4.56	6.95	11.02
$\varphi$ [-]	0.6	0.6	0.6	0.6
$y_c$ [m] oprava	0.58	1.07	1.56	2.53
d [m] volim	2.20	3.50	4.70	6.40
E	8.41	12.91	16.85	23.28
$y_c$ [m]	<b>0.57</b>	<b>1.06</b>	<b>1.55</b>	<b>2.48</b>
poměr $y_c=1$	1.01	1.01	1.01	1.02
$y_2$ [m]	<b>3.87</b>	<b>6.07</b>	<b>7.91</b>	<b>10.73</b>
$\sigma=<1,05;1,1>$	1.09	1.06	1.06	1.06
Zt1	0.28	0.52	0.75	1.18
Zt2	1.79	2.71	3.45	4.55
$\pi(y1)$	264.46	718.15	1316.75	2714.66
$\pi(y2)$	264.46	718.15	1316.75	2714.66
$y_2/y_c$	6.77	5.73	5.11	4.32
K (-)	4.50	5.00	5.00	5.00
$l_d$ [m]	10.64	18.60	24.66	34.46
$l_s$ [m]	14.85	25.05	31.79	41.21
$l_v$ [m]	25.49	43.65	56.45	75.68
nejhlubší d [m]	<b>6.40</b>			
nejdelší $l_v$ [m]	<b>75.68</b>			

Obr. 11.13 - Výpočet dimenze vývaru

## 12 ZÁVĚR

Výsledkem bakalářské práce je určení vhodného uzávěru krajních polí bezpečnostního přelivu a celkové posouzení VD Nechanice na převedení povodňového průtoku  $Q_{10\,000}$ .

Ze studie na posouzení vhodného uzávěru krajních polí bezpečnostního přelivu byla z mnoha důvodů zvolena varianta klapkového uzávěru. Klapkové uzávěry jsou v dnešní době velmi oblíbené hradící konstrukce z důvodů jejich dobré a přesné manipulovatelnosti s přesností na 1 cm, dalším důvodem je dobrá tuhost konstrukce při odolávání konstrukce na krut.

Byl sestaven fyzikální model, který se skládá z hráze, předpolí, vlnolamu, přelivu, skluzu a rozrážečů a pomocí matematického modelování byla ověřena korektnost nátokových podmínek při zvolené velikosti nádrže fyzikálního modelu na Katedře hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

Výpočet konzumčních křivek byl po porovnání s naměřenými hodnotami na fyzikálním modelu posouzen jako málo přesný, jelikož rozdíly od naměřených hodnot na fyzikálním modelu se místy pohybovaly mezi 5 % až 40 %.

Průběh hladiny ve skluzu, který navazuje na trojici přelivných polí, byl ověřen na návrhový průtok  $Q_{10\,000}$ , kde kapacita skluzu pro převedení tohoto povodňového průtoku byla označena jako dostatečná. Výpočet průběhu hladin pro jednotlivé návrhové průtoky  $Q_1$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{1000}$  byl také použit jako vstupní hodnota pro otestování dostatečné kapacity vývaru.

Vývar, jehož hlavním účelem je utlumení kinetické energie vody, je lichoběžníkového tvaru se šířkou ve dně 26 m, hloubkou 6,5 m a délkou 75 m. Na základě výpočtu, který vychází z Bernoulliho rovnice, vyšla požadovaná hloubka vývaru je 6,4 m a délka 75,7 m. Na výpočet požadované délky vývaru existuje několik úhlů pohledu, které se vzájemně liší v řádech desítkách metrů, tudíž bylo usouzeno, že vývar je společně se skluzem také dostatečně kapacitní pro převedení návrhového povodňového průtoku  $Q_{10\,000}$ .

Celkové posouzení kapacity bezpečnostního přelivu VD Nechanice bylo pro návrhový transformovaný kulminační průtok  $Q_{10\,000} = 1329 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dle metodiky ČSN 75 2935 se vodní dílo považuje za bezpečné při platnosti relace  $KMH \leq MBH$ . Pro VD Nechanice byla určena  $MBH = 273,95 \text{ m n. m.}$  a  $KMH = 273,54 \text{ m n. m.}$  Naměřená úroveň hladiny v nádrži při kulminačním průtoku  $Q_{10\,000} = 1329 \text{ m}^3/\text{s}$  byla 273,42 m n. m, což je o 53 cm níže, než mezní bezpečná hladina. VD vyhovuje kritériím ČSN 75 2935.

## Použitá literatura a prameny

- [1] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. Hydraulika: příklady. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01586-6.
- [2] KOLÁŘ, Václav. Hydraulika. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.
- [3] MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA. Hydrotechnické stavby 1: navrhování jezů. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04309-7.
- [4] SATRAPA, Ladislav a kolektiv. Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti hydrostatických uzávěrů hydrotechnických staveb. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.
- [5] SATRAPA, Ladislav a kolektiv. Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti klapkových uzávěrů hydrotechnických staveb. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.
- [6] SATRAPA, Ladislav a kolektiv. Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti segmentových uzávěrů hydrotechnických staveb. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.
- [7] SATRAPA, Ladislav a kolektiv. Metodika pro rozbor a srovnání spolehlivosti stavidlových uzávěrů hydrotechnických staveb. Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.
- [8] SATRAPA, Ladislav a Martin KÁLÍK a Jitka KUČEROVÁ a Miroslav BROUČEK a Martin HORSKÝ. VD NECHRANICE rekonstrukce krajních polí bezpečnostního přelivu. České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [9] PAIL, Tomáš a Vlasta Kovaříková. Manipulační řád pro VD Nechanice. Povodí Ohře, s. p. – odbor vodohospodářského rozvoje oddělení manipulačních řádů a nádrží, aktualizace 2008.
- [10] ŠULC, Sebastian. Provozní řád pro vodní dílo Nechanice. 2012.
- [11] Povodí Ohře, s. p. <http://www.poh.cz/vd/nechanice.htm>
- [12] NATURE 2000 <http://www.nature.cz/natura2000-design3/sub-text.php?id=1804>
- [13] AOPK ČR <http://www.ochranaprirody.cz/>

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 - Katastrální mapa.....	5
Obr. 2.2 - Hydrologické údaje VD Nechanice .....	6
Obr. 2.3 - Pole bezpečnostního přelivu.....	11
Obr. 2.4 – Řez turbínou.....	14
Obr. 2.5 - Příčný řez přelivem – středním, zdvižným segmentem .....	15
Obr. 2.6 - Příčný řez přelivem – krajními, hydrostatickými segmenty.....	16
Obr. 4.1 - Rozšíření Husy polní na území ČR .....	18
Obr. 5.1 - Výsledky studie spolehlivosti jednotlivých jezových konstrukcí .....	23
Obr. 6.1 - Přehled převzatých měření na fyzikálním modelu VD Nechanice Katedra hydrotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze .....	27
Obr. 6.2 - Přehled měření na fyzikálním modelu VD Nechanice.....	27
Obr. 7.1 - Výtok pod segmentem určení úhlu $\delta$ .....	28
Obr. 7.2 - Hodnoty $\varepsilon_v$ pro segment.....	28
Obr. 7.3 - Hodnoty $\mu_v$ pro segment.....	29
Obr. 7.4 - Výpočet konzumční křivky M9.....	30
Obr. 7.5 - Konzumční křivka M9.....	31
Obr. 7.6 - Výpočet konzumční křivky M10.....	32
Obr. 7.7 - Konzumční křivka M10.....	32
Obr. 7.8 Výpočet konzumční křivky M11 .....	33
Obr. 7.9 Konzumční křivka M11 .....	34
Obr. 7.10 - Výpočet konzumční křivky M12.....	34
Obr. 7.11 - Konzumční křivka M12.....	35
Obr. 7.12 - Rekapitulace výpočtů konzumčních křivek segmentového zdvižného uzávěru.....	36
Obr. 7.13 - Konzumční křivky zdvižného segmentu v různých polohách - výpočet... 36	36
Obr. 7.14 - Součinitel přepadu pro typovou klapku.....	37
Obr. 7.15 - Výpočet konzumční křivky M13 – výpočet I.....	38
Obr. 7.16 - Výpočet konzumční křivky M13 – výpočet II .....	38
Obr. 7.17 - Konzumční křivka M13.....	39
Obr. 7.18 - Výpočet konzumční křivky M14 – výpočet II .....	40
Obr. 7.19 - Konzumční křivka M14.....	40

Obr. 7.20 - Výpočet konzumční křivky M16 – výpočet I.....	41
Obr. 7.21 - Výpočet konzumční křivky M16 – výpočet II .....	42
Obr. 7.22 - Konzumční křivka M16.....	42
Obr. 7.23 - Výpočet konzumční křivky M17 – výpočet I.....	43
Obr. 7.24 - Výpočet konzumční křivky M17 – výpočet II .....	43
Obr. 7.25 - Konzumční křivka M17.....	44
Obr. 7.26 - Konzumční křivky klapkového uzávěru pro různé polohy .....	45
Obr. 7.27 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumčních křivek klapkového uzávěru.....	45
Obr. 8.1 - Konzumční křivky zdvižného segmentu v závislosti na poloze uzávěru ....	49
Obr. 8.2 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumčních křivek zdvižného segmentu.....	50
Obr. 8.3 - Konzumční křivky dutých klapek v závislosti na poloze uzávěru .....	51
Obr. 8.4 - Rekapitulace jednotlivých výsledků měření konzumčních křivek klapkového uzávěru.....	52
Obr. 9.1 – Porovnání naměřených konzumčních křivek segmentového uzávěru s výpočtem .....	53
Obr. 9.2 - Porovnání naměřených konzumčních křivek dutých klapek s výpočtem ...	54
Obr. 10.1 - Porovnání konzumčních křivek nového a starého stavu s Manipulačním řádem .....	55
Obr. 10.2 – Porovnání měření M3 a M6 .....	55
Obr. 11.1 - Fotografie horní části skluzu bezpečnostního přelivu VD Nechanice .....	56
Obr. 11.2 - Fotografie střední a dolní části skluzu bezpečnostního přelivu VD Nechanice .....	57
Obr. 11.3 - Podélný a příčné řezy skluzem .....	57
Obr. 11.4 - Shrnutí výpočtu režimu proudění .....	59
Obr. 11.5 Schéma výpočtu hladiny nerovnoměrného proudění .....	60
Obr. 11.6 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok $Q_1$ ve skluzu bezpečnostního přelivu.....	62
Obr. 11.7 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok $Q_{10}$ ve skluzu bezpečnostního přelivu.....	62
Obr. 11.8 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok $Q_{100}$ ve skluzu bezpečnostního přelivu.....	63

Obr. 11.9 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok $Q_{10\ 000}$ ve skluzu bezpečnostního přelivu .....	63
Obr. 11.10 – Fotografie z měření M3 při průtoku $Q_{10\ 000}$ .....	64
Obr. 11.11 - Porovnání průběhu hladin pro N-letý průtok $Q_{10\ 000}$ pro různé hodnoty Manningova drsnostního součinitele .....	65
Obr. 11.12 - Konzumní křivka dolní hladiny profilu Stranná .....	66
Obr. 11.13 - Výpočet dimenze vývaru .....	68

## Seznam příloh

Příloha č.1 Hydrostatický segment – spodní stavba
Příloha č.2 Hydrostatický segment – hradící těleso
Příloha č.3 Hydrostatický segment – podpěry a těsnění
Příloha č.4 Hydrostatický segment – pohony
Příloha č.5 Klapkový uzávěr – spodní stavba
Příloha č.6 Klapkový uzávěr – hradící těleso
Příloha č.7 Klapkový uzávěr – podpěry a těsnění
Příloha č.8 Klapkový uzávěr – pohony
Příloha č.9 Segmentový uzávěr – spodní stavba
Příloha č.10 Segmentový uzávěr – hradící těleso
Příloha č.11 Segmentový uzávěr – podpěry a těsnění
Příloha č.12 Segmentový uzávěr – pohony
Příloha č.13 Stavidlový uzávěr – spodní stavba
Příloha č.14 Stavidlový uzávěr – hradící těleso
Příloha č.15 Stavidlový uzávěr – podpěry a těsnění
Příloha č.16 Stavidlový uzávěr – pohony
Příloha č.17 Výpočet průběhu hladiny bystrinného nerovnoměrného proudění $Q_1$
Příloha č.18 Výpočet průběhu hladiny bystrinného nerovnoměrného proudění $Q_{10}$
Příloha č.19 Výpočet průběhu hladiny bystrinného nerovnoměrného proudění $Q_{100}$
Příloha č.20 Výpočet průběhu hladiny bystrinného nerovnoměrného proudění $Q_{10\ 000}$