



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky

**Ověření hydraulických podmínek pianového přelivu  
navrženého pro VD Finklův rybník na fyzikálním modelu**

**Verification of the hydraulic conditions of the pianokey  
spillway designed for HS Finklův rybník on laboratory model**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Bc. Marie Kozáková**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

Praha, 2024

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kozáková Jméno: Marie Osobní číslo: 484538  
Zadávací katedra: k142 - Katedra hydrotechniky  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Ověření hydraulických podmínek pianového přelivu navrženého pro VD Finklův rybník na fyzikálním modelu

Název diplomové práce anglicky: Verification of the hydraulic conditions of the pianokey spillway designed for HS Finklův rybník on a laboratory model

#### Pokyny pro vypracování:

Ve vhodném měřítku délek, respektujícím parametry laboratorního žlabu a limity přibližné mechanické podobnosti, zhotovte model pianového přelivu navrženého v bakalářské práci. Při tvorbě modelu využijte 3D modelování, které usnadní následný konstrukční návrh.

Na modelu proveďte měření kapacity (konsumpční křivky přelivu) a tlaků ve vybraných místech. Konsumpční křivku měřte až do překročení kontrolního průtoku pro VD Finklův rybník.

Vyhodnoťte hydraulické podmínky na vtoku a v oblasti přelivu a potřeby úpravy návrhu přelivu i předpolí. Srovnajte získanou konsumpční křivku s teoretickými výpočty pro nehrazený hydraulicky vhodně tvarovaný přeliv.

Pro výsledný optimální návrh přelivu zpracujte projektovou dokumentaci.

#### Seznam doporučené literatury:

Kolář, V., Bém, J. a Patočka, C.: *Hydraulika*, SNTL, Praha 1983;

Gabriel, P., Čábelka, J.: *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*, Academia, Praha 1987

odborná a vědecká literatura z oblasti fyzikálního modelování a navrhování labyrintových a pianových přelivů

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 29.9.2023

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2024

Údaj uveďte v den a měsíc roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.*

29.9.2023

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracovala samostatně pouze s použitím zdrojů a literatury v ní uvedených v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze, dne 8. 1. 2024

.....

Marie Kozáková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Miroslavu Broučkovi Ph.D. za jeho ochotu a čas, který mi věnoval při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. za jeho pomoc se stavbou fyzikálního modelu a následné měření v laboratoři. Díky patří i kolegovi Bc. Václavu Strejčkovi za pomoc při tvorbě 3D modelu.

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je ověření hydraulických podmínek pianového labyrintového přelivu navrženého pro VD Finklův rybník na fyzikálním modelu. V práci jsou popsány podmínky mechanické podobnosti na základě, kterých je sestaven fyzikální model. V praktické části práce je ověřena kapacita pianového přelivu. Konzumční křivka modelu neodpovídá teoretickým výpočtům a návrh bezpečnostního přelivu je nutné optimalizovat. Po úpravě geometrických parametrů a součinitele přepadu je uveden finální návrh labyrintového pianového přelivu pro vodní dílo. Práce v budoucnu může sloužit jako podklad pro další stupeň projektové dokumentace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fyzikální hydraulické modelování, bezpečnostní přeliv, labyrintový pianový přeliv, Finklův rybník

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is to verify the hydraulic conditions of the pianokey labyrinth spillway designed for the HS Finklův rybník on laboratory model. The thesis describes the mechanical similarity conditions on the basis of which the physical model is constructed. In the practical part of the work the capacity of the pianokey labyrinth spillway is verified. The configuration curve of the model does not match the theoretical calculations and the design of the safety spillway needs to be optimized. After adjusting the geometrical parameters and the overflow coefficient, the final design of the labyrinth pianokey spillway for the reservoir is presented. The work can serve as a basis for the next stage of design documentation in the future.

## **KEY WORDS**

Physical hydraulic modelling, safety spillway, labyrinth piano spillway, Finklův rybník

## OBSAH

1	Úvod a cíl práce	1
1.1	Úvod .....	1
1.2	Cíl práce .....	1
2	Fyzikální hydraulické modelování	2
2.1	Definice .....	2
2.2	Základní principy .....	2
2.3	Rozměrová analýza .....	3
2.3.1	Dynamická podobnost .....	3
2.3.2	Efekty měřítka .....	4
2.4	Modelování proudění s volnou hladinou .....	4
2.4.1	Froudovo kritérium .....	4
2.4.2	Odpor proudění .....	5
2.5	Návrh fyzikálního modelu .....	5
3	Labyrintové přelivy pianového typu	7
3.1	Tvar pianového labyrintového přelivu .....	7
3.2	Hydraulika pianového přelivu .....	8
4	Použité podklady	9
4.1	Literatura a normy .....	9
4.2	Mapové a geodetické podklady .....	9
5	Základní údaje vodního díla Finklův rybník	10
5.1	Lokalita Finklova rybníku .....	10
5.2	Účel a užívání stavby .....	10
5.3	Kapacita vodního díla .....	10
5.4	Hlavní technické parametry .....	11
5.5	Údaje o vodním toku .....	11
5.6	Hydrologické údaje .....	11
6	Posouzení bezpečnosti hráze za povodní	13
6.1	Bezpečnostní přeliv – současný stav .....	13
6.2	Stavidlová výpust – současný stav .....	13
6.3	Výška výběhu větrových vln .....	14
6.4	Mezní bezpečná hladina .....	14

6.5	Kontrolní maximální hladina .....	14
6.5.1	V průběhu povodně nedojde k manipulaci se stavidlovou výpustí.....	14
6.5.2	V průběhu povodně se manipuluje dle manipulačního řádu.....	15
6.6	Návrh opatření .....	15
7	Labyrintový přeliv pianového typu - model	16
7.1	Hydrotechnické výpočty .....	16
7.2	Měřítko modelu.....	20
7.3	Měření hladiny .....	21
7.4	Měření tlaků ve vybraných místech.....	21
7.5	Konzumční křivka modelu .....	25
8	Porovnání konzumční křivky výpočet – model	26
9	Optimalizace návrhu	28
9.1	Prodloužení délky přelivné hrany .....	28
9.2	Tvar přelivné hrany.....	30
9.2.1	Porovnání konzumčních křivek pro různé přelivné hrany .....	31
9.2.2	Porovnání tlaků pro různé přelivné hrany .....	31
9.2.3	Rozšíření studie použité k hydrotechnickým výpočtům .....	37
9.2.4	Výběr tvaru přelivné hrany.....	37
9.3	Optimalizovaný návrh labyrintového pianového přelivu .....	38
10	Závěr	40
11	Seznam použitých zdrojů	41
12	Seznam použitých zkratk	42
13	Seznam obrázků	43
14	Seznam tabulek	44
15	Seznam rovnic	45
16	Seznam příloh	46
	Fotodokumentace	47
	Grafy průběhu tlaků	56

# 1 Úvod a cíl práce

## 1.1 Úvod

V České republice existuje nespočet malých vodních nádrží. Hráze, funkční a bezpečnostní objekty těchto děl jsou často v nevyhovujícím technickém stavu a postupně dochází k jejich rekonstrukci. Často je potřeba navýšení kapacity bezpečnostních objektů. Kapacitu bezpečnostního přelivu ovlivňuje mnoho parametrů např. délka a tvar přelivné hrany, hydraulické podmínky na vtoku a součinitel přepadu. I přes zlepšující se možnosti softwaru a častější aplikace numerických simulací, mají fyzikální modely nezastupitelnou roli ve výzkumu hydrotechnických staveb.

Fyzikální modely se běžně využívají ve fázi návrhu k optimalizaci konstrukce a k zajištění bezpečného provozu stavby. Jedná se o nejrozšířenější a nejvšestrannější metodu řešení hydraulických problémů. Výhodou je možnost řešení i prostorově složitých hydraulických jevů, které numerické modely nedovedou dostatečně spolehlivě vyřešit. I když je zhotovení fyzikálního modelu časově a finančně náročné, jsou celkové náklady na výzkum řádově nižší než dodatečné úpravy konstrukcí, případně zvýšené provozní náklady.

## 1.2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je ověření hydraulických podmínek pianového přelivu navrženého pro VD Finklův rybník na fyzikálním modelu. Diplomová práce je členěna na dvě hlavní části – teoretickou a praktickou. Teoretická část je úvodem do problematiky fyzikálního modelování a labyrintových přelivů. Dále jsou uvedeny základní informace o Finklově rybníku i s popisem současného stavu bezpečnostního přelivu.

Součástí praktické části je tvorba modelu dle návrhu z bakalářské práce, ověření kapacity modelu v laboratorním žlabu a sestavení konzumční křivky. Porovnání získané konzumční křivky s teoretickým výpočtem a na základě toho následná úprava návrhu labyrintového pianového přelivu.



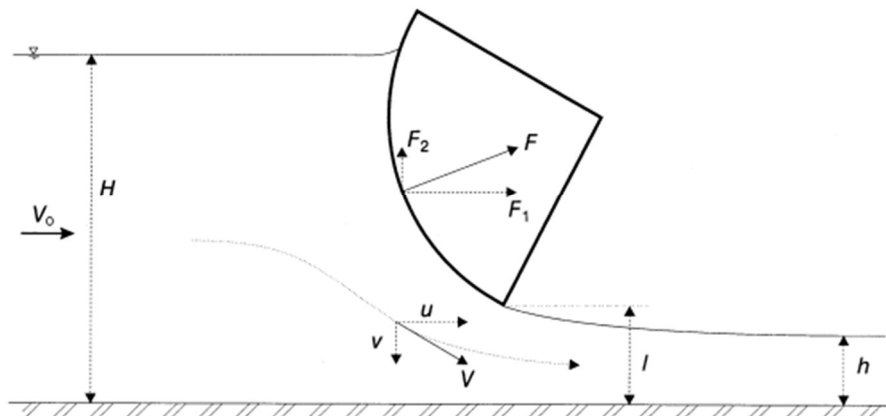
## 2 Fyzikální hydraulické modelování

### 2.1 Definice

Fyzikální modelování je experimentální metoda založená na podobnosti hydrodynamických jevů mezi dvěma reálnými systémy, ve kterém jeden prezentuje skutečnost (prototyp) a druhý je jeho zobrazení (model). Vzájemné vztahy mezi prototypem a modelem je možné matematicky formulovat pomocí zákonů mechanické podobnosti. Většina hydraulických modelů používá podobnost buď podle Frouda nebo Reynoldse, tzn. zvolené bezrozměrné číslo je stejné v modelu i v prototypu.

### 2.2 Základní principy

Podmínky proudění v rámci fyzikálního modelu jsou považovány podobné podmínkám na prototypu, pokud jsou splněny tři základní aspekty podobnosti – geometrická, kinematická a dynamická.



Obrázek 1: Základní parametry proudění [1]

*Geometrickou podobnost* určuje poměr mezi charakteristickou délkou na prototypu a na modelu následujícím vztahem:

$$L_r = \frac{l_p}{l_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad 2.1$$

kde indexy  $p$  a  $m$  popisují parametr prototypu, resp. modelu. Index  $r$  označuje poměr mezi prototypovou a modelovou veličinou. Geometrická podobnost se týká veličin jako jsou délka, plocha a objem.

*Kinematická podobnost* je definována poměrem mezi charakteristickou rychlostí na prototypu a na modelu následujícím vztahem:

$$v_r = \frac{v_p}{v_m} \quad 2.2$$

*Dynamická podobnost* znamená, že poměry sil na prototypu a na modelu jsou si rovné dle vztahu:

$$F_r = \frac{(F_1)_p}{(F_1)_m} = \frac{(F_2)_p}{(F_2)_m} \quad 2.3$$

Dalšími parametry dynamické podobnosti jsou práce a výkon.

## 2.3 Rozměrová analýza

Základní parametry potřebné pro analýzu rozměrů můžeme rozdělit do následujících skupin:

- a) Vlastnosti kapaliny a fyzikální konstanty
  - Hustoty vody  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
  - Dynamická viskozita vody  $\mu$  (N s/m<sup>2</sup>)
  - Povrchové napětí vody a vzduchu  $\sigma$  (n/m)
  - Modul objemové pružnosti vody  $E_b$  (Pa)
  - Tíhové zrychlení  $g$  (m/s<sup>2</sup>)
- b) Geometrie toku nebo kanálu. Skládá se z charakteristických délek  $L$  (m).
- c) Vlastnosti průtoku. Jako je rychlost  $v$  (m/s) a rozdíl tlaků  $\Delta P$  (Pa).

Z těchto osmi základních parametrů získáme rovnici  $\mathcal{F}_1$  (2.4). Parametry z této rovnice se dají rozdělit do tří kategorií – hmotnost, délka a čas. Při použití Buckinghamova  $\pi$  teorému se základní parametry seskupí do 5 (8-3=5) nezávislých bezrozměrných skupin. Díky tomu lze rovnice  $\mathcal{F}_1$  (2.4) upravit na rovnici  $\mathcal{F}_2$  (2.5).

$$\mathcal{F}_1(\rho, \mu, \sigma, E_b, g, L, V, \Delta P) = 0 \quad 2.4$$

$$\mathcal{F}_2\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}; \frac{\rho v^2}{\Delta P}; \frac{\rho v L}{\mu}; \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}}; \frac{v}{\sqrt{\frac{E_b}{\rho}}}\right) = 0 \quad 2.5$$

$$\mathcal{F}_2(Fr; Eu; Re; We; Ma) = 0 \quad 2.6$$

$Fr$  – Froudovo číslo je první bezrozměrný parametr a udává poměr setrvačných sil k síle gravitační.  $Eu$  je Eulerovo číslo, odpovídá poměru setrvačných a tlakových sil. Třetím poměrem je Reynoldsovo číslo  $Re$ , které je vyjádřeno jako poměr setrvačných sil k viskózním silám. Weberovo číslo  $We$  je poměr mezi setrvačnými silami a silami povrchového napětí. Posledním parametrem je Machovo číslo  $Ma$ , to charakterizuje poměr setrvačné síly k síle pružnosti.

### 2.3.1 Dynamická podobnost

Ve výzkumu vodních staveb se provádějí studie pomocí geometricky podobných modelů. Dynamická podobnosti u geometricky podobných modelů je dosaženo, když má každý bezrozměrný parametr stejnou hodnotu na modelu i prototypu. V případě, že

jeden nebo více parametrů mají různé hodnoty v modelu a prototypu projeví se efekt měřítka.

V laboratoři se zkoušky hydraulických modelů provádějí v kontrolovatelných podmínkách, což umožňuje zacházet s rozdílem tlaků  $\Delta P$  jako se závislým parametrem. Účinky stlačitelnosti jsou malé u čisté vody a Machovo číslo je obvykle velmi malé v modelu, tak i v prototypu. U většiny hydraulických modelů se tak dynamická podobnost řídí rovnicí:

$$\mathcal{F}_3 (Fr, Re, We, ) = Eu \quad 2.7$$

Při použití stejné kapaliny na modelu a prototypu není možné dosáhnout stejných hodnot bezrozměrných parametrů  $Fr$ ,  $Re$  a  $We$ , protože podobnost podle Froudova čísla je  $v_r = \sqrt{L_r}$ , podobnost podle Reynoldsova čísla je  $v_r = 1/L_r$  a podobnost podle Weberova čísla se vyjadřuje  $v_r = 1/\sqrt{L_r}$ . Ve většině případů se modeluje pouze podle nejdominantnější síly. Například v plně uzavřených profilech (např. potrubí) jsou dominantní tlakové ztráty a modelová podobnost je vztažena k Reynoldsovu číslu. Proudění s volnou hladinou je výhradně ovlivňováno gravitačními silami, proto se modeluje podle Froudova čísla.

Některé kapaliny mohou mít stejné Reynoldsovo a Froudovo číslo u modelu i prototypu, ale použití těchto kapalin je často nepraktické a neekonomické.

### 2.3.2 Efekty měřítka

Efekt měřítka je jev, při kterém nedominantní vlivy způsobují zkreslení. Projevuje se, pokud je jeden nebo více bezrozměrných parametrů odlišných mezi modelem a prototypem. Zkreslení bývá často malé, ale ne vždy zcela zanedbatelné.

## 2.4 Modelování proudění s volnou hladinou

### 2.4.1 Froudovo kritérium

Podmínky pro modelování podle Froudova zákona mechanické podobnosti jsou dány převažující silou na modelu a na prototypu. V tomto případě dominuje gravitační síla a ostatní síly (např. kapilární síly, síly objemové pružnosti atd.) jsou malé a pro tento typ modelování zanedbatelné.

Při proudění s volnou hladinou (otevřené kanály, hydraulické stavby) se uplatňuje Froudův zákon mechanické podobnosti. Pro Froudovo kritérium platí vztah:

$$Fr = \frac{v_s^2}{gL_s} = \frac{v_m^2}{gL_m} = idem. \quad 2.8$$

$Fr$	Froudovo číslo (-)
$v$	vztažná rychlost (ve vztažném profilu) (m/s)
$L$	délkový rozměr (m)
$g$	tíhové zrychlení (m/s <sup>2</sup> )

Froudův zákon mechanické podobnosti vyjadřuje, že kinematically podobné jevy, jež jsou ovlivňovány výhradně gravitačními silami jsou si i dynamicky podobné, jestliže se v sobě vzájemných vztažných profilech obou těchto jevů budou stejné hodnoty Froudova kritéria. [2]

Modelová podobnost podle Froudova čísla se používá v případech, ve kterých jsou ztráty třením malé a proudění je silně turbulentní: např. přelivy, přelivné hráze, proudění kolem mostních pilířů nebo u vlnolamů.

Hlavním problémem je možnost vzniku zkreslení způsobeného vlivy viskózními silami. Dalším problémem způsobeným efektem měřítka představuje povrchové napětí, zejména dochází-li k provzdušňování volné hladiny. Povrchové napětí se neuplatní tehdy, pokud je přepadová výška modelu  $h \geq 20$  mm.

#### 2.4.2 Odpor proudění

Při modelování odporu proudění často nestačí podobnost výšky a rozteče nerovností. Na modelu je nutné dodržet stejný režim turbulentního proudění jako je ve skutečnosti. Proudění musí být v kvadratické oblasti, ve které nejsou ztráty třením funkcí Reynoldsova čísla. Může se stát, že proudění na modelu není tolik turbulentní jako na prototypu. Tyto nerovnosti se řeší použitím drsnostních prvků (např. sítí, drátů) ke zvýšení turbulence modelového proudění.

### 2.5 Návrh fyzikálního modelu

Pro zajištění spolehlivých výsledků je nutné mít před stavbou fyzikálního modelu k dispozici odpovídající topografické a hydrologické údaje. Poté se zvolí typ modelu, který se určí pomocí dominantní síly – viskozita, gravitace a povrchové napětí. Dalším krokem je výběr vhodného geometrického měřítka, které musí splňovat několik podmínek:

- 1) Zvolení nejmenšího poměru geometrického měřítka pro délku  $L_r$  modelu, aby se model vešel do vymezeného prostoru v laboratoři.
- 2) Pro měřítka  $L_r$  a pro zvolené kritérium podobnosti (Froude, Reynolds) zkontrolovat, zda je možné dosáhnout maximálního průtoku v daném měřítka.
- 3) Zkontrolovat odpor proudění v modelu. (Vhodně zvolené materiály)
- 4) Zkontrolovat Reynoldsovo číslo pro nejmenší zkušební průtok v modelu. Je-li proudění v prototypu turbulentní, musí být podmínky proudění v modelu také turbulentní.
- 5) Iterací zvolit vhodné měřítka.

Základní měřítka modelu pro Froudovu a Reynoldsovu podobnost jsou v tabulce č.1.

Tabulka 1: Základní měřítka modelu [3]

Veličina	Označení	Jednotka	Měřítka podobnosti	
			Froude: $M_{Fr}=1$	Reynolds: $M_{Re}=1$
Délka	L	(m)	geom. $M_L$	$M_L$
Plocha	S	(m <sup>2</sup> )	geom. $M_L^2$	$M_L^2$
Objem	V	(m <sup>3</sup> )	geom. $M_L^3$	$M_L^3$
Čas	t	(s)	dyn. $M_t=M_L^{-1/2}$	$M_t=M_L^2 \cdot M_v^{-1}$
Rychlost	u, v	(m/s)	dyn. $M_v=M_L^{1/2}$	$M_v=M_v \cdot M_L^{-1}$
Zrychlení	a, g	(m/s <sup>2</sup> )	$M_a=1$ při $M_g=1$	$M_L^{-3} \cdot M_v^2$
Úhlová rychlost	$\omega$	(s <sup>-1</sup> )	$M_L^{-1/2}$	$M_L^{-2} \cdot M_v$
Průtok	Q	(m <sup>3</sup> /s)	dyn. $M_Q=M_L^{5/2}$	$M_Q=M_L \cdot M_v$
Měrný průtok	q	(m <sup>2</sup> /s)	$M_L^{3/2}$	$M_v$
Hmotnost	m	(kg)	$M_L^3 \cdot M_\rho$	$M_L^3 \cdot M_\rho$
Síla	F	(kg.m.s <sup>-2</sup> )	$M_L^3 \cdot M_\rho \cdot M_g$	$M_\rho \cdot M_v^2$
Tlak	p	(kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> )	$M_L \cdot M_\rho \cdot M_g$	$M_L^{-2} \cdot M_\rho \cdot M_v^2$
Impuls, hybnost	I, H	(kg.m.s <sup>-1</sup> )	$M_L^{7/2} \cdot M_\rho$	$M_L^2 \cdot M_\rho \cdot M_v$
Energie, práce	E, A	(kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> )	$M_L^4 \cdot M_\rho \cdot M_g$	$M_L \cdot M_\rho \cdot M_v^2$
Sklon	i, i <sub>0</sub> , i <sub>E</sub>	-1	geom. $M_i=1$	$M_i=1$
Výkon	P	(kg.m/.s-3)	$M_L^{7/2} \cdot M_\rho \cdot M_g$	$M_L^{-1} \cdot M_\rho \cdot M_v^3$

### 3 Labyrintové přelivy pianového typu

V současnosti dochází ke zvyšování nároků na zásobní nádrže vody a s tím je spojená nedostatečná kapacita přelivů. Mnoho přelivů je nutné vyměnit nebo optimalizovat jejich tvar. Při hledání ideálního tvaru přelivné hrany s vysokým účinkem a s malými náklady se zjistilo, že nejlepším řešením je přeliv s nepřímou přelivnou hranou. Jedním řešením je vytvoření labyrintového přelivu, který při zachování stejné šířky jako má přímý přeliv, převede větší průtok. [4]

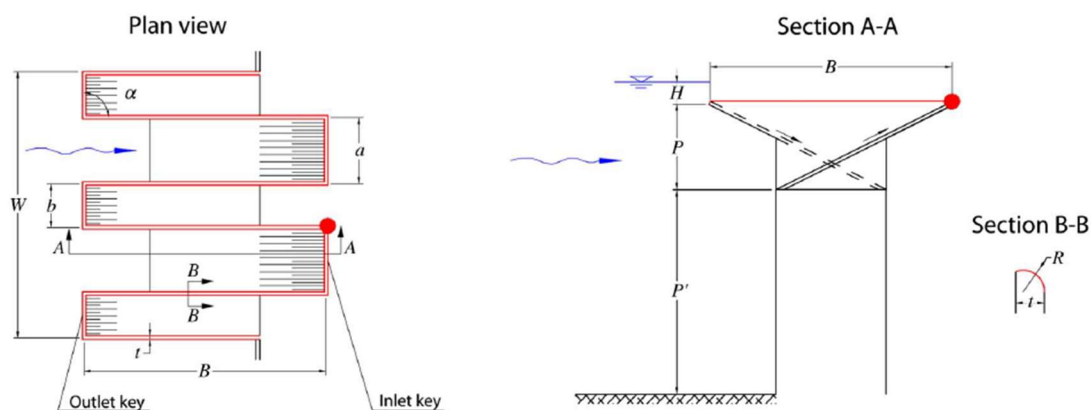
Klasické labyrintové přelivy mají relativně vysoké náklady na stavbu a nelze je snadno umístit na korunu běžných tížných přehrad. K jejich umístění je zapotřebí velká rovná plocha umožňující podepření svislých stěn a vybudování plochého dna jezů. Proto byl vyvinut nový druh labyrintového přelivu – Piano Key Weir (dále také jako PKW nebo přeliv pianového typu). Na rozdíl od klasických labyrintových přelivů jsou dna jednotlivých kláves nakloněna, což zvyšuje stabilitu konstrukce. Tím dojde ke zmenšení základové plochy a je snadnější jejich realizace na již stávajících hrázích. První realizace takového přelivu byla provedena v létě 2006 na přehradě EDF Goulours. Přeliv takového typu se ukázal jako ekonomické a efektivní řešení při zvýšení přelivné kapacity. [5]



Obrázek 2: PKW na přehradě Goulours (Frederic Laugier [11])

#### 3.1 Tvar pianového labyrintového přelivu

Labyrintový přeliv pianového typu se oproti klasickému labyrintovému přelivu vyznačuje složitější geometrií. Typicky má PKW přeliv obdélníkový půdorys s cyklicky se opakujícími vnějšími (outlet) a vnitřními (inlet) klávesami, které jsou nakloněny mimo půdorys základů přelivu (viz obrázek 3).



Obrázek 3: Schématický řez labyrintovým PKW přelivem [5]

Celkovou účinnost labyrintového pianového přelivu ovlivňují hlavně parametry spojené s geometrickým tvarem přelivu – celková délky přelivné hrany, výška přelivu, hloubka před přelivem, šířka přelivu, šířka vnitřních a vnějších kláves, šířka svislých stěn, úhel mezi vnitřní a vnější klávesou, šířka konstrukce a poloměr zakřivení přelivné hrany. Krom geometrie ovlivňuje celkový průtok hustota, kinematická viskozita, povrchové napětí, tíhové zrychlení a celková hydraulická výška  $H$ .

### 3.2 Hydraulika pianového přelivu

Hydraulické chování PKW je jiné ve srovnání s klasickým labyrintovým přelivem. U pianového přelivu je průtok rozdělen na dvě části. Jedna část přetéká přes vnitřní klávesu ve formě tenkého paprsku a druhá část přepadá přes vnější klávesu a sklouzá po jejím nakloněném dnu.

## 4 Použité podklady

### 4.1 Literatura a normy

Podkladem pro diplomovou práci byla literatura, odborné články a internetové zdroje týkající se problematiky hydraulického modelování a labyrintových přelivů. Hlavním podkladem byla bakalářská práce Zajištění bezpečnosti MVN Finklův rybník. Vzhledem k výpočetnímu a projekčnímu charakteru praktické části práce byly podkladem technické normy. Dalším podkladem pro zhotovení návrhu bezpečnostního přelivu byl odborný posudek technického stavu Vodní nádrž Petrohrad zhotovený pro Povodí Ohře, s. p. (červenec 2011). Všechny použité zdroje jsou uvedeny v *Seznamu použitých zdrojů*. Při zpracování diplomové práce byly použity programy Autodesk AutoCAD 2020, MS Office Word, MS Office Excel.

### 4.2 Mapové a geodetické podklady

Mapovým podkladem byl portál Mapy.cz a dále mapy, včetně katastrální dostupné na webových stránkách ČÚZK. Pro projekční část práce bylo využito geodetické zaměření a vrstevnicový plán poskytnuté Povodím Ohře. Zaměření bylo vyhotoveno ve výškovém systému Balt po vyrovnání a v souřadnicovém systému S-JTSK.

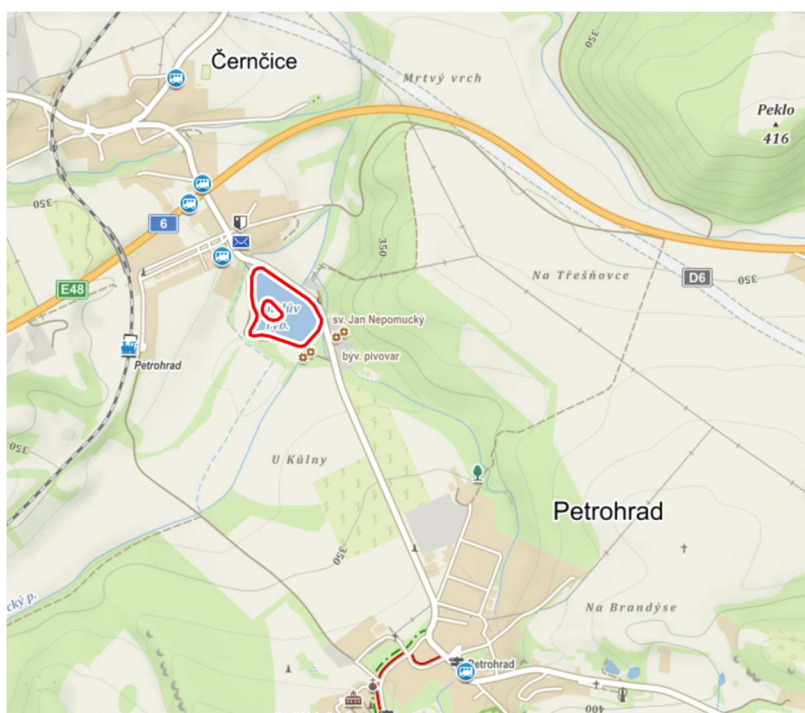


## 5 Základní údaje vodního díla Finklův rybník

Obsah této kapitoly je z bakalářské práce Zajištění bezpečnosti MVN Finklův rybník [4].

### 5.1 Lokalita Finklova rybníku

Finklův rybník se nachází v Ústeckém kraji v okrese Louny. Rybník leží severozápadně od obce Petrohrad. V současné době je spravován státním podnikem Povodí Ohře, s. p. Po koruně hráze vede asfaltová komunikace III. třídy Černčice – Petrohrad. V blízkosti rybníku stojí bývalý pivovar, který dříve odebíral vodu z nádrže.



Obrázek 4: Lokalita Finklova rybníku (Mapy.cz) [10]

### 5.2 Účel a užívání stavby

Finklův rybník, dříve nazýván „Finger-Petrohrad“, vznikl v 18. století. Vodní dílo fungovalo v minulosti jako zásobárna vody pro mlýn a později pro pivovar. V 70. letech 20. století sloužila nádrž pro závlahy. V současnosti jsou hlavními účely Finklova rybníku akumulace vody a extenzivní chov ryb pro sportovní rybolov, vedlejší účely vodního díla jsou například krajinnotvorný nebo retenční efekt. [6]

### 5.3 Kapacita vodního díla

V případě napouštění je nutné pod vodním dílem zachovávat minimální zůstatkový průtok v hodnotě  $Q_{330d} = 30 \text{ l/s}$ , není-li přítok nižší.

Neškodný odtok z vodního díla není stanoven. [7]

## 5.4 Hlavní technické parametry

Hlavní technické parametry uvedené v Manipulačním řádu (březen 2020) [7]:

Kategorie vodního díla:	IV.
Typ nádrže:	průtočná
Typ vzdouvací stavby:	zemní sypaná hráz
Délka hráze:	270 m
Max. výška hráze ze vzdušné strany:	4,8 m
Min. šířka koruny hráze:	5,9 m
Normální hladina:	$H_{\text{norm}} = 329,58 \text{ m n.m.}$
Nejnižší místo koruny hráze:	$H_{\text{kor.min}} = 330,92 \text{ m n.m.}$
Objem při normální hladině:	$V_{\text{norm}} = 41\,198 \text{ m}^3$
Objem vody po korunu hráze:	$V_{\text{kor}} = 72\,072 \text{ m}^3$
Retenční prostor nádrže:	$V_{\text{ret}} = 5\,596 \text{ m}^3$
Zatopená plocha při normální hladině:	$A_{\text{norm}} = 26\,000 \text{ m}^2$
Zatopená plocha při hladině po korunu:	$A_{\text{kor}} = 28\,600 \text{ m}^2$

## 5.5 Údaje o vodním toku

Název toku:	Podvinecký potok
Povodí:	Ohře
Délka toku:	17,9 km
Plocha povodí:	86,3 km <sup>2</sup>
Správce:	Povodí Ohře, s. p.

Finklův rybník leží na říčním kilometru 4,98 Podvineckého potoka. Podvinecký potok protéká převážně okresem Louny a je dlouhý 17,9 km. Plocha jeho povodí k profilu hráze je 55,27 km<sup>2</sup>. [8]

Podvinecký potok pramení v Plzeňském kraji západně od Pastuchovic v nadmořské výšce přibližně 480 m n. m. Je soutokem dvou zdrojnic, které se spojují před rybníkem u železniční trati Plzeň–Žatec. Z rybníka dále pokračuje na severovýchod, vtéká do Velečinského rybníka a z něj vychází dvěma rameny. Ta se vlévají do nádrže Blatno. Z ní protéká dál Stebenským rybníkem, u Černčic napájí Finklův rybník, odtud se stáčí na sever a v nadmořské výšce 300 m n. m. se vlévá zprava do Blšanky.

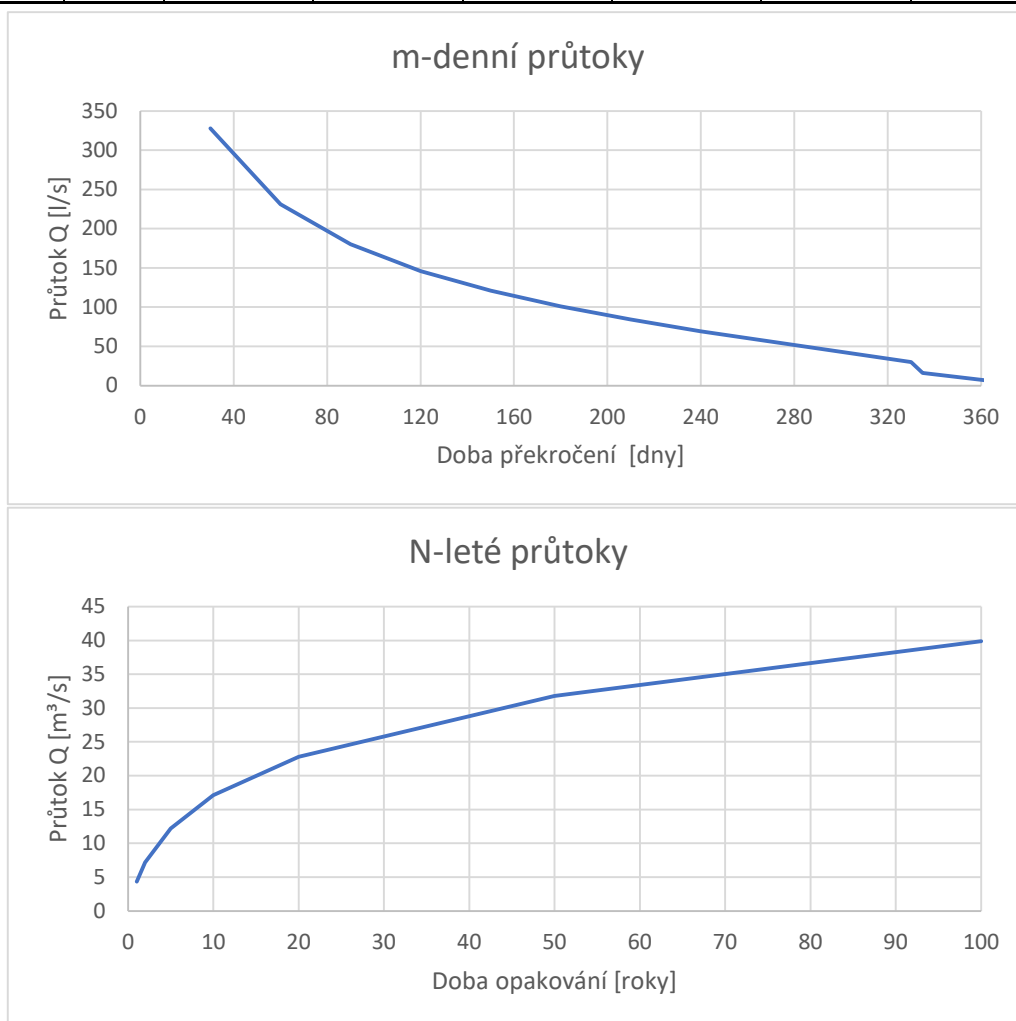
## 5.6 Hydrologické údaje

Pro zpracování diplomové práce byly použity hydrologické údaje uvedené v Manipulačním řádu schváleného v březnu 2020. Jedná se o údaje, které poskytl ČHMÚ, pobočka Ústí nad Labem, dne 23.3.2020, č.j. CHMI/541/271/2020. [7] Hydrologická data

se pro profil hráze Finklova rybníka nacházejí ve IV. třídě přesnosti. Na základě hydrologických dat byly sestaveny čára opakování N-letých průtoku a čára překročení m-denních průtoků.

Tabulka 2: Hydrologická data - Podvinecký potok (zdroj: ČHMÚ) [7]

Tok		Profil													
Podvinecký potok		hráz Finklova rybníka													
		Souřadnice v S-JTSK													
		X = -811 455						Y = -1 027 577							
Plocha povodí A [km <sup>2</sup> ]		Průměrná dlouhodobá roční hodnota:													
		srážek Pa [mm]						průtoku Q [l/s]							
57,88		532						143							
<b>M-denní průtoky [l/s]</b>															
M	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	335	364		
Qm	328	231	180	146	121	101	84	69	56	43	30	16	6,0		
<b>N-leté průtoky [m<sup>3</sup>/s]</b>															
N	1	2		5			10			20			50		100
Qn	4,35	7,18		12,2			17,1			22,8			31,8		39,9



Obrázek 5: Čára překročení m-denních průtoků a čára opakování N-letých průtoků (ČHMÚ) [7]

## 6 Posouzení bezpečnosti hráze za povodní

Obsah této kapitoly je z bakalářské práce Zajištění bezpečnosti MVN Finklův rybník [4].

Tato kapitola vychází z Odborného posudku technického stavu vodního díla z roku 2011 a z osobní prohlídky VD Finklův rybník v březnu 2022.

### 6.1 Bezpečnostní přeliv – současný stav

Vodní nádrž je vybavena pevným bezpečnostním přelivem na levém břehu hráze. Má přelivnou hranu dlouhou 3,24 m a jeho koruna je na kótě 329,58 m n. m. Jedná se o přímý postranní bezpečnostní přeliv, na který navazuje betonový vývar dlouhý 12,6 m. Na betonový vývar navazuje lichoběžníkové odpadní koryto opevněné kamenným záhozem. Odpadní koryto prochází mostním otvorem pod asfaltovou komunikací na koruně hráze. Koryto je dlouhé přibližně 300 m a ústí zleva do Podvineckého potoka. Kapacita pevného bezpečnostního přelivu při max. hladině v nádrži 330,36 m n. m. je dle manipulačního řádu 3,63 m<sup>3</sup>/s. [7]

### 6.2 Stavidlová výpust – současný stav

Finklův rybník je dále vybaven stavidlovou výpustí, která je umístěna v pravobřežním zavázání hráze.

Stavidlová výpust je tvořena čtyřmi ocelovými hradidly, každé o šířce 1,74 m. Hradidla jsou ovládána pomocí ručního zvedacího mechanismu – cévových tyčí. K ovládacímu mechanismu vede lávka z ocelových nosníků, na kterých je připevněn pororošt. Pod stavidly je krátké spadiště z kamenné dlažby, které vede pod most. Za mostem pokračuje nezpevněné otevřené koryto.

Povrch betonových konstrukcí stavidlové výpusti je poškozen povětrnostními vlivy. Kamenná dlažba dna skluzu je značně poškozena a místy z ní rostou malé křoviny. Ocelová stavidla i přes ochranný nátěr korodují.



Obrázek 6: Stavidlová výpust



Obrázek 7: Stavidlová výpust

### 6.3 Výška výběhu větrových vln

Pro určení výšky výběhu větrové vlny byl proveden výpočet dle ČSN 75 0255 Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích [9]. Výška výběhu větrových vln byla vypočtena jako **0,36 m**. Tento výsledek je shodný s výškou větrové vlny použitou v odborném posudku technického stavu Vodní nádrž Petrohrad [8].

### 6.4 Mezní bezpečná hladina

Mezní bezpečnou hladinu VD Finklův rybník lze uvažovat v nejnižším místě koruny hráze, sníženou o výšku výběhu větrových vln. Výška větrových vln byla vypočtena na  $h_v = 0,36$  m. Případné přelévání špiček vln po krátkou dobu kulminace povodně neohroží bezpečnost hráze.

$$\mathbf{MBH = H_{kor.min} - h_v = 330,92 - 0,36 = 330,56 \text{ m n.m.}}$$

### 6.5 Kontrolní maximální hladina

Finklův rybník je vodní dílo IV. kategorie a pro posouzení jeho bezpečnosti je uvažováno s průchodem kontrolního průtoku  $Q_{100} = 39,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Transformační účinek nádrže je vzhledem k malému poměru retenčního objemu a objemu povodňové vlny zanedbatelný.

Pro převádění průtoků je na VD Finklův rybník stavidlová výpust, výpustný objekt s dlužemi a pevný bezpečnostní přeliv. Stavidlová výpust a výpustný objekt umožňují regulaci hladiny. Pro výpočet KMH jsou uvažovány dvě varianty. První je bez manipulace se stavidly, při dosažení hladiny 330,04 m n. m. dojde k volnému přelévání stavidlové výpusti. V druhé variantě je uvažována manipulace se stavidly dle manipulačního řádu, při kulminačním průtoku  $Q_{100}$  jsou vyhrazena všechna stavidla.

#### 6.5.1 V průběhu povodně nedojde k manipulaci se stavidlovou výpustí

- Stavidlová výpust je zahrazena, dochází k přepadu při hladině 330,04 m n. m.
- Dlužové stěny v požeráku jsou hrazeny do úrovně 329,58 m n. m. (kóta koruny přelivu)

Kapacita bezpečnostního přelivu je  $Q_{přel} = 7,3 \text{ m}^3/\text{s}$  při hladině minimální kóty koruny hráze 330,92 m n. m.

Požerák má kapacitu  $Q_{výp} = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  při dlužové stěně zahrazené do úrovně 329,58 m n.m. a při hladině v úrovni minimální kóty koruny 330,92 m n. m.

Kapacita stavidlové výpusti je  $Q_{stav} = 7,4 \text{ m}^3/\text{s}$  při úplném zahrazení a při hladině v úrovni minimální kóty koruny hráze 330,92 m n. m.

Celkový odtok vody přes bezpečnostní přeliv, požerák a stavidlovou výpust je  $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , což je méně než  $Q_{10} = 17,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Část povodňového průtoku  $Q_{100} = 39,9 \text{ m}^3/\text{s}$  přeteče přes nejnižší úsek koruny hráze paprskem vysokým 0,23 m. [8]

Hladina vody ve VD Finklův rybník vystoupí při průchodu kontrolní povodňové vlny s kulminačním průtokem  $Q_{100} = 39,9 \text{ m}^3/\text{s}$  do úrovně **KMH<sub>1</sub> = 331,15 m n.m.**

Posouzení bezpečnosti vodního díla při povodních:

$MBH - KMH_1 = 330,56 \text{ m n.m.} - 331,15 \text{ m n.m.} = -0,56 \text{ m}$

**KMH<sub>1</sub> = 331,15 m n.m. > MBH = 330,56 m n.m.**

Podmínka zabezpečení na  $Q_{100}$  není splněna.

### 6.5.2 V průběhu povodně se manipuluje dle manipulačního řádu

- Při kulminaci povodňové vlny při  $Q_{100}$  je stavidlová výpust zcela vyhrazena
- Dlužové stěny v požeráku jsou hrazeny do úrovně 329,58 m n. m. (kóta koruny přelivu)

Kapacita bezpečnostního přelivu je  $Q_{přel} = 7,3 \text{ m}^3/\text{s}$  při hladině minimální kóty koruny hráze 330,92 m n.m.

Požerák má kapacitu  $Q_{výp} = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  při dlužové stěně zahrazené do úrovně 329,58 m n.m. a při hladině v úrovni minimální kóty koruny 330,92 m n.m.

Kapacita stavidlové výpusti při úplném vyhrazení a při hladině v úrovni minimální kóty koruny hráze 330,92 m n.m. je  $Q_{stav} = 34,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Celkový odtok vody přes bezpečnostní přeliv, požerák a stavidlovou výpust je  $42,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , což je více než  $Q_{100} = 39,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Hladina vody ve VD Finklův rybník vystoupí při průchodu kontrolní povodňové vlny s kulminačním průtokem  $Q_{100} = 39,9 \text{ m}^3/\text{s}$  do úrovně **KMH<sub>2</sub> = 330,55 m n.m.** [8]

Posouzení bezpečnosti vodního díla při povodních:

$MBH - KMH_2 = 330,56 \text{ m n.m.} - 330,55 \text{ m n.m.} = 0,01 \text{ m}$

**KMH<sub>2</sub> = 330,55 m n.m. < MBH = 330,56 m n.m.**

Podmínka zabezpečení na  $Q_{100}$  je splněna.

Při současném stavu hráze, bezpečnostního přelivu, výpustního objektu a stavidlové výpusti **VD Finklův rybník vyhoví požadavkům na bezpečnost při povodních dle ČSN 75 2935, bude-li zajištěna manipulace se stavidlovou výpustí při povodňových situacích.**

## 6.6 Návrh opatření

MVN Finklův rybník vyhovuje požadavkům na bezpečnost při povodních pouze v případě manipulace se stavidlovou výpustí. Vzhledem k nízkému významu vodního díla není zajištěna jeho trvalá obsluha pro manipulaci při povodních, proto byla navržena rekonstrukce bezpečnostního přelivu, ve které dojde k odstranění současné stavidlové výpusti a vybudování labyrintového bezpečnostního přelivu.

## 7 Labyrintový přeliv pianového typu - model

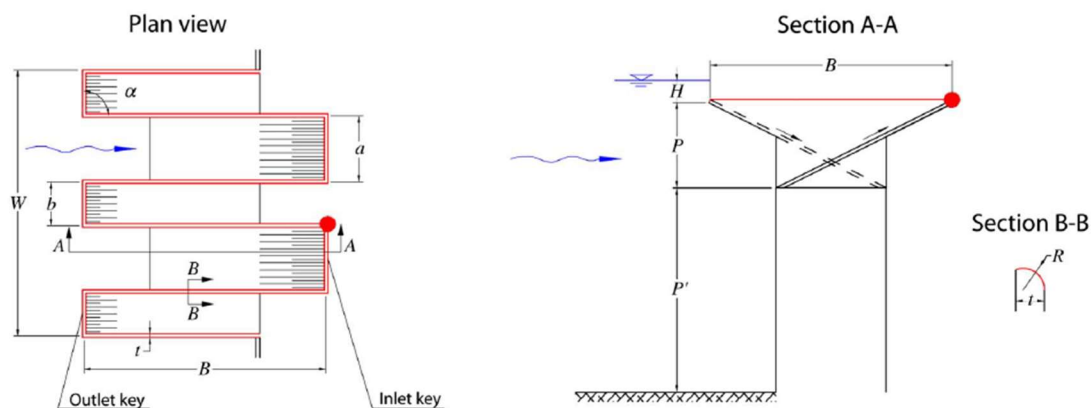
Geometrický tvar modelu je určen z hydrotechnických výpočtů pro labyrintový pianový přeliv. Následuje zvolení vhodného měřítka a mechanické podobnosti, splňující parametry laboratorního žlabu. Po osazení modelu do laboratorního žlabu je provedeno měření kapacity přelivu a tlaku ve vybraných místech. Změřená konzumní křivka je porovnávána s vypočtenou konzumní křivkou a je navržena optimalizace návrhu.

### 7.1 Hydrotechnické výpočty

Hydrotechnické výpočty jsou převzaty z bakalářské práce Zajištění bezpečnosti MVN Finklův rybník [4].

Ve výpočtech je návrhový průtok  $Q_{PKW}$  uvažován jako  $Q_{100}$  snížený o průtok, který převede pevný bezpečnostní přeliv v levém závazání hráze při hladině vody v nádrži na kótě MBH = 330,56 m n.m. Průtok pevným bezpečnostním přelivem odpovídá hodnotě 4,97 m<sup>3</sup>/s.

Pro výpočet délky přelivné hrany bezpečnostního labyrintového přelivu byl použit odborný článek *Discharge Capacity of Piano Key Weir* [5].



Obrázek 8: Schematický půdorys a řez labyrintovým přelivem

Prvním krokem pro výpočet přelivné délky hrany je určení poměru průtoků  $r$  mezi požadovaným průtokem přes labyrintový přeliv a průtokem přes přímou přelivnou hranu  $W$ :

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_W} = \frac{C_{PKW} \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}}{C_d \cdot W \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} \quad 7.1$$

$r$  poměr průtoků [-]

$Q_{PKW}$  průtok přes labyrintový přeliv [m<sup>3</sup>/s]

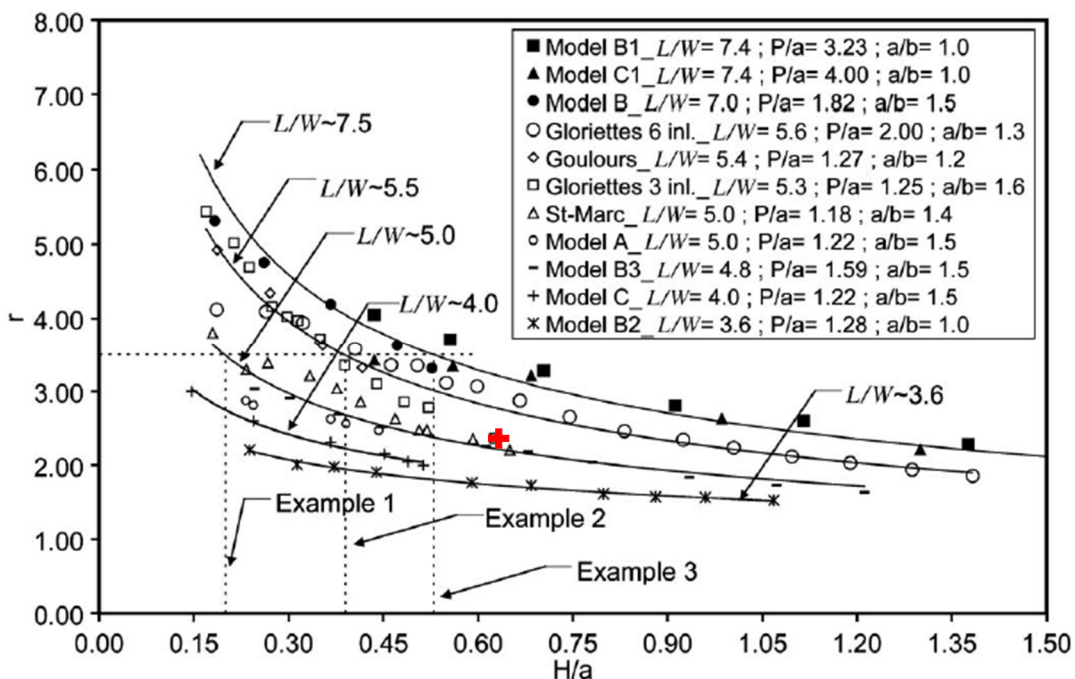
$Q_W$  průtok přes přímou přelivnou hranu [m<sup>3</sup>/s]

$C_{PKW}$  průtokový koeficient [-]

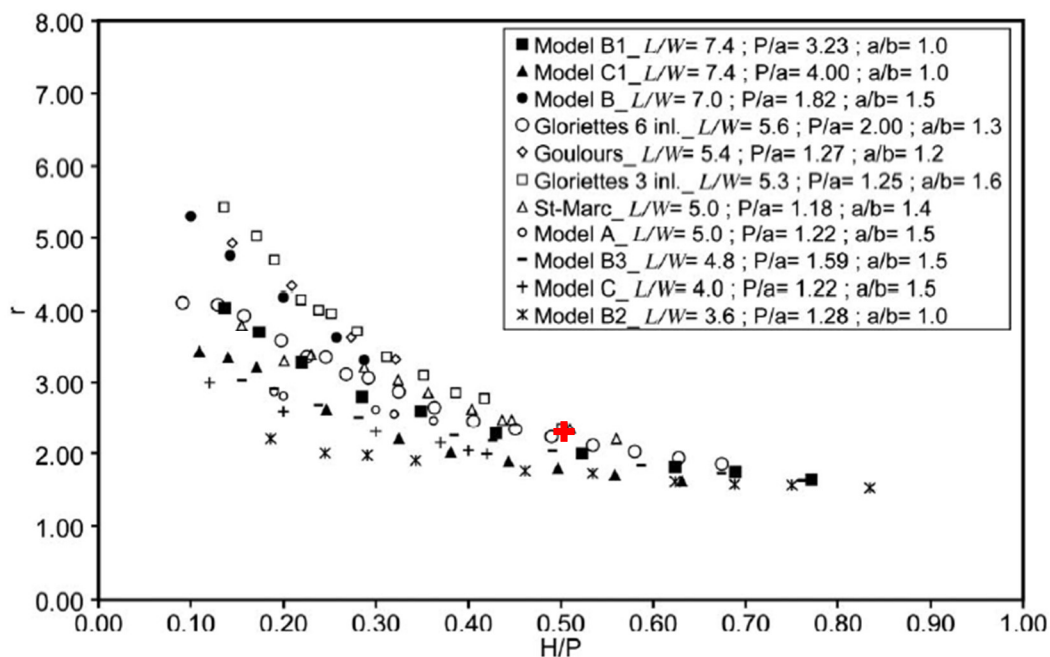
$C_d$  průtokový koeficient s předpokládanou konstantní hodnotou 0,42

- L konstrukční délka přelivné hrany labyrintového přelivu [m]  
 g tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]  
 H výška přepadového paprsku [m]  
 W délka přelivné hrany přímého přelivu [m]

S pomocí průměru průtoků  $r$  odečteme hodnoty  $L/W$  a  $H/P$  ( $P$  je výška konstrukce labyrintového přelivu) z následujících grafů. Pro hodnotu  $L/W$  je nutné si nejprve určit poměr přepadové výšky paprsku k délce přelivné hrany  $a$  ( $H/a$ ).



Obrázek 9: Průtokový poměr  $r$  jako funkce  $H/P$  pro různé modely labyrintového přelivu [5]



Obrázek 10: Průtokový poměr  $r$  jako funkce  $H/P$  pro různé modely labyrintového přelivu [5]



Na *Obrázku 9* je patrné, že se zmenšujícím se návrhovým průtokem přes labyrintový přeliv se poměr  $r$  snižuje.

Po několika iteracích v programu MS Excel byla určena šířka přepadového paprsku  $H = 0,95$  m a k tomu šířka vnitřní klávesy  $a = 1,5$  m. Šířka vnější klávesy  $b$  je vypočtena z doporučeného poměru  $a/b = 1,6$ .

*Tabulka 3: Vstupní hodnoty pro výpočet bezpečnostního přelivu*

$Q_{100}$	39,90	m <sup>3</sup> /s	N-letý průtok Q100
$Q_{bp}$	4,97	m <sup>3</sup> /s	průtok pevným bezpečnostním přelivem v levém zavázání hráze
$Q_{PKW}$	34,93	m <sup>3</sup> /s	návrhový průtok
$W$	8,27	m	šířka přímé přelivné hrany
$g$	9,81	m/s <sup>2</sup>	tíhové zrychlení
$C_d$	0,42	-	průtokový koeficient
$H$	0,95	m	šířka přepadového paprsku
$a$	1,50	m	délka vnější hrany přelivu
$b$	0,95	m	délka vnitřní hrany přelivu

Poměr průtoků  $r$ :

$$r = \frac{34,93}{0,42 \cdot 8,27 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 0,95^{3/2}} = \frac{34,93}{14,25} = 2,45 \quad 7.2$$

Poměr  $H/a$ :

$$\frac{H}{a} = \frac{0,95}{1,50} = 0,63 \quad 7.3$$

Odečtená hodnota z grafu, vyznačená červeným křížkem, na *obrázku 9* je  $L/W = 5,3$ .

Celková délka přelivné hrany labyrintového přelivu  $L$ :

$$\frac{L}{W} = 5,3 \rightarrow L = 5,3 \cdot W = 5,3 \cdot 8,27 = 43,83 \text{ m} \quad 7.4$$

Navržená délka přelivné hrany  $L$  je **44,16 m**.

Odečtená hodnota z grafu, vyznačená červeným křížkem, na *obrázku 10* je  $H/P = 0,5$ .

Výška konstrukce  $P$ :

$$\frac{H}{P} = 0,5 \rightarrow P = \frac{H}{0,5} = 1,9 \text{ m} \quad 7.5$$

Pro výpočet konzumní křivky přelivu je nutný výpočet průtokového koeficientu  $C_{PKW}$  (rovnice 7.3) tento koeficient odpovídá v Bazinově rovnici součiniteli přepadu  $m$ . Koeficient je určen pro každý průtok zvlášť.

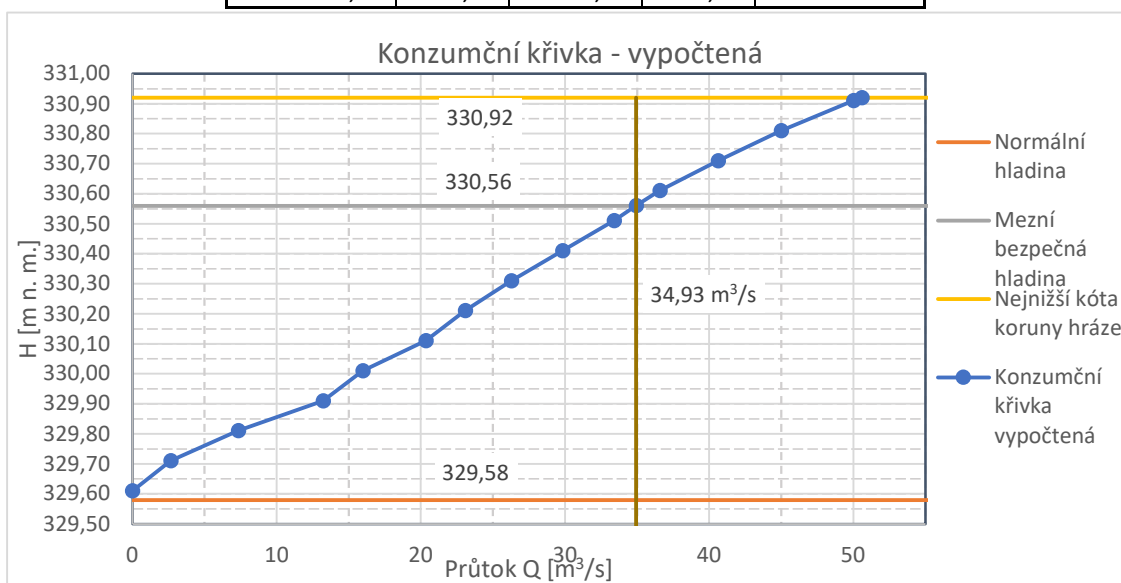
$$C_{PKW} = \frac{Q_{PKW}}{L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} \quad 7.6$$

$$C_{PKW} = \frac{34,93}{44,16 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,81 \cdot 0,95^{3/2}} = 0,19 \quad 7.7$$

Navržena je přelivná hrana o délce  $L = 44,16$  m a výška konstrukce  $P = 1,9$  m. V tabulce 6 je spočítán průtok navrženým bezpečnostním přelivem v rozmezí  $H=329,61$  m n. m., což odpovídá kótě přelivné hrany, a kóty nejnižšího místa hráze 330,92 m n. m. Vypočtené hodnoty jsou vyneseny do grafu, který je konzumní křivkou labyrintového bezpečnostního přelivu.

Tabulka 4: Výpočet průtoku labyrintovým přelivem

H [m n.m.]	$h_p$ [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H/a	r (graf ob.9)
329,61	0,00	0,00	0,00	-
329,71	0,10	1,19	0,07	-
329,81	0,20	3,37	0,13	-
329,91	0,30	6,20	0,20	5,15
330,01	0,40	9,54	0,27	4,05
330,11	0,50	13,34	0,33	3,70
330,21	0,60	17,53	0,40	3,20
330,31	0,70	22,09	0,47	2,90
330,41	0,80	26,99	0,53	2,70
330,51	0,90	32,21	0,60	2,54
330,56	0,95	34,93	0,63	2,45
330,61	1,00	37,72	0,67	-
330,71	1,10	43,52	0,73	-
330,81	1,20	49,59	0,80	-
330,91	1,30	55,91	0,87	-
330,92	1,31	56,56	0,87	-



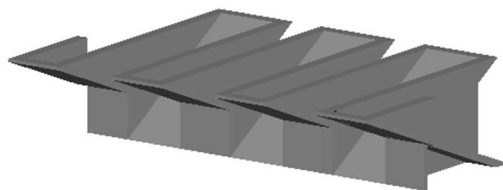
Obrázek 11: Konzumní křivka labyrintového přelivu – vypočtená

## 7.2 Měřítko modelu

Výběr vhodného měřítka pro fyzikální model byl stanoven dle kapitoly 2.5 Návrh fyzikálního modelu.

- 1) Laboratorní žlab určený pro měření konzumční křivky modelu je široký 1,0 m. Šířka navrženého přelivu je 8,46 m. Je zvoleno měřítko 1:10. Model je tedy široký 84,6 cm a je možné ho umístit do žlabu.
- 2) Jedná se o proudění s volnou hladinou, proto byla zvolena mechanická podobnost podle Froudova kritéria. V tomto případě je měřítko průtoku  $M_Q = M_L^{5/2}$  (1:316,23). Maximální průtok v laboratorním žlabu je 120 l/s, to odpovídá reálnému průtoku při zvoleném měřítku 37,9 m<sup>3</sup>/s. Návrhový průtok pro labyrintový přeliv je 34,9 m<sup>3</sup>/s.
- 3) Model je vyroben z plastových desek o tloušťce 10 a 15 mm.
- 4) Jedná se o turbulentní proudění. Ztráty třením jsou v kvadratické oblasti a nejsou tedy funkcí Reynoldsova čísla.
- 5) Zvolené měřítko **1:10** je vhodné a může se podle něj sestavit model.

Před stavbou modelu byl zhotoven 3D výkres v programu AutoCAD 2020.



Obrázek 12: 3D model přelivu

Následně byl model sestaven, posazen na lichoběžníkovou spodní stavbu do laboratorního žlabu a ve vybraných místech byly umístěny tlakové sondy.



Obrázek 13: Navržený model ve žlabu (pohled po směru proudění)

Po umístění modelu do žlabu byla provedena zkouška těsnosti a stability modelu tím, že na něj byla puštěna voda. Případné netěsnosti byly zalepeny silikonem.

### 7.3 Měření hladiny

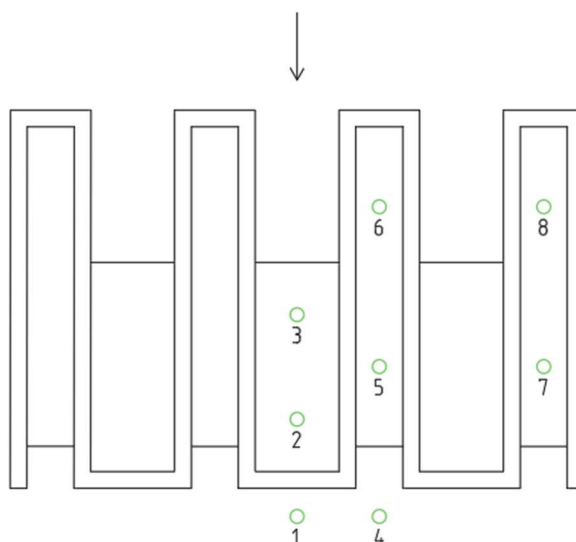
Po prvním puštění vody na model bylo pomocí hrotového měřítka zjištěna výška konstrukce v několika bodech. Bylo zkontrolováno, že přelivná hrana je v rámci možností vodorovná. Pro odečtení hodnot potřebných k sestavení konzumní křivky byla uvažována výška přelivné hrany jako průměr všech naměřených hodnot  $H_0 = 27,50$  cm.

Výška přelivné hrany a měření hladin bylo provedeno pomocí hrotového měřítka upevněného na nosníku, který se ručně posunuje po vodorovných lištách.

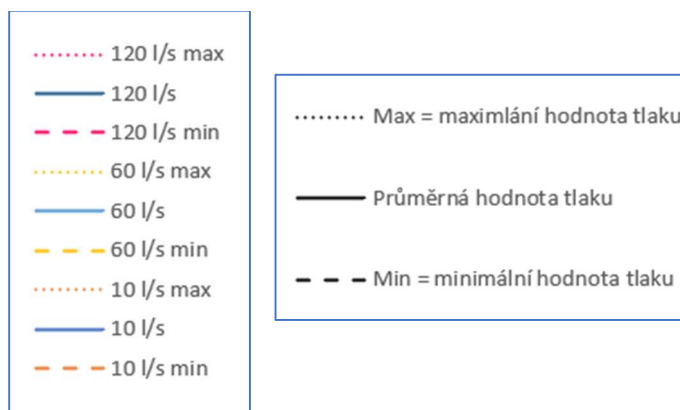
### 7.4 Měření tlaků ve vybraných místech

Tlak byl měřen na 8 vybraných místech konstrukce pomocí tlakových sond. Vzhledem k tomu, že je model symetrický a jeho umístění ve žlabu je vycentrováno, předpokládá se, že působení tlaků bude také symetrické. Sondy jsou umístěny na dvě užší klávesy na jedné straně modelu, na prostřední široké klávese a za konstrukcí.

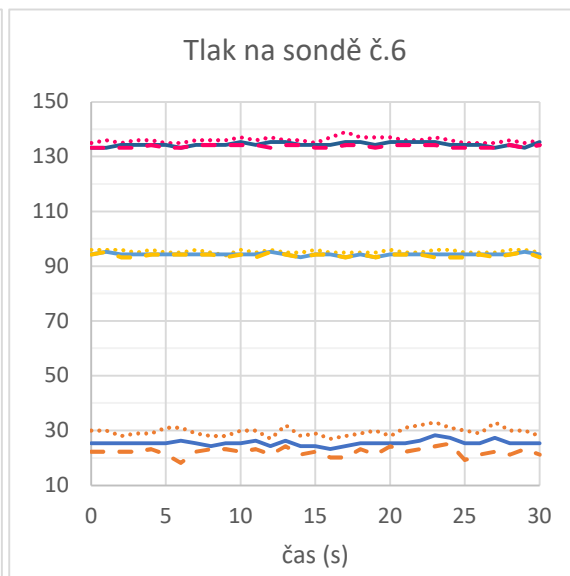
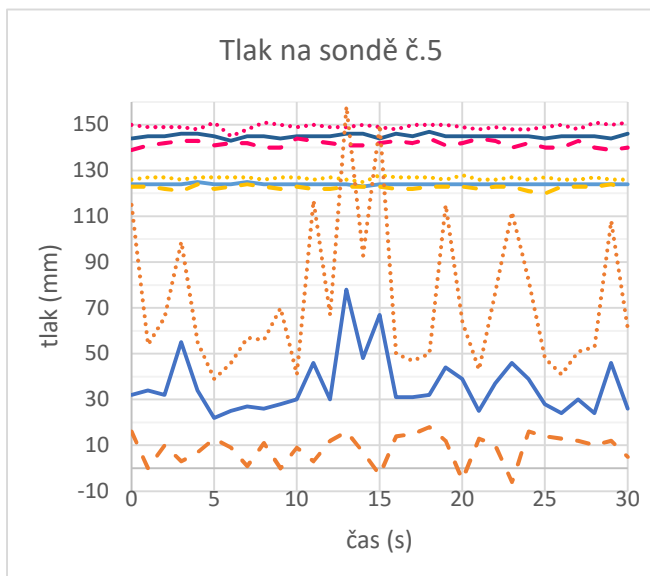
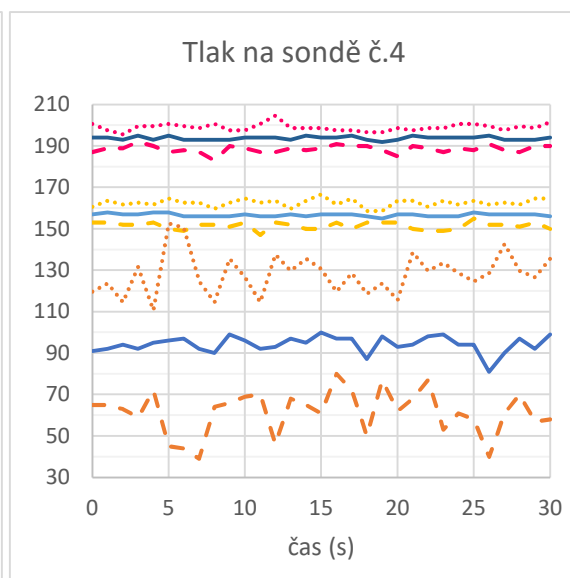
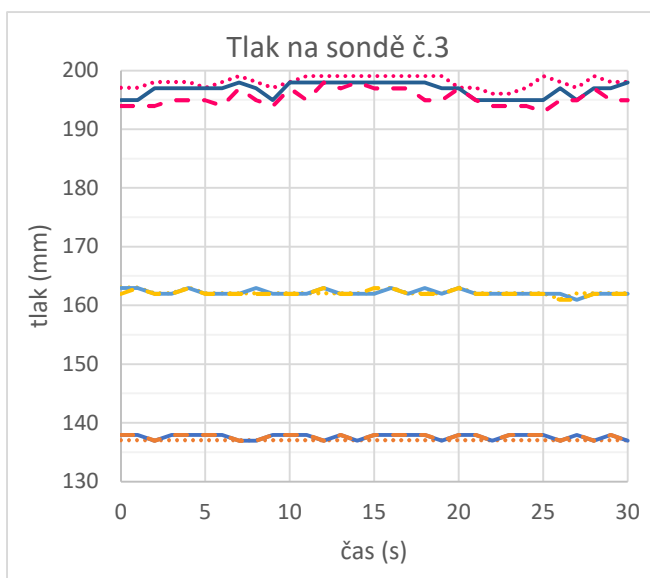
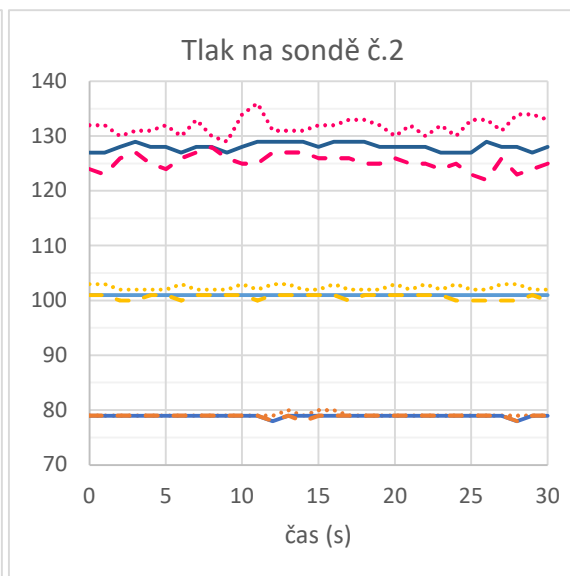
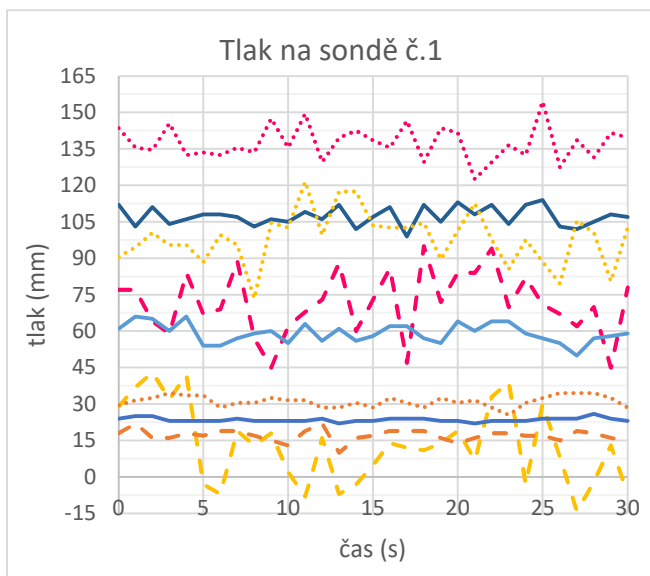
Pro měření tlaků byly použity tlakové sondy. Pro posouzení namáhání konstrukce, případně vzniku kavitace, jsou měřeny hodnoty tlaků (průměrný, minimální, maximální) v sekundových intervalech v rozmezí průtoků 0–120 l/s přibližně po 10 l/s. Tlaky jsou měřeny v intervalu min. 30 sekund. Rozmístění tlakových sond viz obrázek 14:

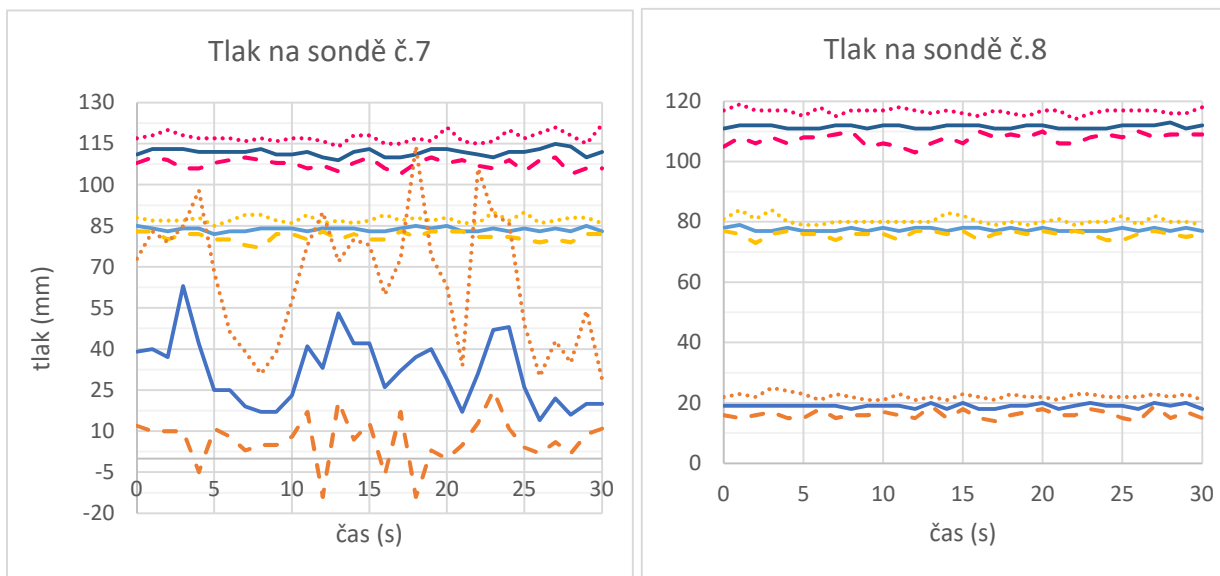


Obrázek 14: Schéma umístění tlakových sond



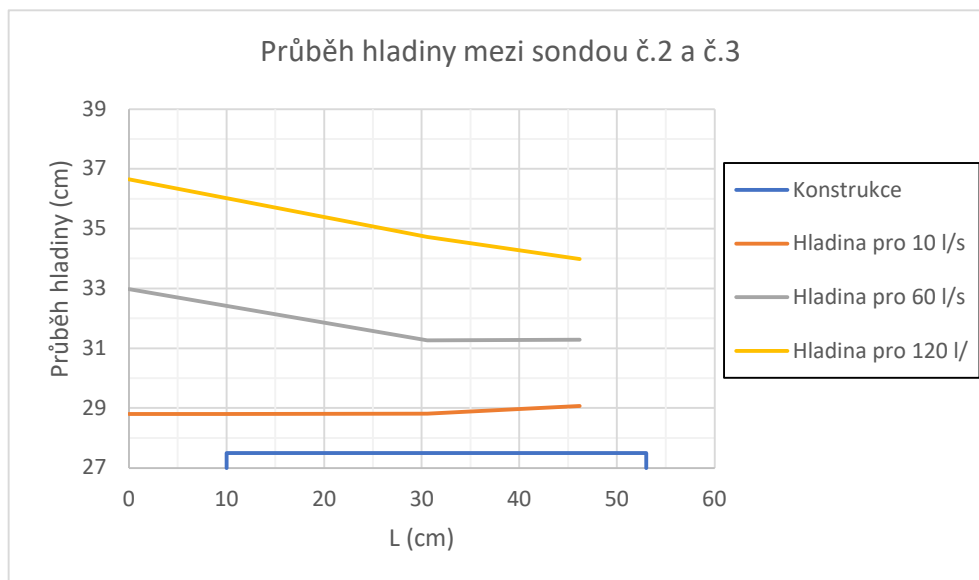
Obrázek 15: Legenda ke grafům průběhu tlaků





Sonda č.1 je umístěna uprostřed šířky konstrukce těsně za širokou klávesu. Voda přepadá přes hranu široké klávesy, při zahlcení užších kláves sem voda s vyšší energií natlačuje vodu přepadající ze strany široké klávesy a dochází tak při vyšších průtocích k výraznému kolísání tlaků.

Sonda č.2 a č.3 jsou umístěny v horní a dolní třetině široké klávesy. V těchto případech je průběh tlaků celkem stálý. Sonda č.2 je umístěna blíže k přepadu přes hranu široké klávesy, v těchto místech přepadá voda i do strany přes stěny klávesy, přepadová výška je tak snižena ze dvou důvodů. U sondy č.3 se hladina sníží přepadem vody do strany, snížení hladiny je větší mezi sondou č.3 a hladinou v nádrži než mezi hladinami naměřenými mezi sondami. U průtoku 10 l/s se dokonce v místech sondy č.2 hladina mírně zvýšila.



Průběh tlaků u sondy č.4, která je umístěna za konstrukci v ose užší klávesy blíže ke středu, je s přibývajícím tlakem vyrovnanější. Při nízkých průtocích sem voda stéká po nakloněném dně užší klávesy a zároveň na toto místo přepadá voda z bočních stěn širokých kláves. Se zvyšujícím se průtokem se klávesa zahlťe a tlak postupně méně kolísá. V porovnání se sondou č.1, která je za širokou klávesou, je průběh tlaků obrácený, při zvyšování průtoků tlak u sondy č.1 více kmitá.

Sonda č.5 a sonda č.6 jsou v dolní a horní třetině užší klávesy blíže ke středu. Sonda č. 5 je v dolní části klávesy a při nižších průtocích je patrné velký rozptyl hodnot tlaků, způsobené vodou, která stéká po dně klávesy a zároveň sem přepadá z bočních stěn. U maximálního průtoku je rozptyl tlaků o něco větší než u středních průtoků. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozkolísáním hladiny ve žlabu, která by potřebovala více času k ustálení. Sonda č.6 je v horní třetině užší klávesy a snížení hladiny je zde menší než u sondy č.5.

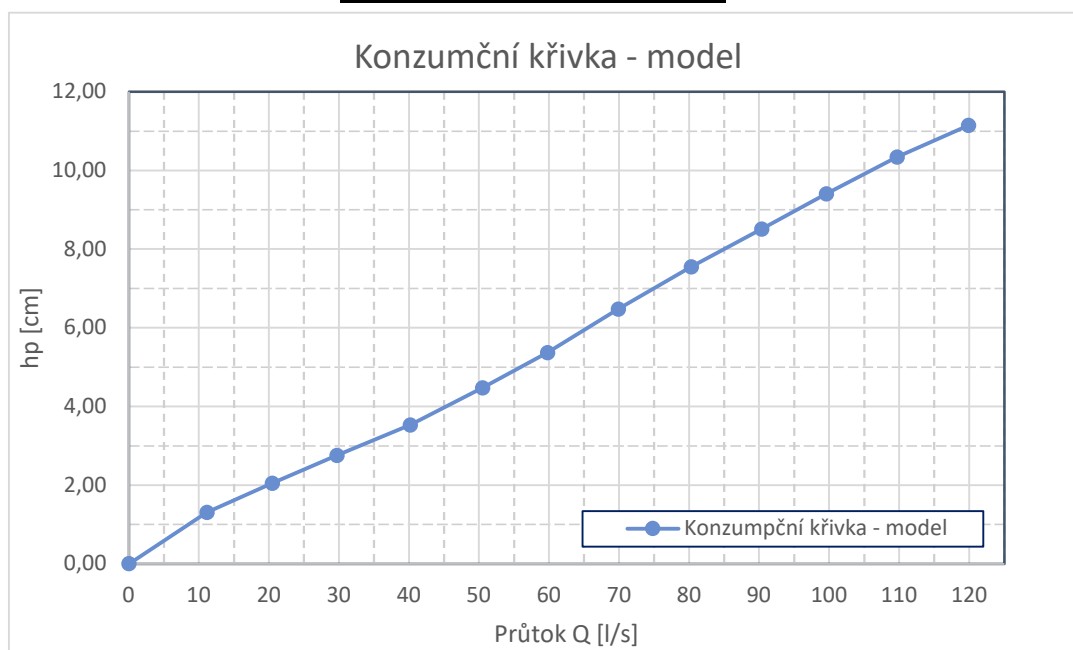
V krajní užší klávese jsou umístěny sondy č.7 a č.8, stejně jako předchozí dvě sondy jsou v dolní a horní třetině klávesy. Průběh tlaků je podobný jako u sondy č.5 a č.6. Nátok je ovlivněn z jedné strany hrází a rozptyl tlaků je u vyšších průtoků větší než u klávesy blíže ke středu. Podél boční klávesy není umístěna boční stěna, kterou ve skutečnosti tvoří těleso hráze. Voda se rozlévala i mimo labyrint a průměrné tlaky jsou menší než u vedlejší užší klávesy.

## 7.5 Konzumní křivka modelu

Konzumní křivka byla měřena přibližně po 10 l/s v rozmezí 0–120 l/s, což odpovídá maximálnímu možnému průtoku v laboratorním žlabu.

Tabulka 5: Tabulka průtoků přes model labyrintového přelivu

H [cm]	hp [cm]	Q [l/s]
27,51	0,00	0,00
28,81	1,30	11,12
29,55	2,04	20,47
30,26	2,75	29,68
31,03	3,52	40,14
31,98	4,47	50,49
32,87	5,36	59,76
33,98	6,47	69,85
35,05	7,54	80,31
36,01	8,50	90,35
36,91	9,40	99,57
37,84	10,33	109,69
38,65	11,14	119,88



Obrázek 16: Konzumní křivka modelu



## 8 Porovnání konzumční křivky výpočet – model

Pro porovnání konzumčních křivek bylo nutné převést hodnoty změřené na modelu do reality. Poté je možné obě křivky porovnat v jednom grafu. Do grafu porovnání konzumční křivky výpočet – model jsou přidány křivky pro přímý přeliv a pro proudnicovou přelivnou plochu.

Pro výpočet kapacity přímého přelivu a proudnicové přelivné plochy jsou použity následující rovnice:

$$Q = m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad 8.1$$

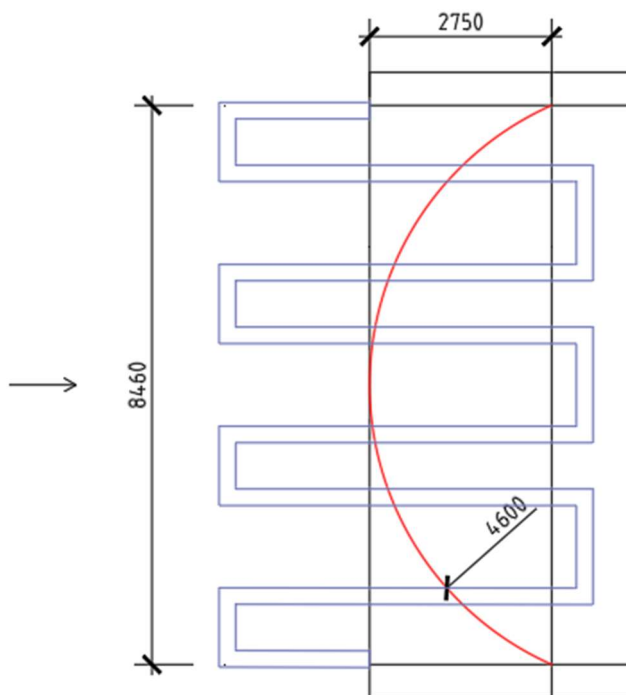
$$b_0 = b - 0,1 \cdot \xi n_k \cdot h \quad 8.2$$

Součinitel přepadu  $m$  je u přímého přelivu uvažovaný jako ve studii použité pro výpočet labyrintového pianového přelivu, tedy  $m = C_d = 0,42$  a je pro všechny průtoky konstantní. Šířka  $b$  je u přímého přelivu rovna šířky konstrukce pianového přelivu 8,46 m.

Pro proudnicovou přelivnou plochu je součinitel přepadu:

$$m = 0,504 \left( 0,63 + 0,37 \cdot \sqrt{\frac{h}{h_n}} \right) \quad 8.3$$

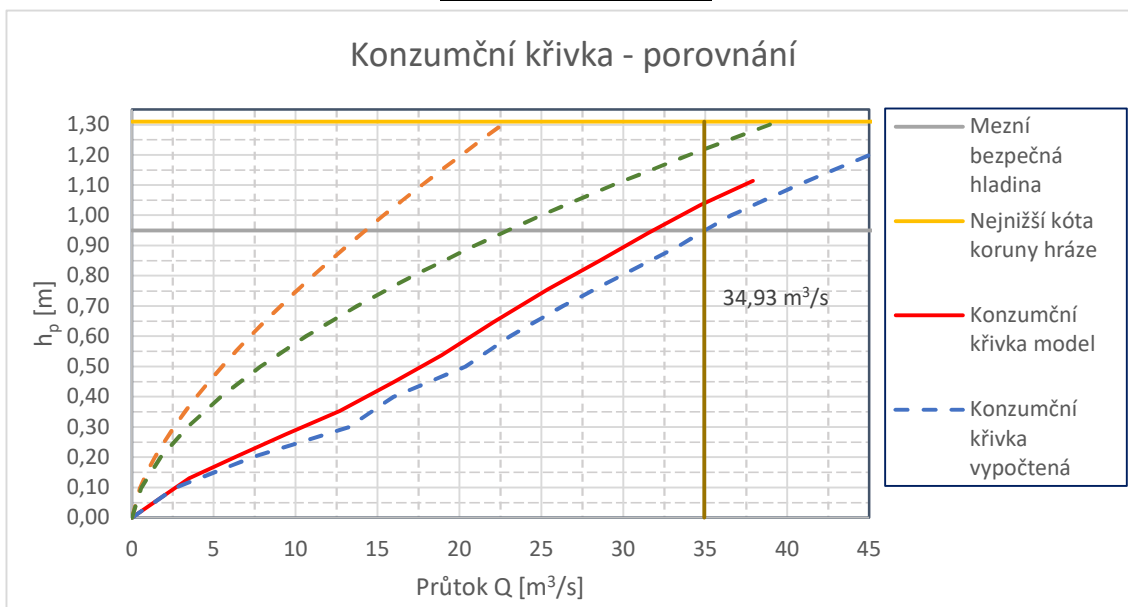
Přelivná hrana je oblouková o délce  $b = 10,67$  m a poloměr  $r = 4,6$  m. Oblouk je vymezen základy labyrintového pianového přelivu (viz červený oblouk na obr.17). Návrhová výška  $h_n$  je 0,71 m, což odpovídá 75 % z návrhové výšky pianového přelivu.



Obrázek 17: Půdorys přelivné hrany proudnicové plochy

Tabulka 6: Tabulka skutečných průtoků

$h_p$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]
0,00	0,00
0,13	3,52
0,20	6,47
0,28	9,39
0,35	12,69
0,45	15,97
0,54	18,90
0,65	22,09
0,75	25,40
0,85	28,57
0,94	31,49
1,03	34,69
1,11	37,91



Obrázek 18: Porovnání konzumčních křivek

Návrhový průtok 34,93 m<sup>3</sup>/s je u modelu dosažen při přepadové výšce paprsku přibližně 1,05 m, což je oproti výpočtu o 10 cm více. Mezní bezpečná hladina je překročena o 10 cm. Návrh labyrintového přelivu je tedy nutné upravit. Z grafu je patrné, že model má přibližně 2krát vyšší kapacitu, než u přelivu s přímou přelivnou hranou o stejné šířce jako je konstrukce labyrintového přelivu. Zároveň má i vyšší kapacitu než proudnicová přelivná plocha.

## 9 Optimalizace návrhu

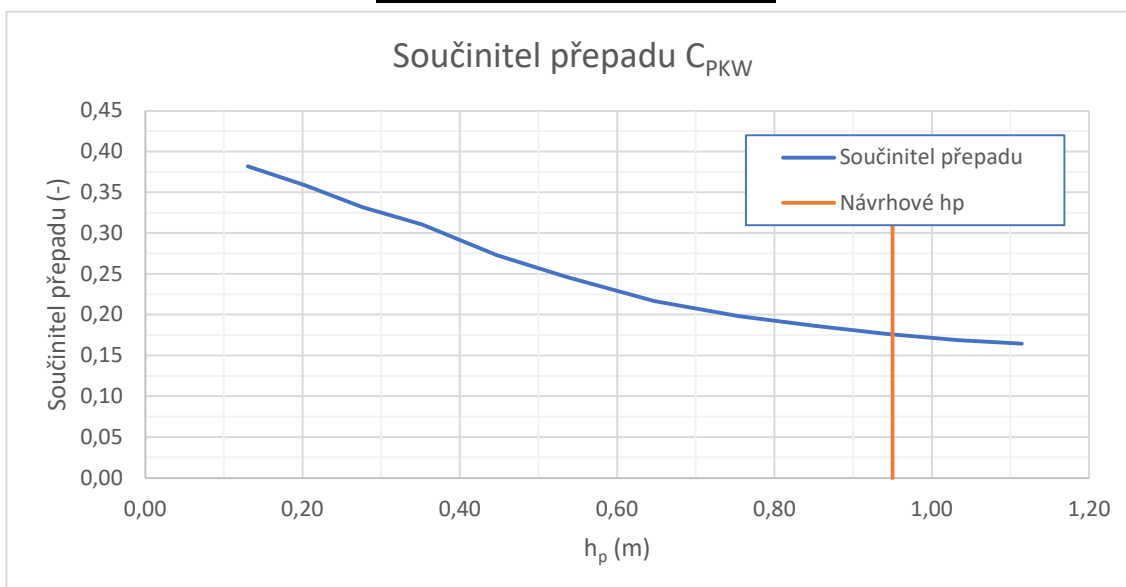
Navržený labyrintový přeliv dle měření v laboratoři nepřevede návrhový průtok tak, aby byla zajištěna bezpečnost díla. Je tedy nutné návrh upravit, nejjednodušší způsob je dostatečně prodloužit délku přelivné hrany.

### 9.1 Prodloužení délky přelivné hrany

Pro návrh délky přelivné hrany je stanovena skutečná hodnota součinitele přepadu z naměřených průtoků a přepadových výšek na modelu. Získané hodnoty součinitele přepadu jsou vyneseny do grafu.

Tabulka 7 : Skutečné hodnoty součinitele přepadu

$h_p$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$C_{pkw}$
0,13	3,52	0,38
0,20	6,47	0,36
0,28	9,39	0,33
0,35	12,69	0,31
0,45	15,97	0,27
0,54	18,90	0,25
0,65	22,09	0,22
0,75	25,40	0,20
0,85	28,57	0,19
0,94	31,49	0,18
1,03	34,69	0,17
1,11	37,91	0,16



Obrázek 19: Graf součinitele přepadu modelu

Z grafu je patrné, že pro návrhovou šířku přepadového paprsku  $h_p = 0,95$  m je součinitel přepadu roven  $C_{PKW} = 0,18$ . Tato hodnota je nižší než součinitel přepadu, který

vyšel v rovnici 7.7 v teoretických výpočtech kapacity pianového přelivu. Délka přelivné hrany je tedy přepočítána.

Minimální délka přelivné hrany vychází z rovnice průtoku:

$$Q_{PKW} = C_{PKW} \times L \times \sqrt{2g} \times H^{3/2} \quad 9.1$$

$$L = \frac{Q_{PKW}}{C_{PKW} \times \sqrt{2g} \times H^{3/2}} \quad 9.2$$

Přepadová výška  $H$  je uvažována jako  $H = 0,95 \text{ m}$ , stejně tak šířka vnějších a vnitřních kláves odpovídá původnímu návrhu labyrintového pianového přelivu – tedy  $a = 1,50 \text{ m}$  a poměr  $a/b = 1,6$ . Návrhový průtok  $Q_{PKW}$  je  $34,93 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabulka 8: Vstupní hodnoty pro výpočet délky přelivné hrany

$Q_{PKW}$	34,93	$\text{m}^3/\text{s}$	návrhový průtok
$g$	9,81	$\text{m}/\text{s}^2$	tíhové zrychlení
$H$	0,95	m	šířka přepadového paprsku
$C_{pkw}$	0,18	-	součinitel přepadu
$a$	1,50	m	délka vnější hrany přelivu
$b$	0,95	m	délka vnitřní hrany přelivu

Po dosazení vstupních hodnot do rovnice 9.1 a rovnice 9.3 vychází délka přelivné hrany:

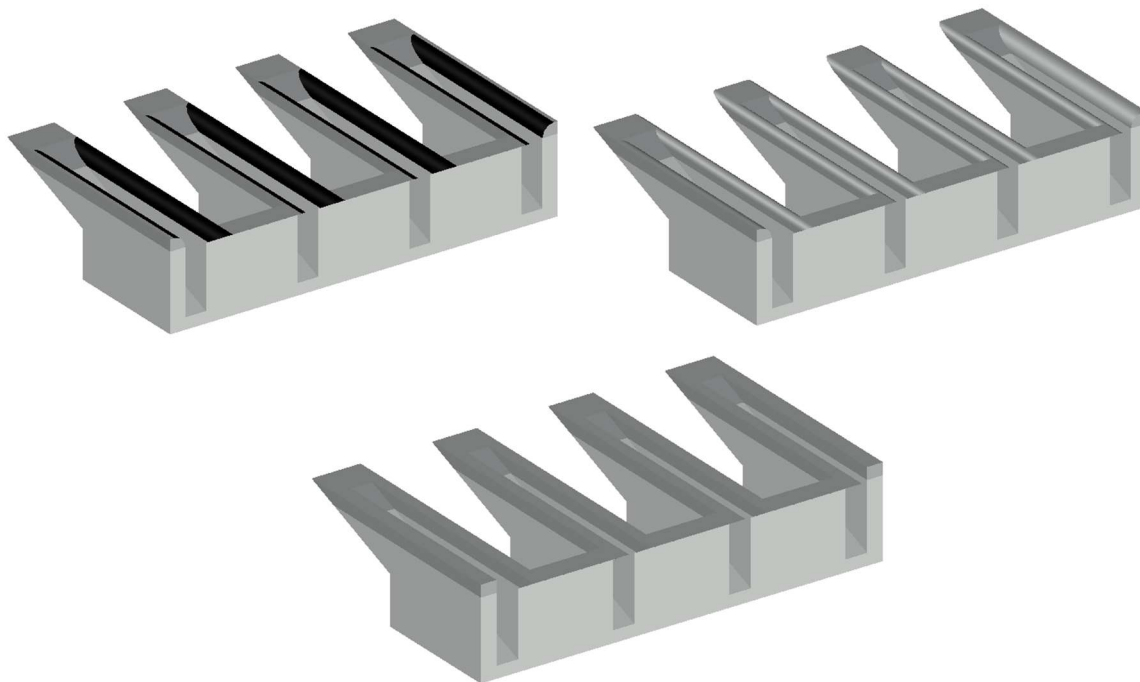
$$L = \frac{34,93}{0,18 \times \sqrt{2} \times 9,81 \times 0,95^{3/2}} \quad 9.3$$

$$L = 47,31 \text{ m}$$

Minimální délka přelivné hrany je rovna **47,31 m**. Původní minimální délka přelivné hrany vypočtená v kapitole 7.2 *Hydrotechnické výpočty* je 43,83 m a navržená délka přelivné hrany byla 44,16 m. Obě tyto hodnoty jsou menší než výsledek po upravení součinitele přepadu dle měření na modelu.

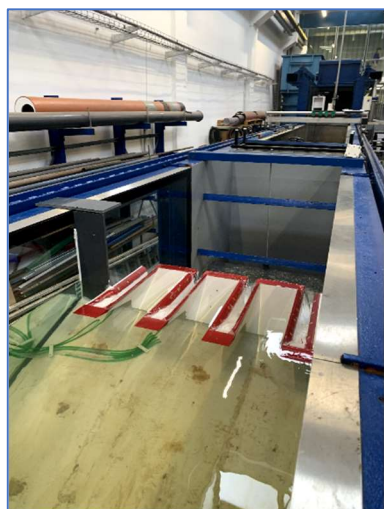
## 9.2 Tvar přelivné hrany

Tvar přelivné hrany byl zkoumán na dalším modelu labyrintového pianového přelivu. Délka přelivné hrany tohoto modelu  $L = 420,9$  cm, šířka modelu  $W = 84,6$  cm, výška modelu  $P = 19,0$  cm, vnitřní klávesa je široká  $a = 17,5$  cm a jsou na modelu 3, vnější klávesa je široká  $b = 7,0$  cm a jsou na modelu 4, poměr  $a/b = 2,5$ . Na model byly umístěny postupně 3 různé přelivné hrany – čtvrtkruhová, půlkruhová a pravouhlá. Pro každou přelivnou hranu je změřena konzumní křivka a tlak ve vybraných místech.



Obrázek 20: 3D model přelivných hran

Hlavní část modelu je sestavena z plastových desek o tloušťce 8, 10 a 15 mm. Přelivné hrany jsou vyrobeny tak, aby je bylo možné připevnit na vrch hlavní konstrukce a následně vyměnit. Pravouhlá přelivná hrana je také z plastových desek, zaoblené přelivné hrany jsou vytisknuty na 3D tiskárně.



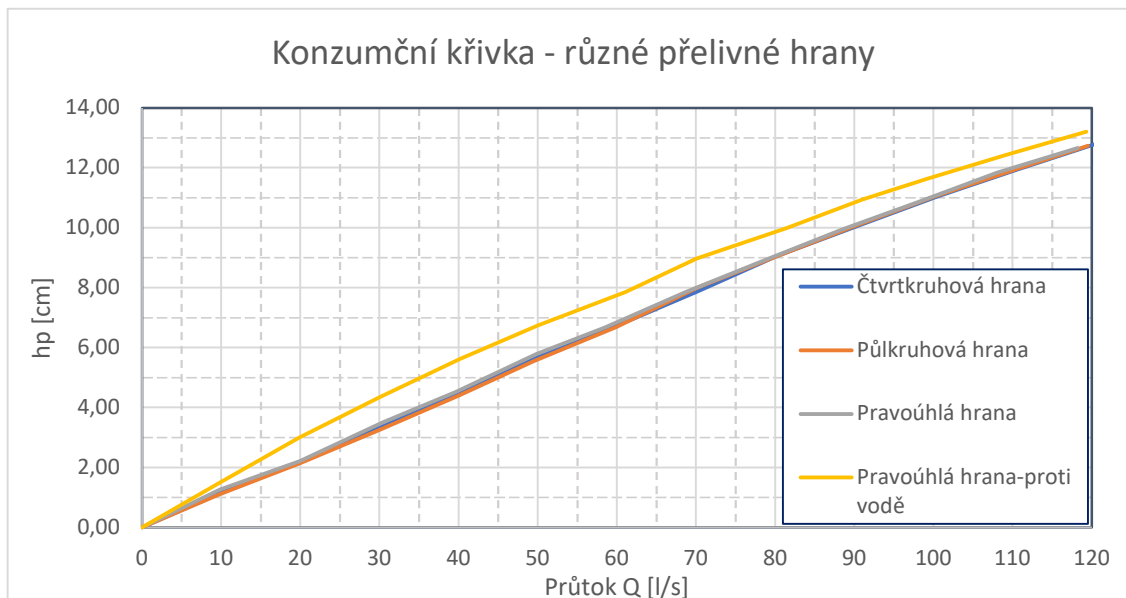
Obrázek 22: Čtvrtkruhová přelivná hrana



Obrázek 21: Půlkruhová přelivná hrana

### 9.2.1 Porovnání konzumčních křivek pro různé přelivné hrany

Pro každou přelivnou hranu je změřena výška přepadu  $h_p$  pro průtoky 0 – 120 l/s, přibližně po 10 l/s. Po posledním měření pravouhlé přelivné hrany byla konstrukce otočena proti vodě tak, že poměr kláves  $a/b = 0,4$ , je určena konzumční křivka i pro tuto variantu přelivu.



Obrázek 23: Porovnání konzumčních křivek pro různé přelivné hrany

Kromě obrácené varianty je konzumční křivka u všech 3 typů přelivné hrany téměř identická. Při bližším zkoumání grafu je přibližně do průtoků 65 l/s nejkapacitnější půlkruhová přelivná hrana. Nad touto hranicí je o něco více kapacitní čtvrtkruhová přelivná hrana. Nicméně rozdíly jsou velmi malé a přelivná hrana nemá vliv na průtok přes labyrintový pianový přeliv.

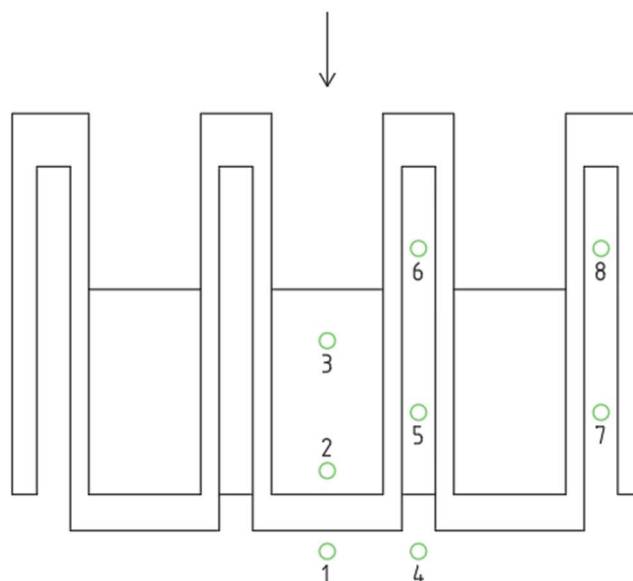
Naopak hraje velkou roli poměr vnitřní a vnější klávesy. I když na pohled byl přepad přes obrácenou variantu labyrintového pianového přelivu zajímavější (viz *Fotodokumentace*) a nedocházelo k zahlcení vnějších kláves, kapacita takto umístěného přelivu je nižší než u zbylých 3 měření.

### 9.2.2 Porovnání tlaků pro různé přelivné hrany

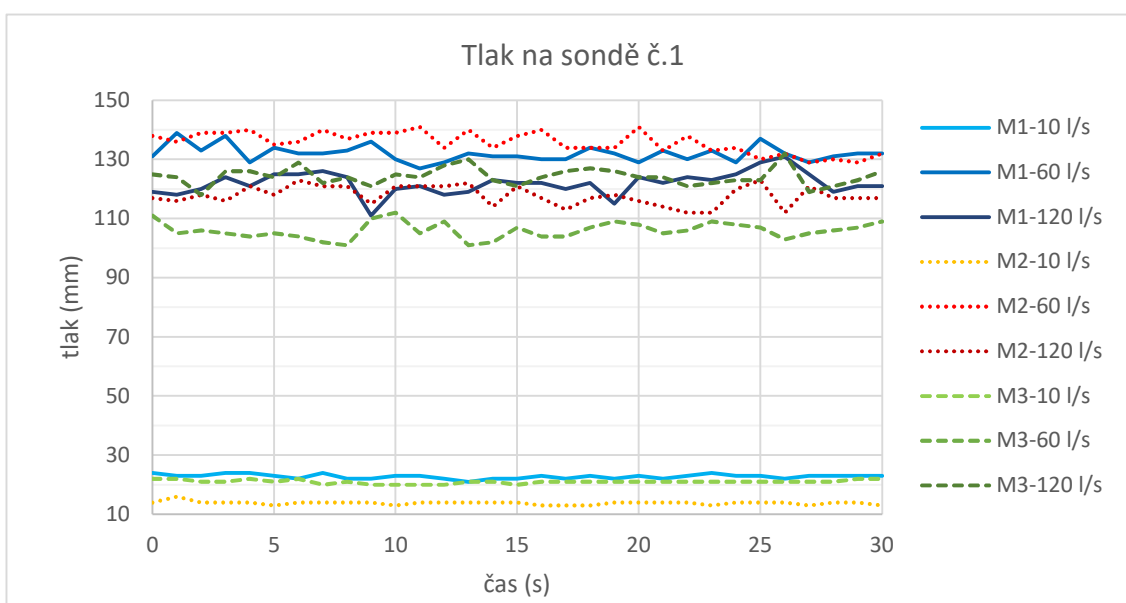
Tlak je na modelu měřen na 8 místech, 2 tlakové sondy jsou umístěna na široké klávese uprostřed, 2 sondy jsou umístěny na užší klávese blíže ke středu, další 2 sondy jsou umístěny na užší klávese na kraji a 2 sondy jsou za konstrukcí. Schéma umístění tlakových sond je pro všechny 3 přelivné hrany stejné a je znázorněné na *Obrázku 23*.

Tlak je měřen pomocí tlakových sond v rozmezí průtoků 0–120 l/s, přibližně po 10 l/s a je měřen po dobu minimálně 30 sekund. Pro porovnání tlaků jsou vybrány průměrné hodnoty pro 10 l/s, 60 l/s a 120 l/s. Hrany jsou označeny:

- M1 – čtvrtkruhová přelivná hrana
- M2 – půlkruhová přelivná hrana
- M3 – pravouhlá přelivná hrana

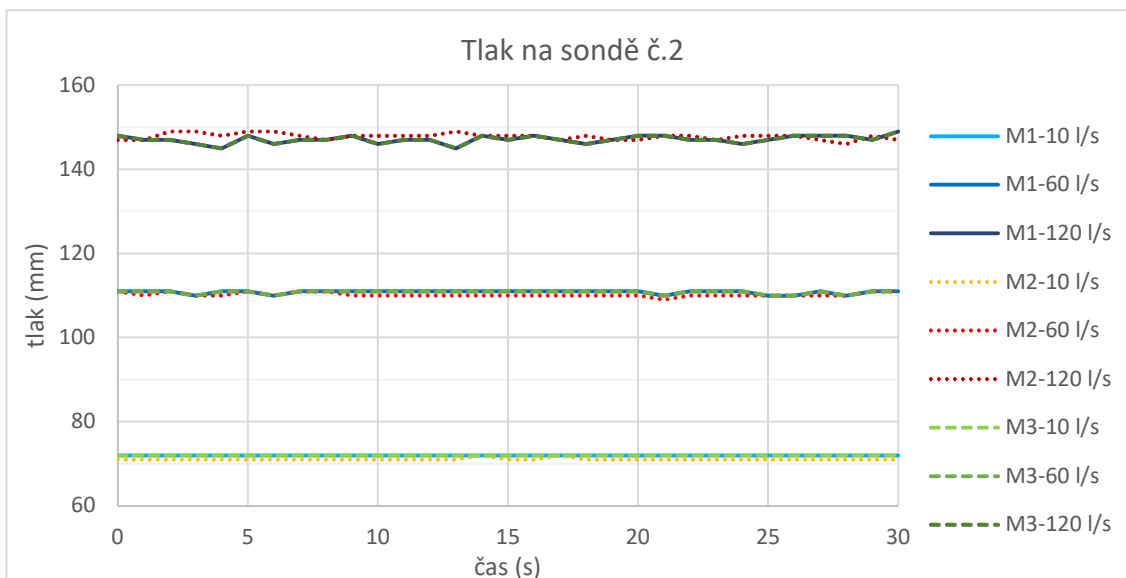


Obrázek 24: Schéma rozmístění tlakových sond

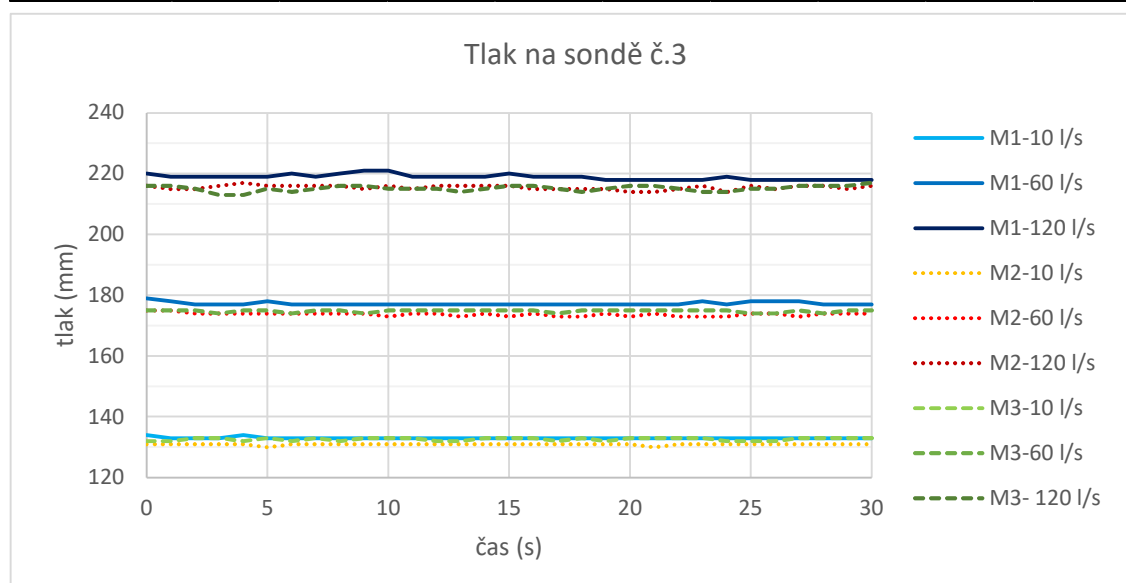


Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	22,77	131,94	121,90	13,81	135,74	117,81	21,00	106,00	124,23
Medián (mm)	23,00	132,00	122,00	14,00	136,00	117,00	21,00	106,00	124,00
Směr. odchylka	0,75	2,71	3,79	0,59	3,62	3,28	0,62	2,77	3,00
Rozptyl	0,56	7,35	14,35	0,35	13,09	10,74	0,39	7,68	9,01

Sonda č.1 je umístěna za širokou klávesou. Nízké průtoky jsou u čtvrtkruhové a pravouhlé přelivné hrany celkem vyrovnané, průměrné hodnoty jsou 22,7 mm a 21,0 mm za celou dobu měření. Půlkruhová přelivná hrana má u průtoku 10 l/s průměrný tlak 13,8 mm. U čtvrtkruhové a půlkruhové hrany jsou hodnoty tlaku při 60 l/s nejvyšší a postupně k maximálnímu průtoku 120 l/s klesají. U pravouhlé přelivné hrany – tedy měření M3 – jsou nejvyšší průměrné tlaky naměřeny u hodnoty 80 l/s (průměrná hodnota 131,0 mm). Z vybraných průtoků je největší rozptyl hodnot pro průtok 10 l/s u přelivné hrany M1, pro průtok 60 l/s u hrany M2 a pro maximální průtok 120 l/s je opět největší rozptyl hodnot u M1.



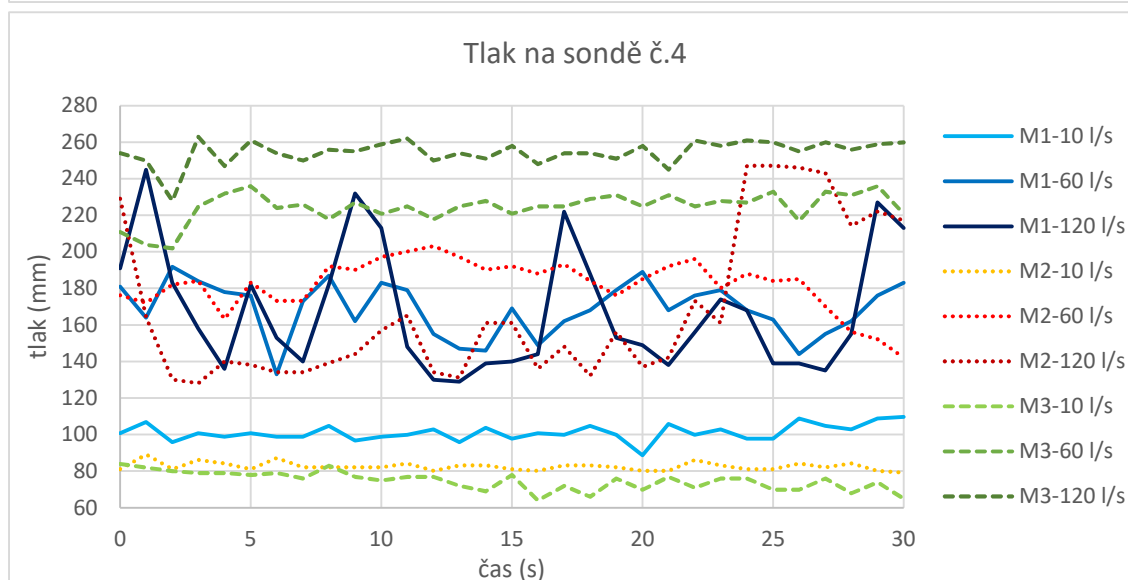
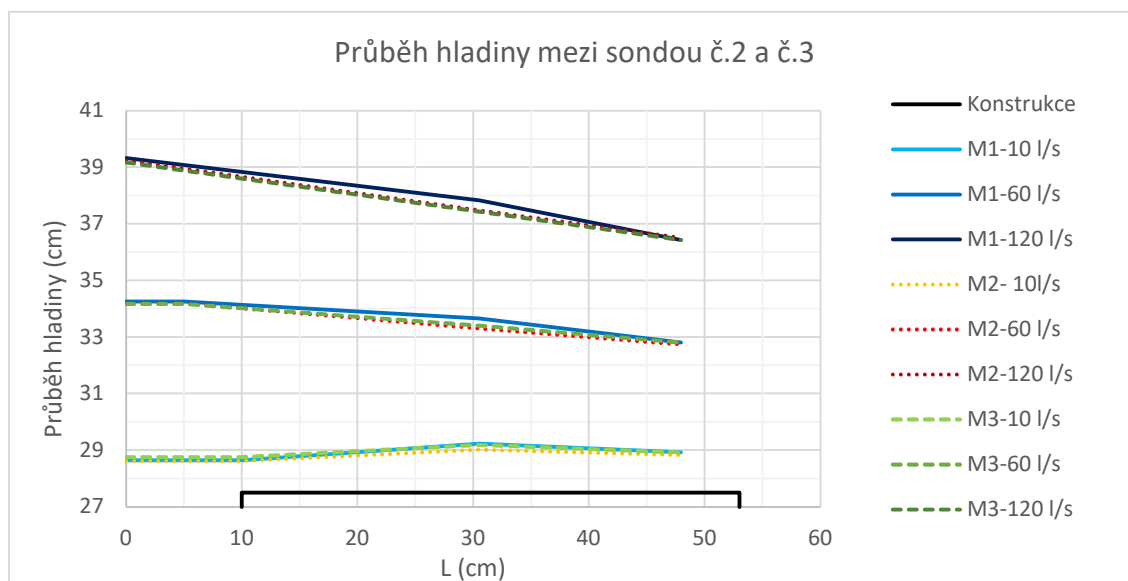
Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	72,00	110,79	147,03	71,07	110,14	147,83	72,00	110,79	147,03
Medián (mm)	72,00	111,00	147,00	71,00	110,00	148,00	72,00	111,00	147,00
Směr. odchylka	0,00	0,41	0,89	0,25	0,43	0,75	0,00	0,41	0,89
Rozptyl	0,00	0,16	0,79	0,06	0,19	0,56	0,00	0,16	0,79



Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	133,04	177,24	218,93	130,90	173,69	215,45	132,59	174,76	215,03
Medián (mm)	132,97	176,97	218,97	130,97	173,97	215,97	133,00	175,00	215,00
Směr. odchylka	0,25	0,52	0,85	0,25	0,58	0,72	0,49	0,43	0,89
Rozptyl	0,06	0,27	0,72	0,06	0,34	0,53	0,24	0,18	0,79

Sondy č.2 a č.3 jsou v ose prostředí široké klávesy. Tlaky jsou v obou případech stálé, mají malý rozptyl. V místě sondy č.2 přepadá voda přímo přes širokou klávesu a také přes stěny klávesy do stran. Dochází zde ke snížení hladiny. Největší rozdíl hladiny mezi sondami je u přelivné hrany M1. Průběhy hladin jsou u všech tří měření téměř stejné. Při průtoku 10 l/s dojde v místě sondy č.3 k navýšení hladiny oproti hladině ve žlabu. Poté hladina směrem k sondě č.2 klesá, viz průběh hladin:



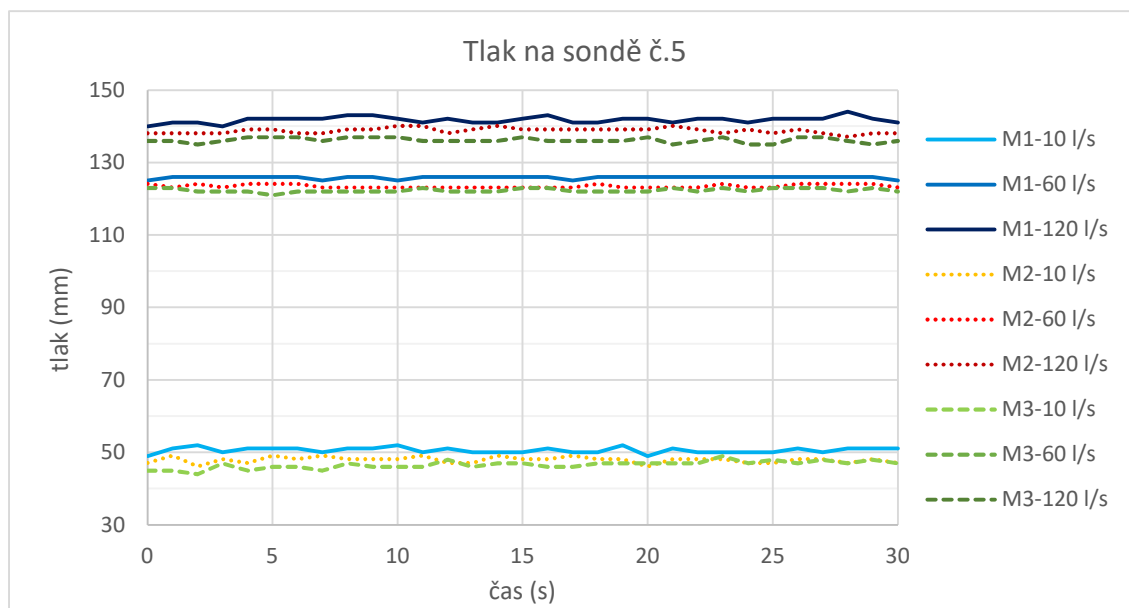


Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	101,09	168,68	167,74	82,62	182,04	168,23	74,68	224,48	254,55
Medián (mm)	100,77	168,97	154,97	82,17	184,17	156,17	75,97	224,97	254,97
Směr. odchylka	4,37	14,47	33,27	2,24	14,01	40,62	5,08	7,91	6,73
Rozptyl	19,12	209,43	1107,14	5,02	196,18	1649,87	25,82	62,57	45,34

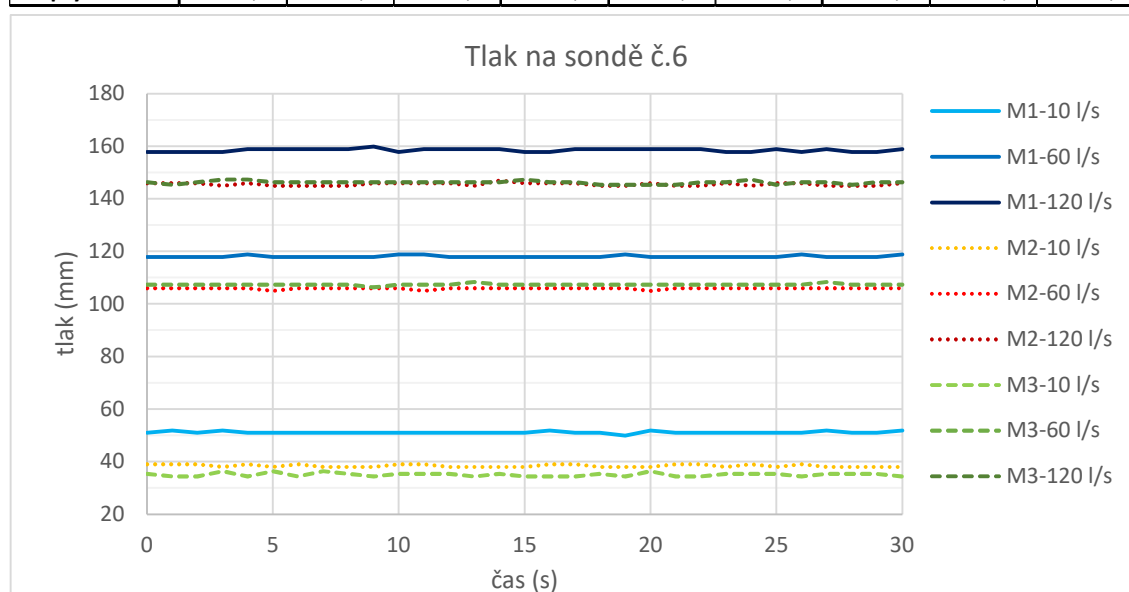
Průběh tlaků u sondy č.4 je velmi rozkolísaný. V případě čtvrtkruhové hrany – M1 – tlak s přibývajícím průtokem roste a průměrné hodnoty tlaku během 30 s jsou vyrovnané až do průtoku 50 l/s, při 60 l/s dojde k propadu a k velkému rozptylu tlaku. Tlak se opět uklidňuje a postupně roste s navyšováním průtoku a u maximální hodnoty průtoku 120 l/s dojde znovu ke skokovému propadu tlaku.

Obdobný průběh tlaků je i u půlkruhové hrany – M2. Průběhy tlaků jsou u hodnot neznázorněných na grafu ale více proměnlivé než u varianty M1.

Tlaky změřené u pravouhlé přelivné hrany mají oproti zaobleným hranám velmi vyrovnané průměrné hodnoty tlaků a nedochází ke skokovému snížení. Hodnoty tlaku se zvyšují postupně s přibývajícím průtokem.



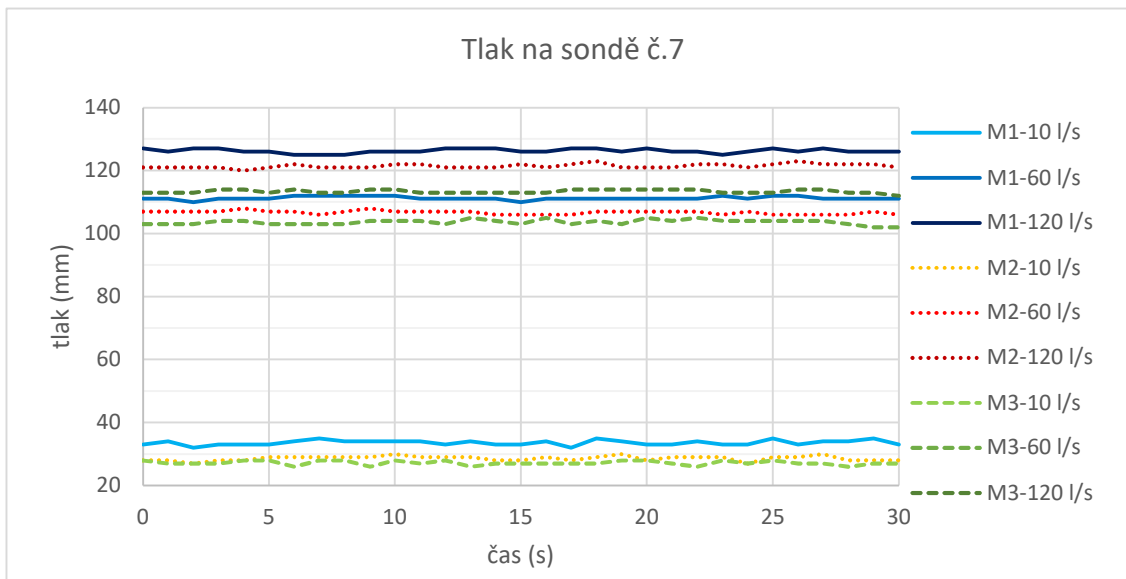
Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravoúhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	50,58	125,87	141,74	47,94	123,49	138,81	46,58	122,32	136,19
Medián (mm)	50,03	126,03	142,03	48,13	123,13	139,13	47,00	122,00	136,00
Směr. odchylka	0,77	0,34	0,87	0,83	0,48	0,74	1,07	0,53	0,68
Rozptyl	0,59	0,12	0,75	0,69	0,23	0,54	1,15	0,28	0,46



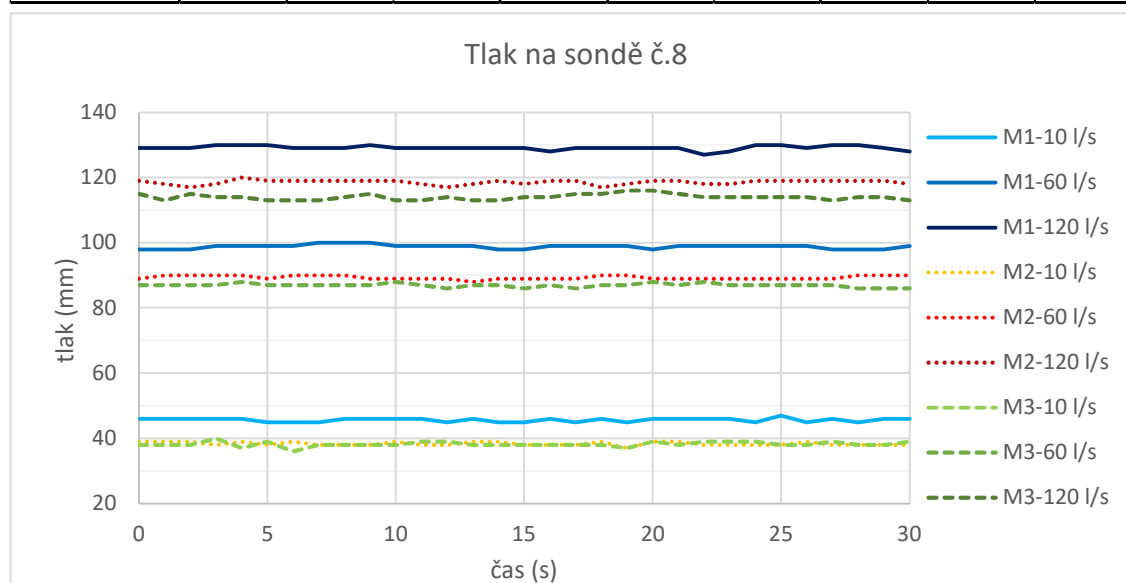
Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravoúhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	51,06	118,09	158,55	38,42	105,90	145,58	35,04	107,40	146,27
Medián (mm)	50,90	117,90	158,90	38,00	106,00	146,00	35,37	107,37	146,37
Směr. odchylka	0,43	0,38	0,54	0,50	0,30	0,56	0,70	0,32	0,61
Rozptyl	0,19	0,14	0,29	0,25	0,09	0,31	0,49	0,10	0,37

Sondy č.5 a č.6 jsou v horní a dolní třetině uší klávesy blíže ke středu. Sonda č.6 je v horní třetině blíže k nátoky, voda sem přepadá z přímé přelivné hrany úzké klávesy a z bočních stěn. Přepadající paprsek je méně ovlivněný na začátku skluzu vodou ze stran. Hodnoty průměrných tlaků jsou stálé, u půlkruhové přelivné hrany a pravoúhlé hrany jsou velmi vyrovnané, hodnoty u čtvrtkruhové přelivné hrany jsou pro každý průtok jsou vyšší přibližně o 10 mm než u zbylých dvou přelivných hran.

Tlaková sonda č.5 je umístěna v dolní třetině klávesy. Průtok je zde ovlivněn přepadající vodou z boků a všechny tři přelivné hrany mají průběh tlaků pro všechny měřené průtoky stálý a téměř stejný.



Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	33,58	111,19	126,23	28,61	106,71	121,45	27,19	103,61	113,39
Medián (mm)	34,00	111,00	126,00	29,00	107,00	121,00	27,00	104,00	113,00
Směr. odchylka	0,77	0,55	0,68	0,76	0,58	0,67	0,71	0,69	0,50
Rozptyl	0,59	0,30	0,46	0,57	0,34	0,45	0,51	0,48	0,25

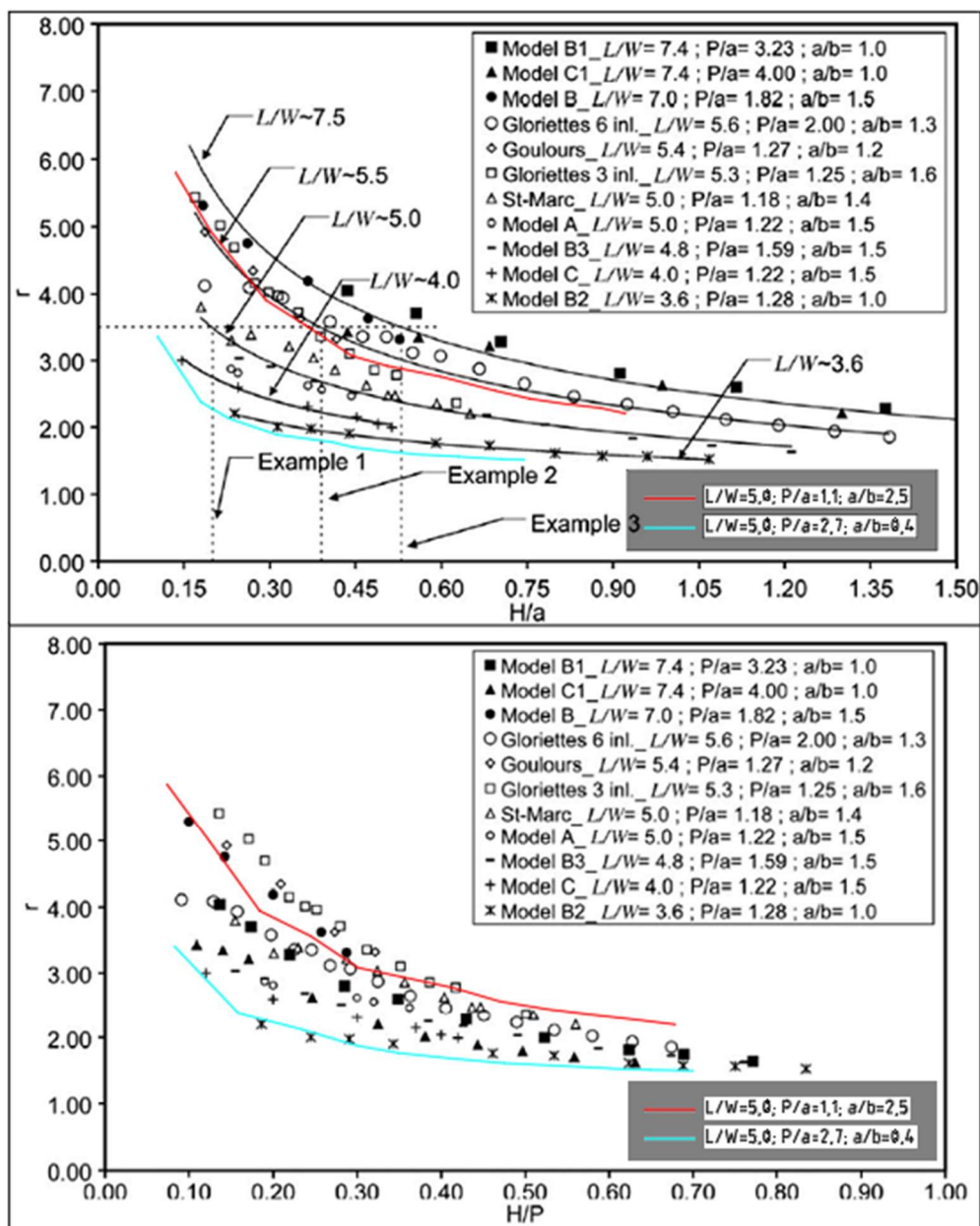


Přelivná hrana	M1 - čtvrtkruhová			M2 - půlkruhová			M3 - pravouhlá		
Průtok (l/s)	10	60	120	10	60	120	10	60	120
Průměr (mm)	45,64	98,77	129,06	38,35	89,35	118,55	38,23	86,94	114,00
Medián (mm)	45,97	98,97	128,97	38,00	89,00	119,00	38,00	87,00	114,00
Směr. odchylka	0,54	0,59	0,68	0,55	0,53	0,72	0,76	0,53	0,89
Rozptyl	0,29	0,35	0,46	0,30	0,28	0,52	0,58	0,28	0,79

Na pravé krajní úzké klávese jsou umístěny sondy č.7 a č.8. Průběhy tlaků jsou podobné jako u prostřední užší klávesy, ale jsou nižší, protože voda měla možnost ze strany přepadat mimo labyrintový přeliv.

### 9.2.3 Rozšíření studie použité k hydrotechnickým výpočtům

Grafy k hydrotechnickým výpočtům převzaté z odborného článku *Discharge Capacity of Piano Key Weir* mají poměr kláves  $a/b = 1,0 - 1,6$ . Model použitý pro výběr přelivné hrany má poměr kláves  $a/b = 2,5$ , v případě varianty posazené protisměru vody je pak poměr  $0,4$ . Ani jeden z těchto poměrů není ve zmíněném článku. Je možné tedy grafy použité pro výpočet jsou rozšířeny o další dvě křivky.



Obrázek 25: Rozšíření grafů k použitých v kapitole 7.1 Hydrotechnické výpočty

### 9.2.4 Výběr tvaru přelivné hrany

Z hlediska kapacity má tvar přelivné hrany u použitých variant (čtvrtkruhová, půlkruhová, pravoúhlá) zanedbatelný vliv. Po porovnání průměrných tlaků pro různé přelivné hrany a jejich statistické charakteristiky se jeví varianta s pravoúhlou přelivnou hranou jako nejlepší řešení.

### 9.3 Optimalizovaný návrh labyrintového pianového přelivu

Finální návrh labyrintového bezpečnostního přelivu pro VD Finklův rybník má následující geometrii:

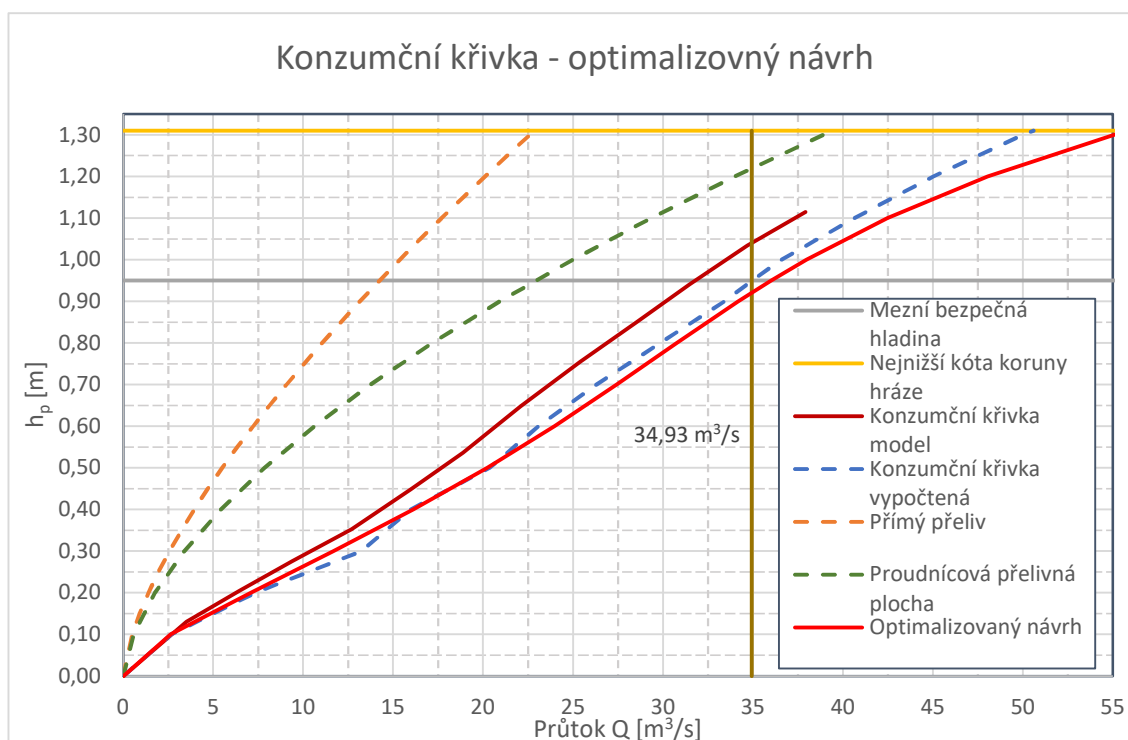
- 3 vnitřní klávesy o šířce **a = 1,5 m**
- 4 vnější klávesy o šířce **b = 0,95 m**
- Poměr vnitřní ku vnější klávese **a/b = 1,6**
- 6 stěn spojujících klávesy o šířce **B = 6,0 m**
- Celková délka přelivné hrany **L = 49,80 m**
- Výška konstrukce **P = 1,9 m**
- Šířka konstrukce **W = 8,46 m**

Pro bezpečnostní přeliv je zvolená pravoúhlá přelivná hrana.

Pro optimalizovaný návrh je vypočtená kapacita pianového přelivu a konzumní křivka je porovnána s modelem a původními hydrotechnickými výpočty:

*Tabulka 9: Tabulka průtoku pro optimalizovaný návrh*

<b><math>h_p</math> [m]</b>	<b><math>Q_{pkw}</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>
0,00	0,00
0,10	2,65
0,20	7,11
0,30	11,70
0,40	16,13
0,50	20,24
0,60	23,98
0,70	27,44
0,80	30,77
0,90	34,19
<b>0,95</b>	<b>36,02</b>
1,00	37,98
1,10	42,48
1,20	48,05
1,30	55,12
1,31	55,92



Obrázek 26: Konzumční křivka pro optimalizovaný návrh pianového přelivu

Návrhový průtok  $34,93 \text{ m}^3/\text{s}$  je dosažen před hranicí mezní bezpečné hladiny, MVN Finklův rybník s optimalizovaným bezpečnostním pianovým přelivem a se stávajícím pevným přelivem v levém zavázání hráze bezpečně převedou průtok  $Q_{100}$ .

## 10 Závěr

Labyrintové pianové přelivy nejsou zatím příliš rozšířené ve světě, jejich tvar je předmětem mnoha studií a zatím není stanoven jeden konkrétní postup, jak tyto přelivy navrhovat. Tato práce potvrdila, že jejich kapacita je vyšší než u použití přímého přelivu. Díky tomu, že geometrie pianového přelivu může být velmi různorodá a jediné společné prvky jsou, že jejich základna je menší než půdorys klasických labyrintových přelivů a dochází k cyklickému střídání vnějších a vnitřních kláves, je každý labyrintový přeliv originál. Jejich kapacita je ovlivněna i morfologickými, klimatickými a hydrologickými podmínkami. Velký vliv na kapacitu mají boční kontrakce, jejichž vliv není uvažován na fyzikálních modelech použitých ve studiích. Návrh konstrukce podle těchto studií a odborných článků tedy nemůže být zcela správný. V určitých hodnotách průtoků (přepadových výšek) je vliv boční kontrakce velmi významný, významnější než u přímého přelivu, jelikož odebírá větší část délky přepadové hrany. Proto je nutné před stavbou pianového přelivu provést výzkum v laboratoři na fyzikálním modelu, na kterém je možné simulovat skutečné podmínky.

V této práci bylo zjištěno, že výběr tvaru příčného řezu na přelivné hraně má zanedbatelný vliv na kapacitu pianového přelivu. Větší význam má pro kapacitu pianového přelivu poměr vnějších a vnitřních kláves.

Cílem diplomové práce bylo ověření hydraulických podmínek pianového přelivu navrženého pro VD Finklův rybník na fyzikálním modelu v bakalářské práci. Po sestavení modelu bylo provedeno měření kapacity přelivu a tlaku ve vybraných místech. Konzumční křivka vypočtená a konzumční křivka modelu byly porovnány. Na modelu byla zjištěna menší kapacita přelivu než vypočtená, zejména vlivem bočních kontrakcí při vyšších průtocích. Proto bylo potřeba návrh pianového přelivu optimalizovat.

Finální návrh labyrintového pianového bezpečnostního přelivu má 4 vnější klávesy o šířce 0,95 m, 3 vnitřní klávesy o šířce 1,5 m. Vnější a vnitřní klávesy jsou spojeny 6 bočními stěnami o délce 6,0 m a celková délka přelivné hrany je 49,8 m. Tvar řezu přelivné hrany je zvolen pravoúhlý. Výška konstrukce je 1,9 m a její šířka 8,55 m. S ohledem na minimální krytí výztuže a možnost promrzání konstrukce v zimních měsících je tloušťka konstrukce min. 250 mm. Kapacita navrženého bezpečnostního přelivu spolu s přímým přelivem na levé straně hráze by měla zajistit bezpečný průchod  $Q_{100}$  přes VD Finklův rybník.

## 11 Seznam použitých zdrojů

- [1] CHANSON, Hubert. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Second Edition. Great Britain: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 0750659785.
- [2] GABRIEL, P. a ČÁBELKA, J. *Matematické modelování v hydrotechnice*. Praha: Academia, 1987.
- [3] HAVLÍK, Vladimír a MAREŠOVÁ, Ivana. *Hydraulika II: Příklady*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 8001013847.
- [4] KOZÁKOVÁ, Marie. *Zajištění bezpečnosti MVN Finklův rybník*. Bakalářská práce. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2022.
- [5] LEITE RIBEIRO, M.; BIERI, M.; BOILLAT, J.-L.; SCHLEISS, A.; SINGHAL, G. ET AL. DISCHARGE CAPACITY OF PIANO KEY WEIRS. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*. 2012, ROČ. 138, Č. 2, S. 199-203. ISSN 0733-9429. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://DOI.ORG/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000490](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000490).
- [6] *OPRAVA VODNÍ NÁDRŽE FINGER-PETROHRAD*. 2014.
- [7] *MANIPULAČNÍ ŘÁD VD FINKLŮV RYBNÍK*. 03/2020. CHOMUTOV: POVODÍ OHŘE, S. P. – ODBOR VODOHOSPODÁŘSKÉHO ROZVOJE ODDĚLENÍ MANIPULAČNÍCH ŘÁDŮ A NÁDRŽÍ, 2020.
- [8] PRAHA: VODNÍ DÍLA - TBD a.s., 2011.
- [9] ČSN 75 0255. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987.
- [10] ONLINE. 2022. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://MAPY.CZ/TURISTICKA?X=13.4418965&Y=50.1347604&Z=15&Q=RYBN%C3%ADK%20PETROHRAD&SOURCE=BASE&ID=2031565&DS=2](https://mapy.cz/turisticka?x=13.4418965&y=50.1347604&z=15&q=RYBN%C3%ADK%20PETROHRAD&source=base&id=2031565&ds=2). [CIT. 2022-04-17].
- [11] LAUGIER, Frederic. *Hydropower France*. online. IN: . [CIT. 2024-01-01].



## 12 Seznam použitých zkratek

MVN	malá vodní nádrž
VD	vodní dílo
ČSN	česká technická norma
MBH	mezní bezpečná hladina
KMH	kontrolní maximální hladina
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
S-JTSK	System jednotné trigonometrické sítě katastrální
PKW	Piano Key Weir
s. p.	státní podnik

## 13 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Základní parametry proudění [1]</i> .....	2
<i>Obrázek 2: PKW na přehradě Goulours (Frederic Laugier [11])</i> .....	7
<i>Obrázek 3: Schématický řez labyrintovým PKW přelivem [5]</i> .....	8
<i>Obrázek 4: Lokalita Finklova rybníku (Mapy.cz) [10]</i> .....	10
<i>Obrázek 5: Čára překročení m-denních průtoků a čára opakování N-letých průtoků (ČHMÚ) [7]</i> 12	
<i>Obrázek 6: Stavidlová výpust</i> .....	13
<i>Obrázek 7: Stavidlová výpust</i> .....	13
<i>Obrázek 8: Schematický půdorys a řez labyrintovým přelivem</i> .....	16
<i>Obrázek 9: Průtokový poměr <math>r</math> jako funkce <math>H/P</math> pro různé modely labyrintového přelivu [5]</i> ....	17
<i>Obrázek 10: Průtokový poměr <math>r</math> jako funkce <math>H/P</math> pro různé modely labyrintového přelivu [5]</i> ...	17
<i>Obrázek 11: Konzumční křivka labyrintového přelivu – vypočtená</i> .....	19
<i>Obrázek 12: 3D model přelivu</i> .....	20
<i>Obrázek 13: Navržený model ve žlabu (pohled po směru proudění)</i> .....	20
<i>Obrázek 14: Schéma umístění tlakových sond</i> .....	21
<i>Obrázek 15: Legenda ke grafům průběhu tlaků</i> .....	21
<i>Obrázek 16: Konzumční křivka modelu</i> .....	25
<i>Obrázek 17: Půdorys přelivné hrany proudnicové plochy</i> .....	26
<i>Obrázek 18: Porovnání konzumčních křivek</i> .....	27
<i>Obrázek 19: Graf součinitele přepadu modelu</i> .....	28
<i>Obrázek 20: 3D model přelivných hran</i> .....	30
<i>Obrázek 21: Půlkruhová přelivná hrana</i> .....	30
<i>Obrázek 22: Čtvrtkruhová přelivná hrana</i> .....	30
<i>Obrázek 23: Porovnání konzumčních křivek pro různé přelivné hrany</i> .....	31
<i>Obrázek 24: Schéma rozmístění tlakových sond</i> .....	32
<i>Obrázek 25: Rozšíření grafů k použitých v kapitole 7.1 Hydrotechnické výpočty</i> .....	37
<i>Obrázek 26: Konzumční křivka pro optimalizovaný návrh pianového přelivu</i> .....	39

## 14 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1:</i> Základní měřítka modelu [3] .....	6
<i>Tabulka 2:</i> Hydrologická data - Podvinecký potok (zdroj: ČHMÚ) [7] .....	12
<i>Tabulka 3:</i> Vstupní hodnoty pro výpočet bezpečnostního přelivu .....	18
<i>Tabulka 4:</i> Výpočet průtoku labyrintovým přelivem.....	19
<i>Tabulka 5:</i> Tabulka průtoků přes model labyrintového přelivu .....	25
<i>Tabulka 6:</i> Tabulka skutečných průtoků.....	27
<i>Tabulka 7 :</i> Skutečné hodnoty součinitele přepadu .....	28
<i>Tabulka 8:</i> Vstupní hodnoty pro výpočet délky přelivné hrany .....	29
<i>Tabulka 9:</i> Tabulka průtoku pro optimalizovaný návrh.....	38

## 15 Seznam rovnic

2.1 Poměr mezi charakteristickou délkou na prototypu a na modelu .....	2
2.2 Poměr mezi charakteristickou rychlostí na prototypu a na modelu .....	2
2.3 Poměr sil na prototypu a na modelu .....	3
2.4 Závislé parametry rozměrové analýzy .....	3
2.5 Závislé parametry rozmerové analýzy - bezrozměrné .....	3
2.6 Úprava bezrozměrných parametrů .....	3
2.7 Dynamická podobnost v laboratorních podmínkách .....	4
2.8 Froudovo kritérium .....	4
7.1 Poměr průtoků $r$ .....	16
7.2 Dosazení do rovnice 7.1 .....	18
7.3 Poměr $H/a$ .....	18
7.4 Délka přelivné hrany pianového přelivu .....	18
7.5 Výška konstrukce pianového přelivu .....	18
7.6 Součinitel přepadu pianového přelivu .....	19
7.7 Dosazení do rovnice 7.6 .....	19
8.1 Rovnice pro výpočet průtoku .....	26
8.2 Účinná délka přelivu .....	26
8.3 Součinitel přepadu pro proudnicovou plochu .....	26
9.1 Rovnice pro výpočet průtoku pianového přelivu .....	29
9.2 Minimální délka přelivné hrany pianového přelivu .....	29
9.3 Dosazení do rovnice 9.2 .....	29

## 16 Seznam příloh

Fotodokumentace

Grafy průběhu tlaků na jednotlivých sondách

P.1 Situační výkres širších vztahů

P.2 Katastrální situační výkres

P.3.1 Pianový bezpečnostní přeliv – půdorys

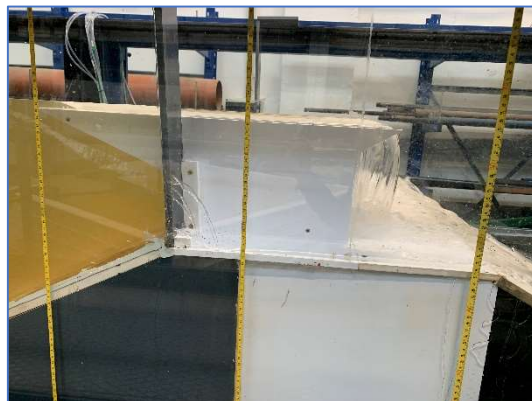
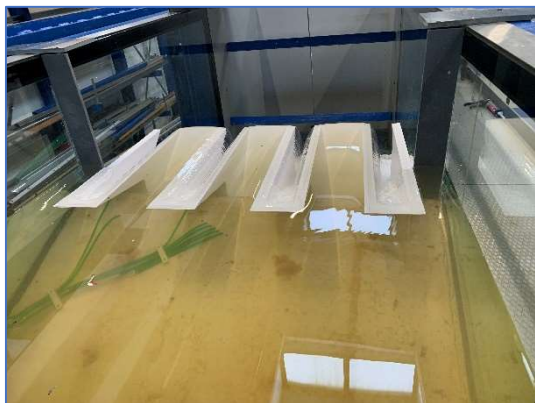
P.3.2 Pianový bezpečnostní přeliv – řezy

P.4 3D model pianového přelivu

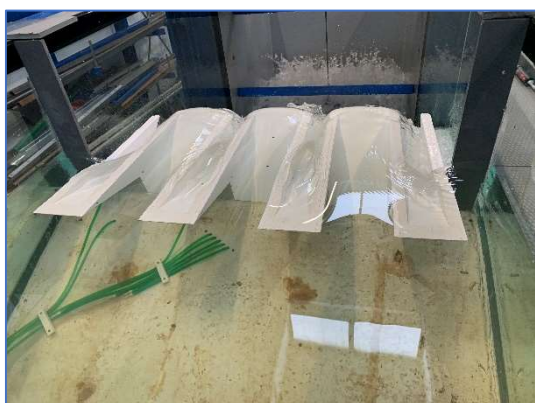
## Fotodokumentace

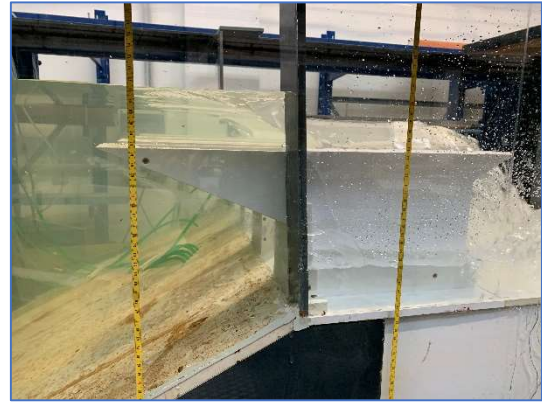
Měření průtoků pro model pianového přelivu navrženého v BP pro VD Finklův rybník

Průtok 10 l/s

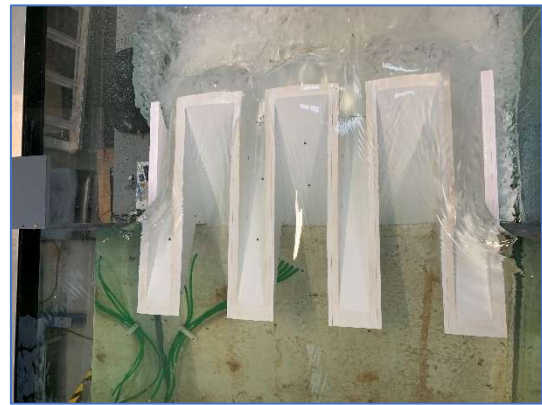
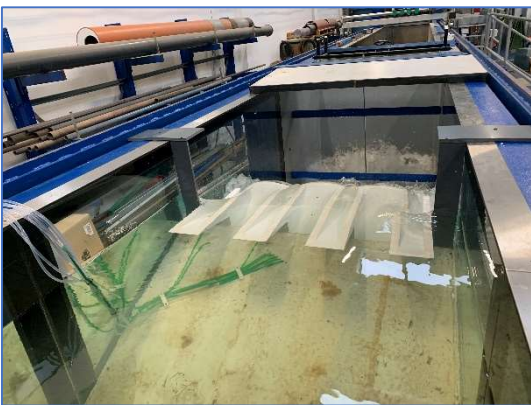


Průtok 60 l/s



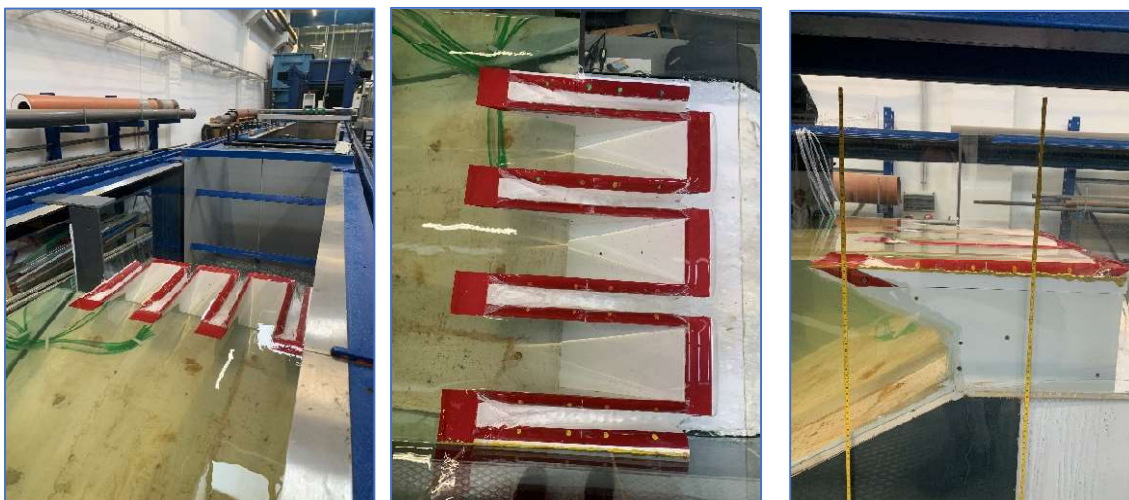


Průtok 12 l/s

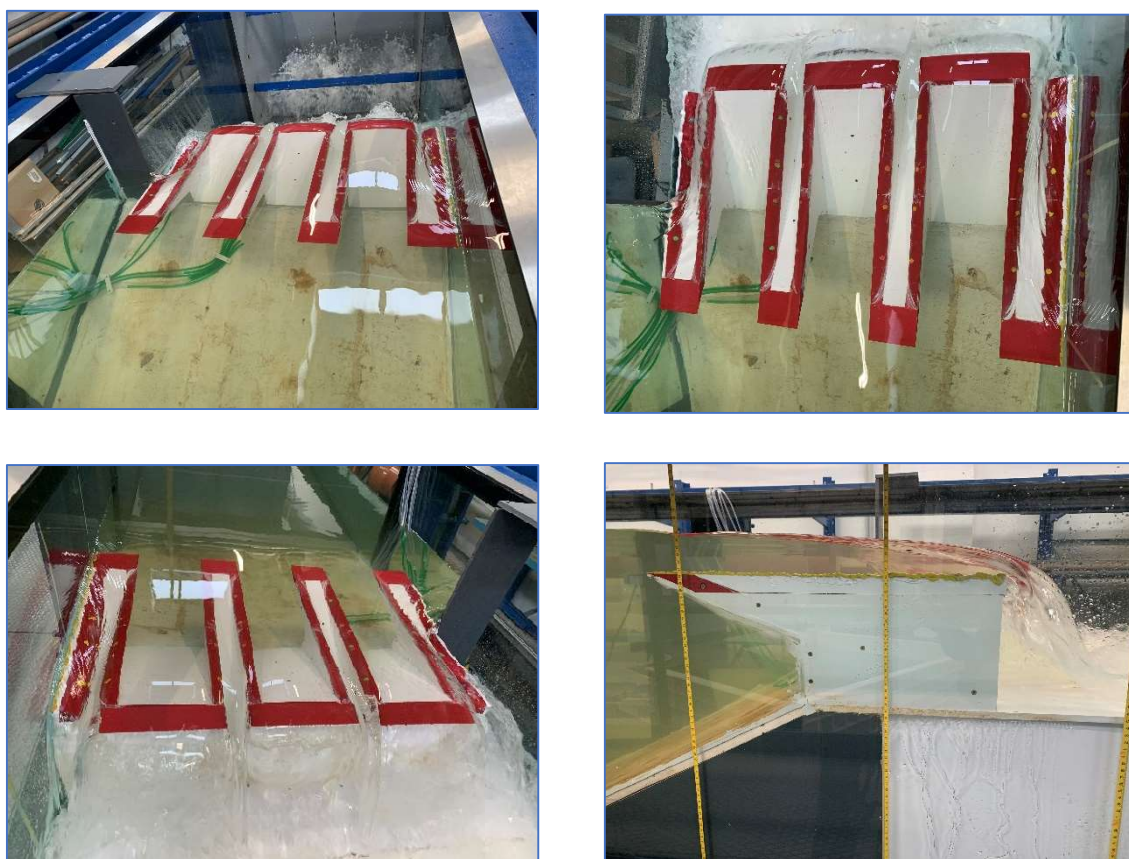


**Měření průtoků pro model čtvrtkruhové přelivné hrany**

**Průtok 10 l/s**

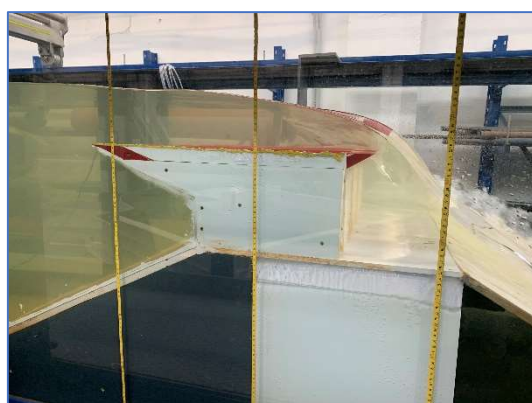


**Průtok 60 l/s**





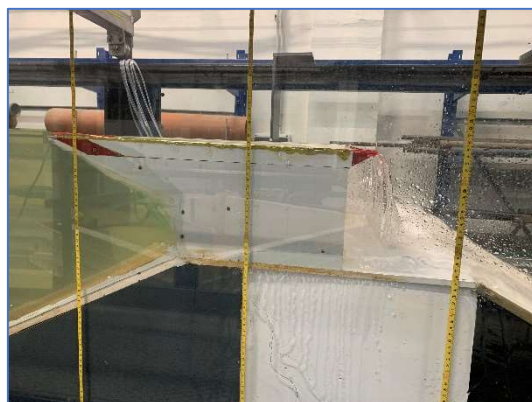
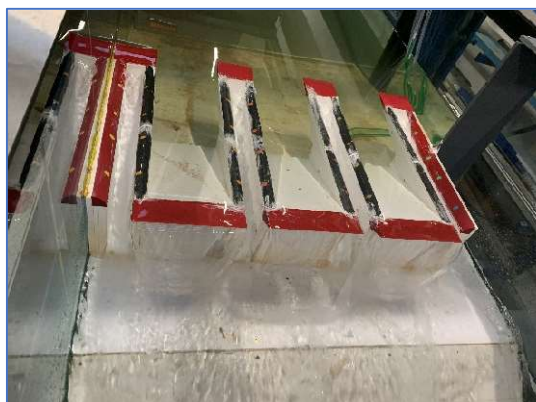
**Průtok 120 l/s**



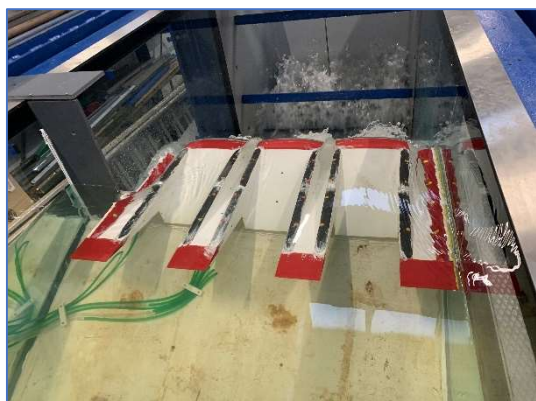
**Měření průtoků pro model půlkruhové přelivné hrany**

**Průtok 10 l/s**

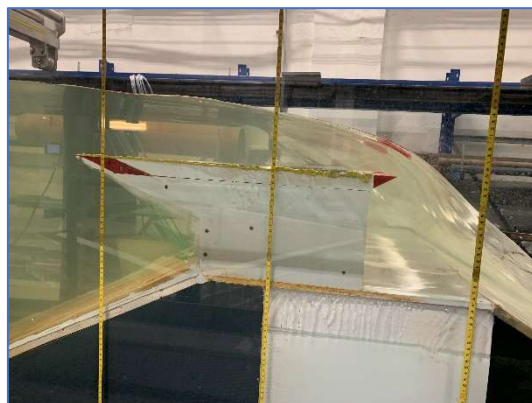
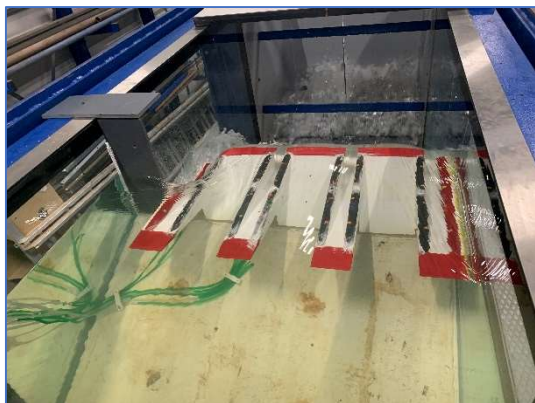




Průtok 60 l/s

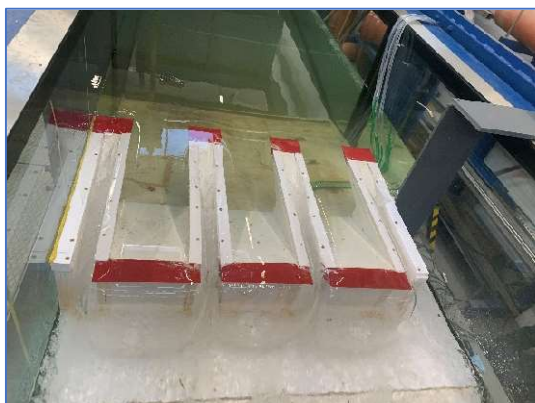
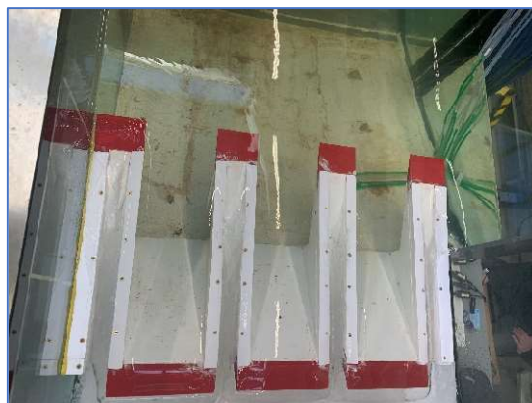


Průtok 120 l/s

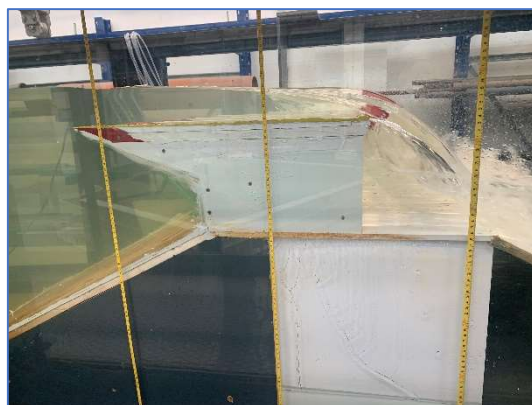


Měření průtoků pro model ortogonální přelivné hrany

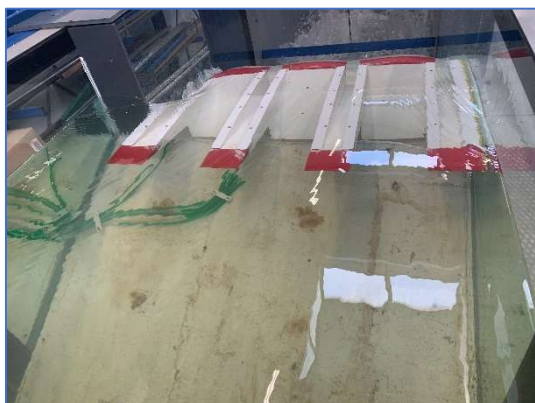
Průtok 10 l/s



**Průtok 60 l/s**

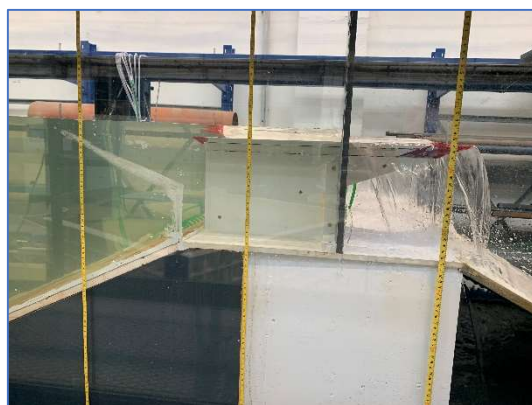
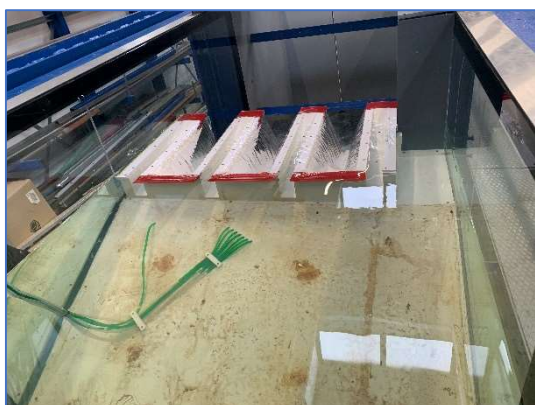
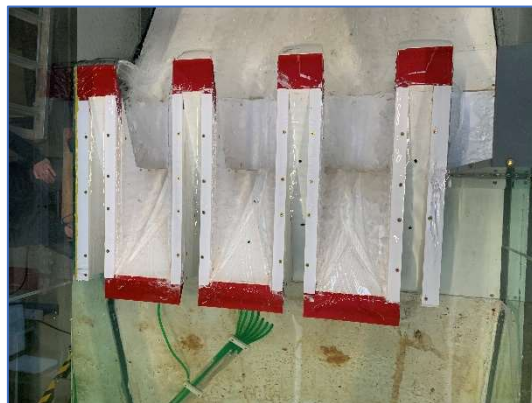
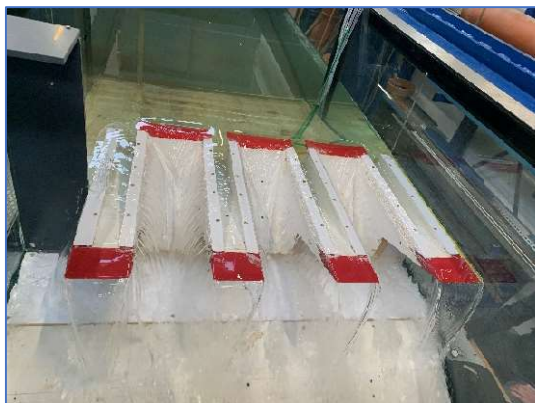


**Průtok 120 l/s**

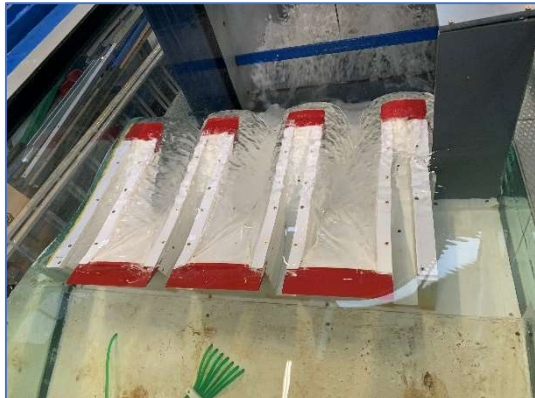
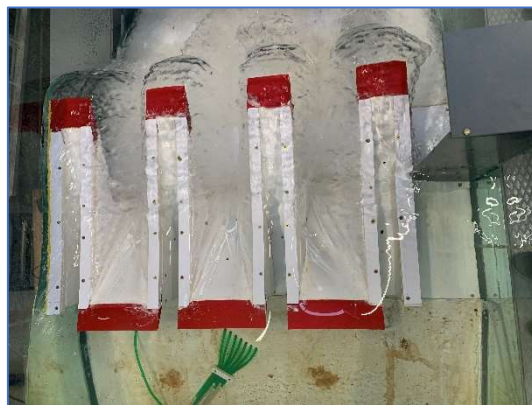
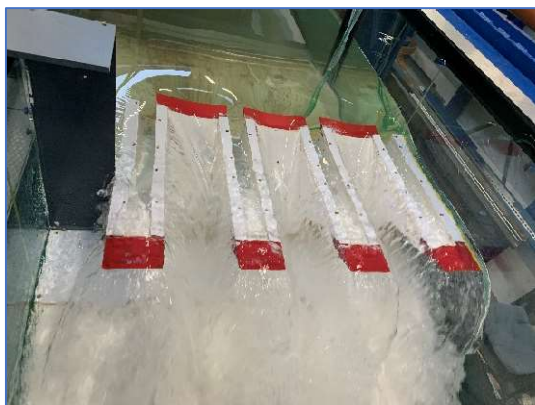


**Měření průtoků pro model ortogonální přelivné hrany – posazený proti vodě**

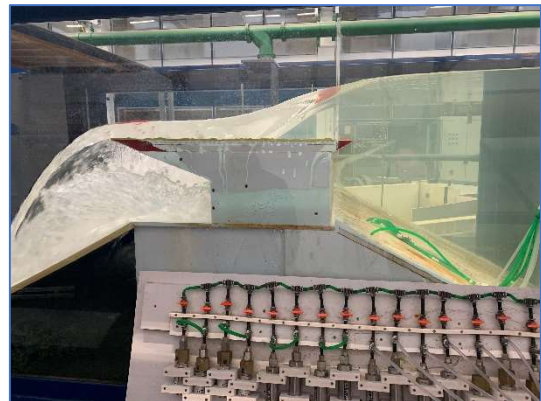
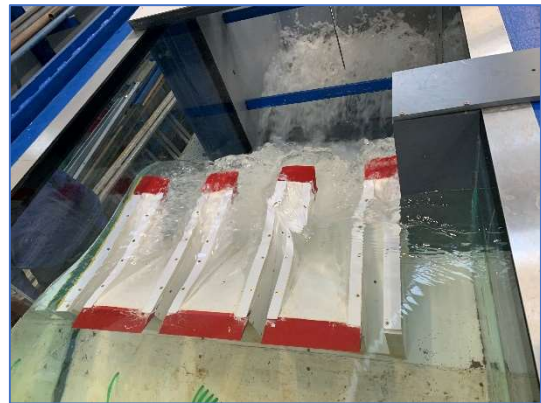
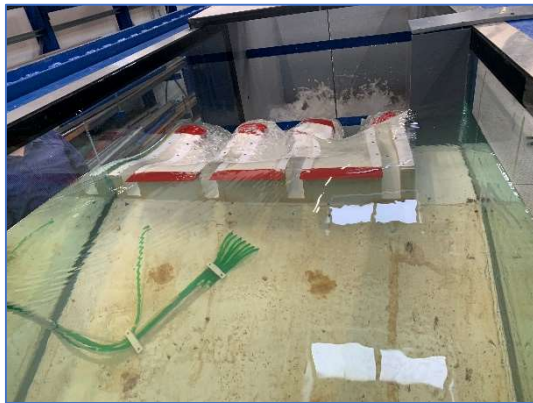
**Průtok 10 l/s**



**Průtok 60 l/s**



Průtok 120 l/s



## Grafy průběhu tlaků

### M-1: Měření tlaků na modelu s čtvrtkruhovou přelivnou hranou

Na grafech je pro vybrané průtoky vykreslen průběh minimálního, průměrného a maximálního tlaku během 30 s.

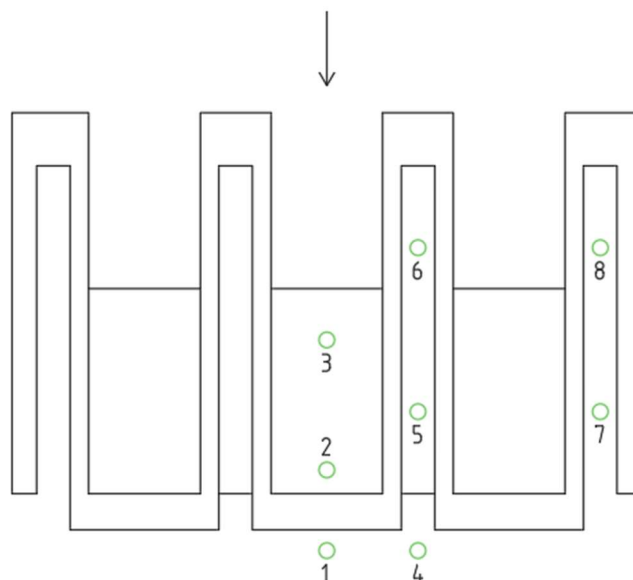
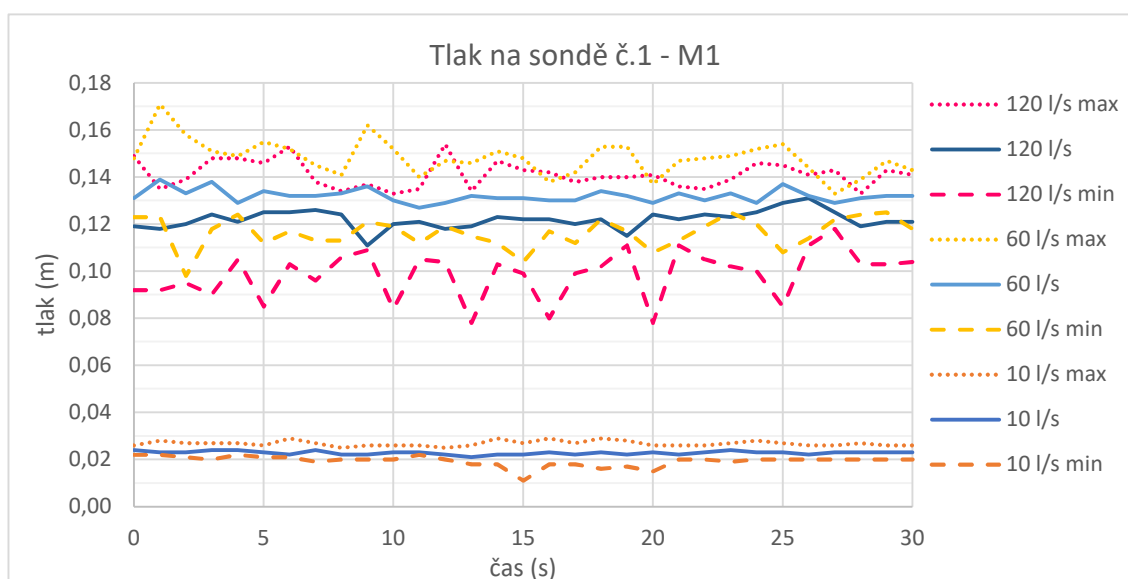
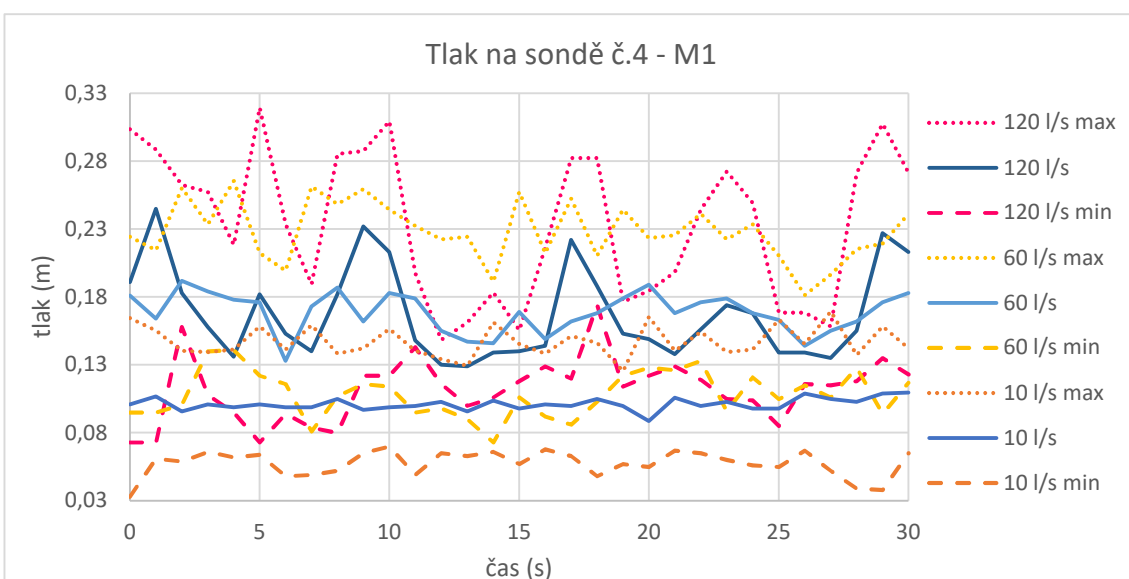
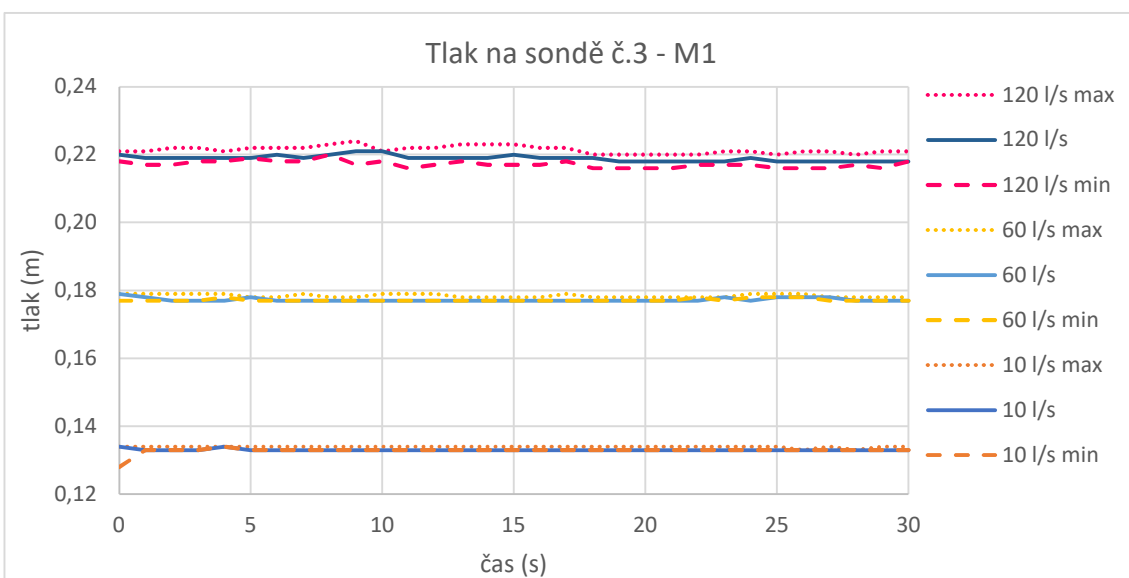
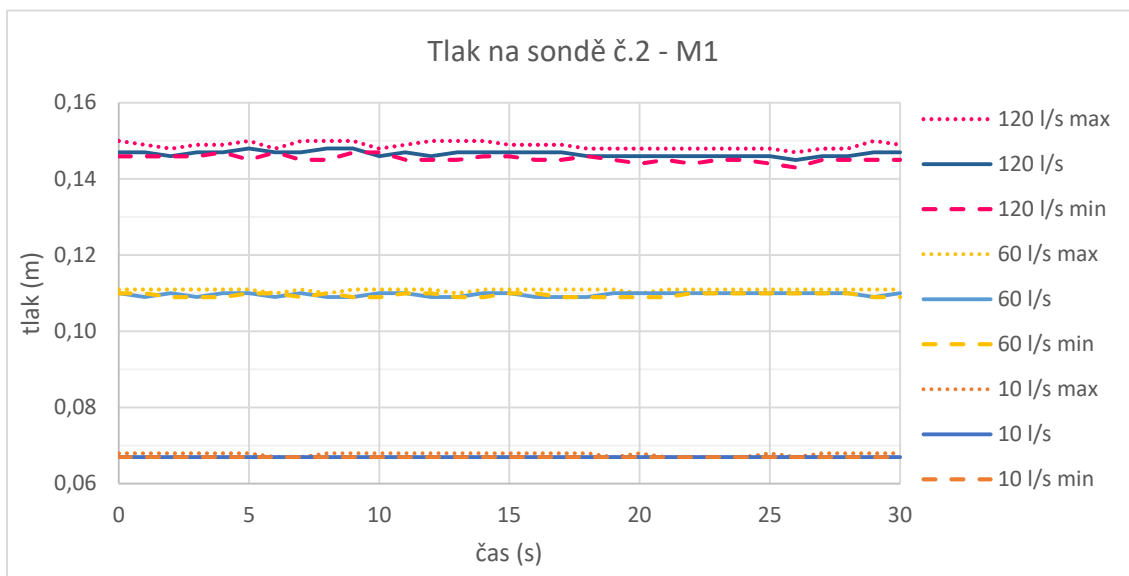
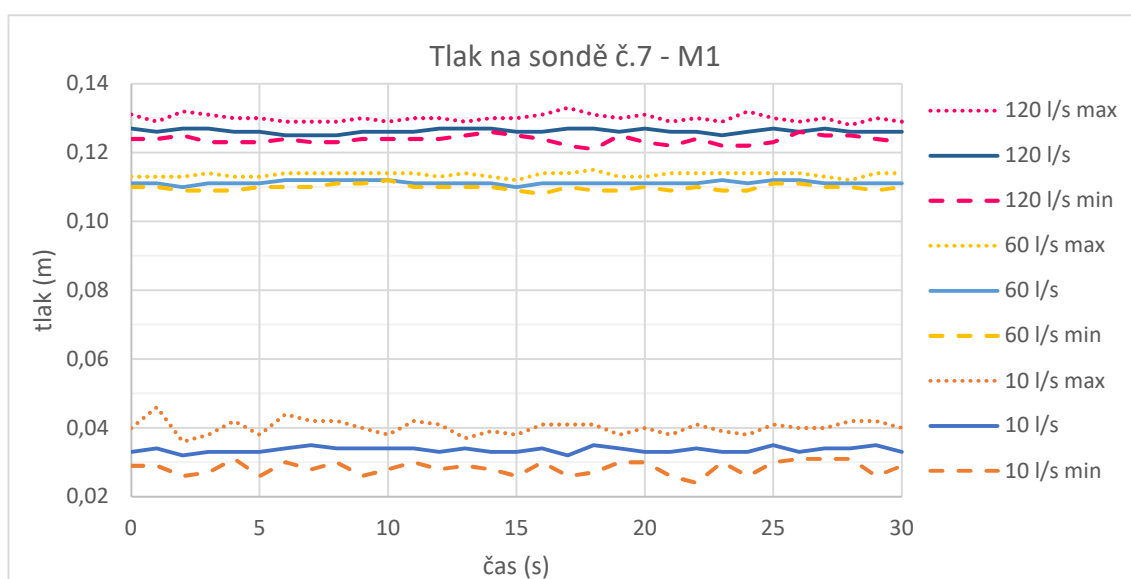
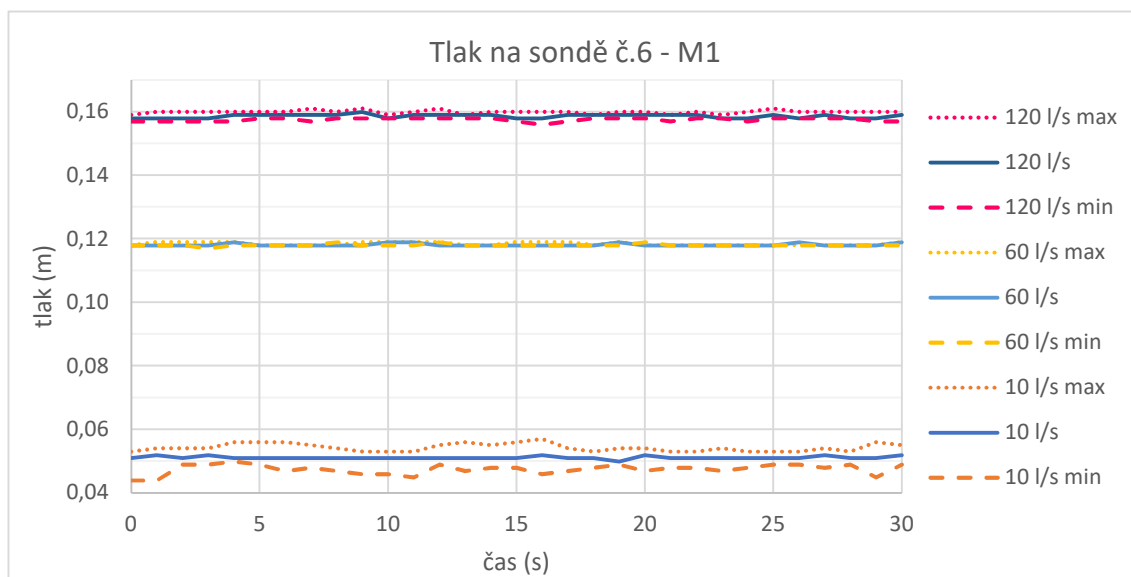
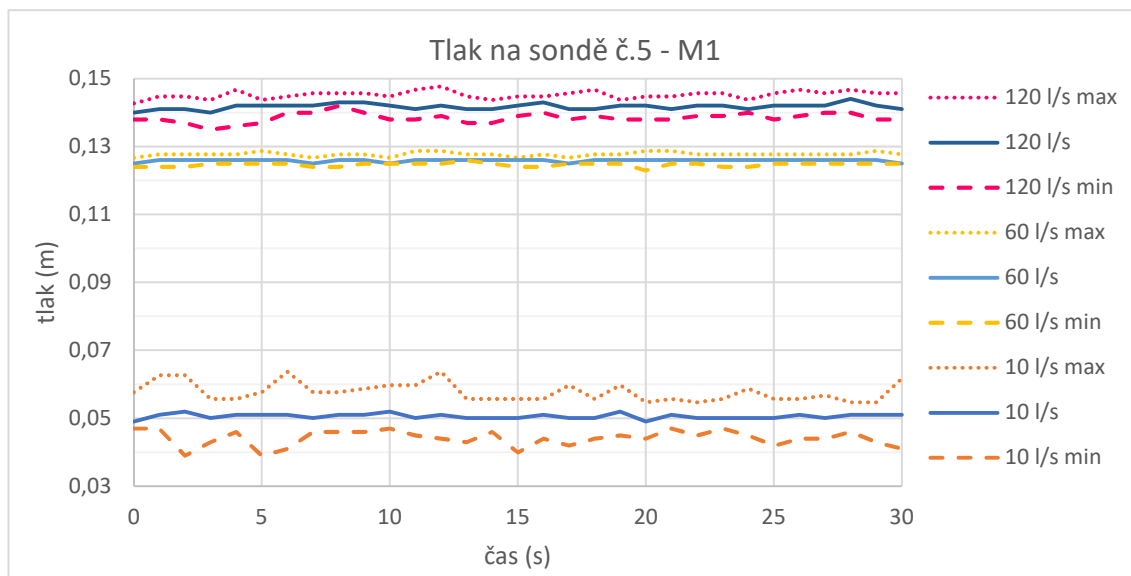


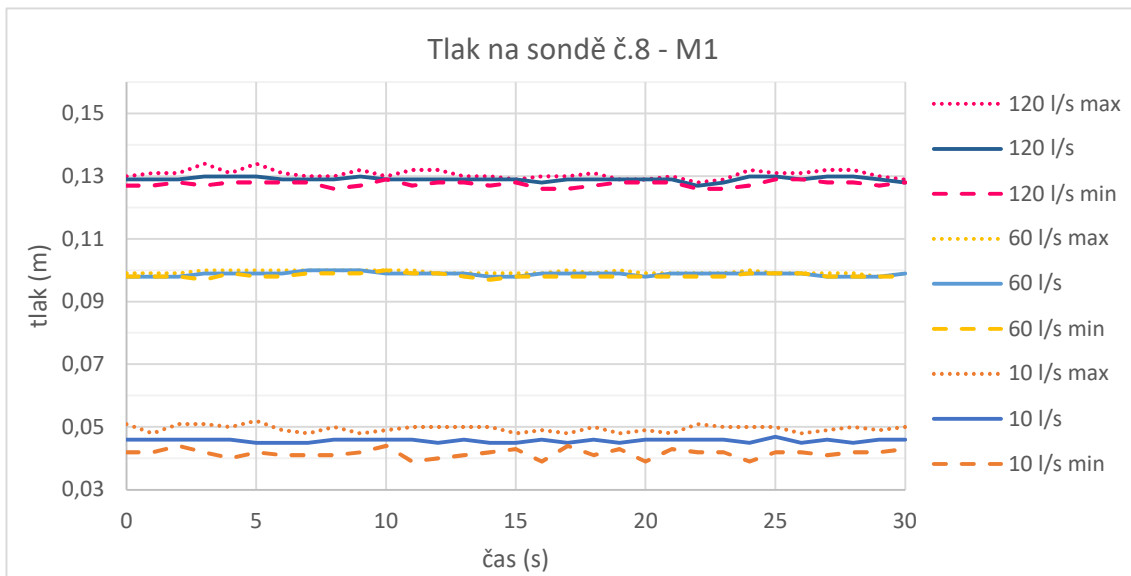
Schéma umístění tlakových sond





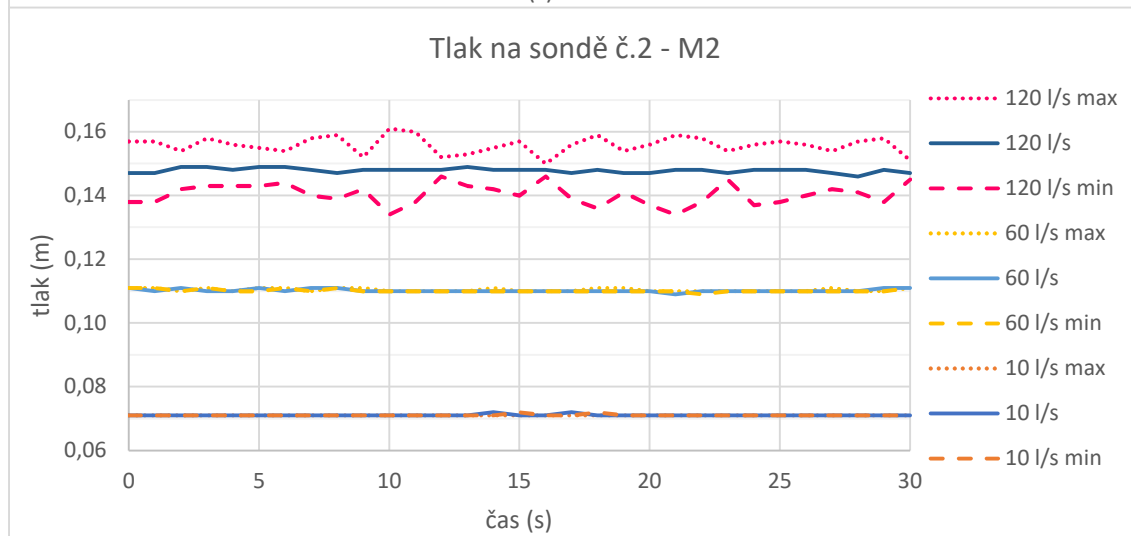
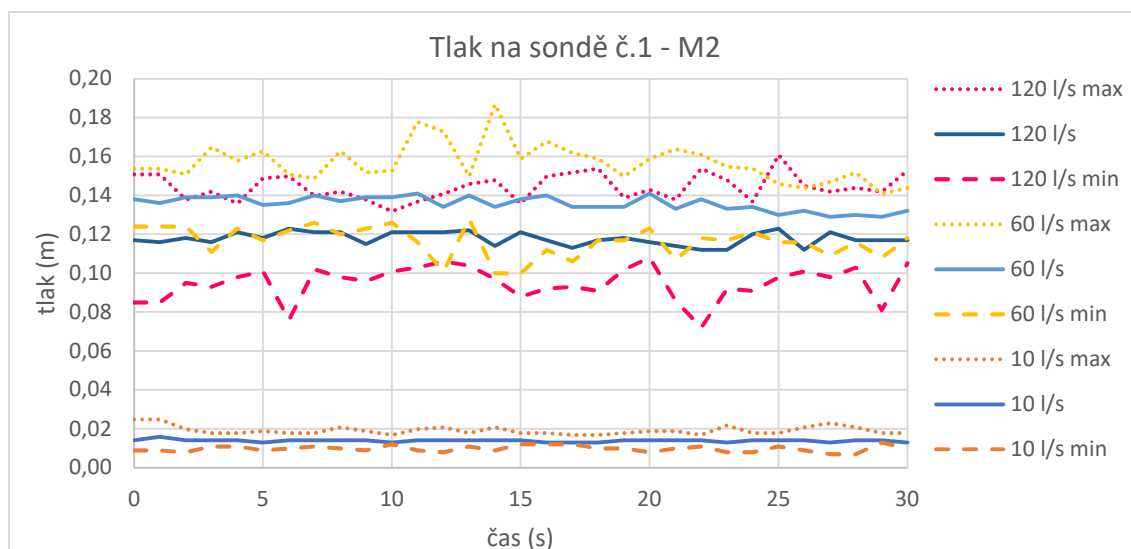


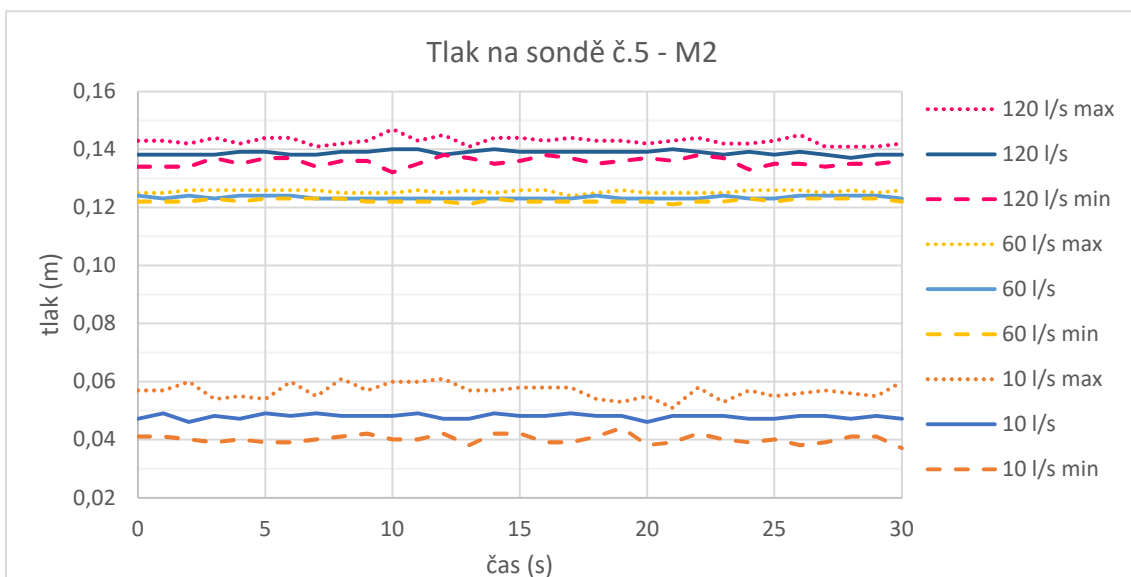
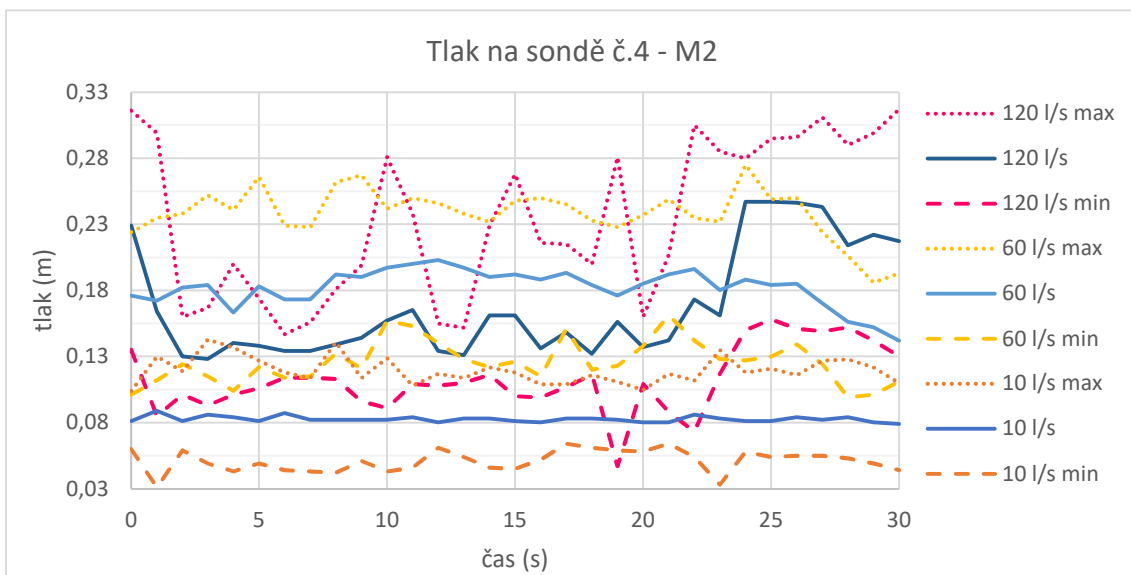
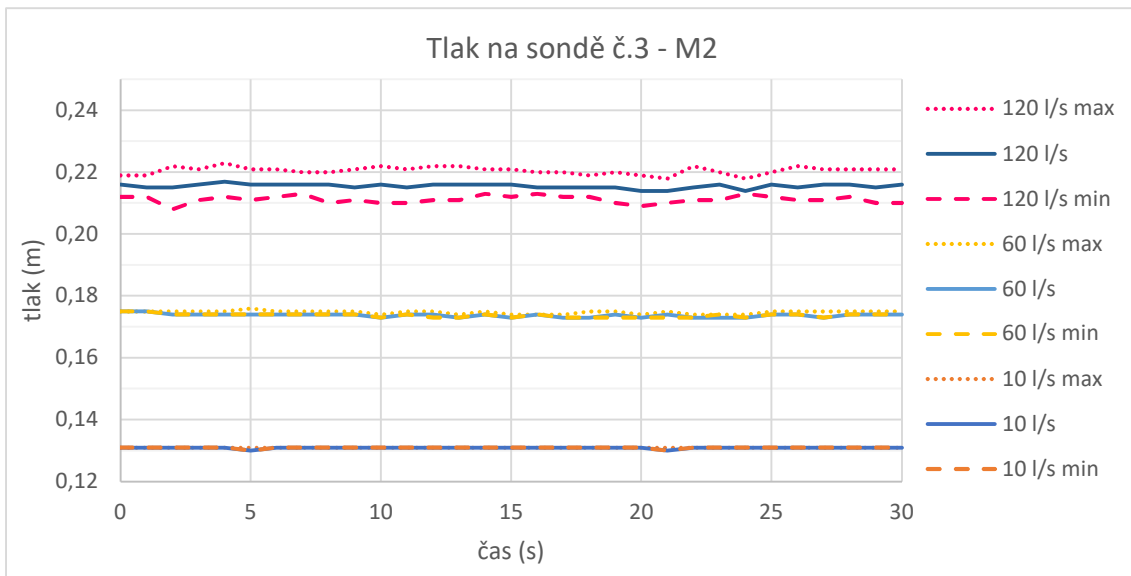


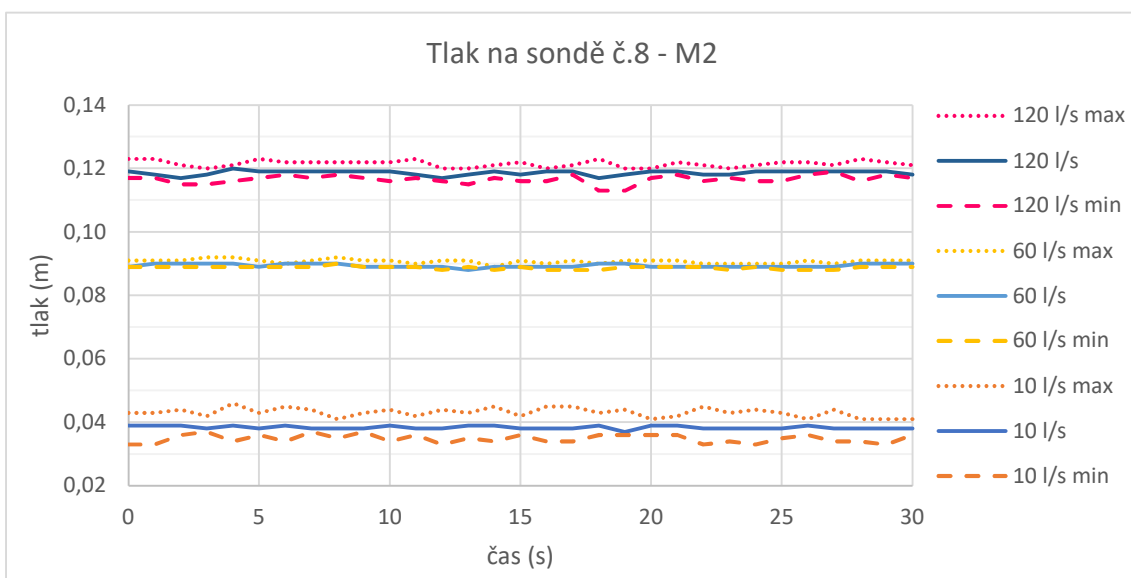
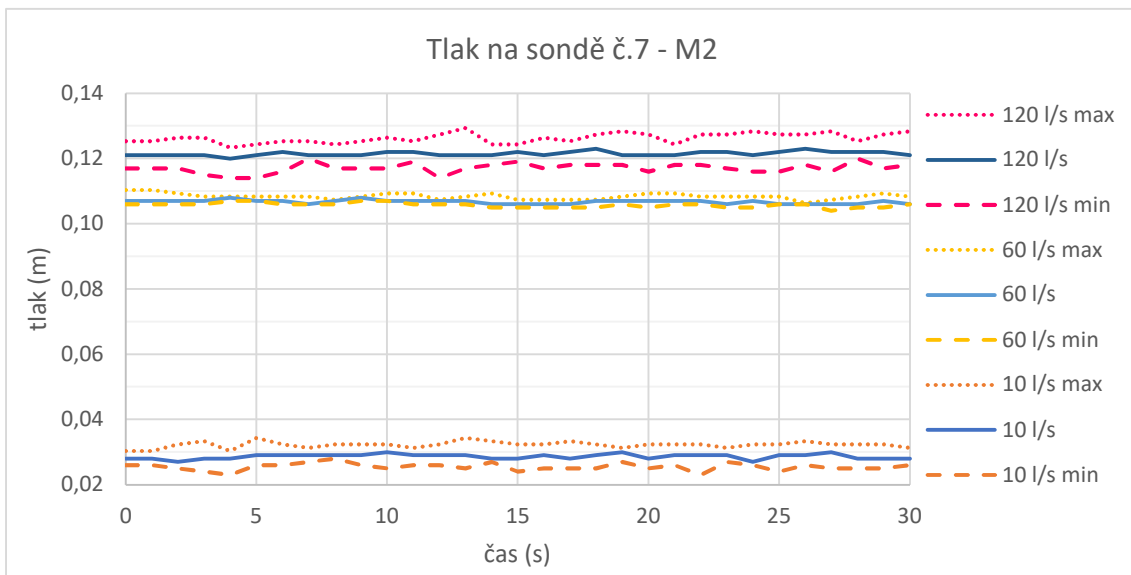
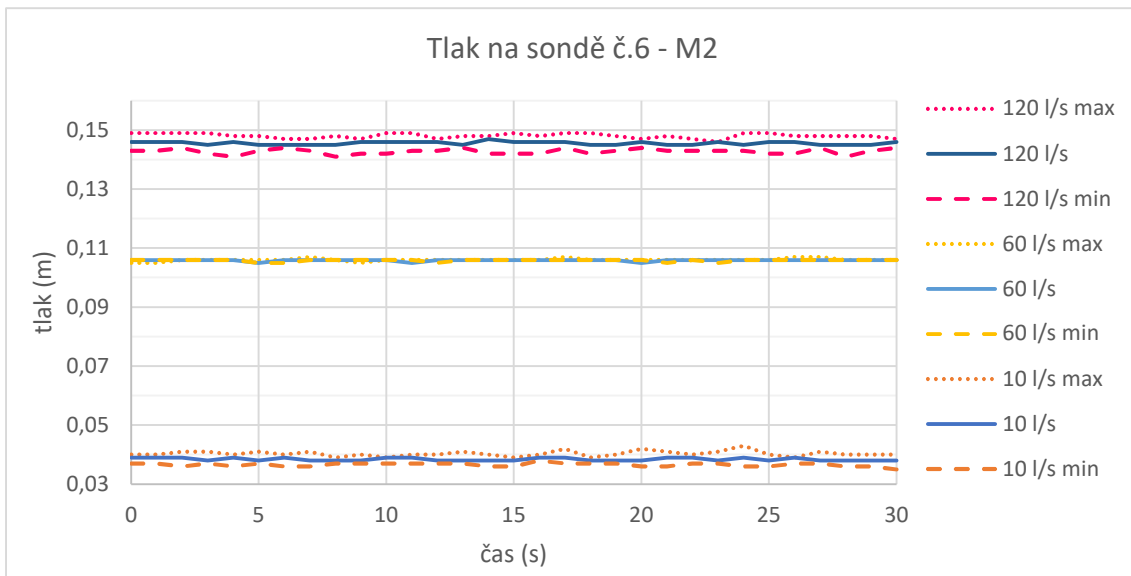


**M-2: Měření tlaků na modelu s půlkruhovou přelivnou hranou**

Schéma rozložení sond je shodné s měřením M-1.

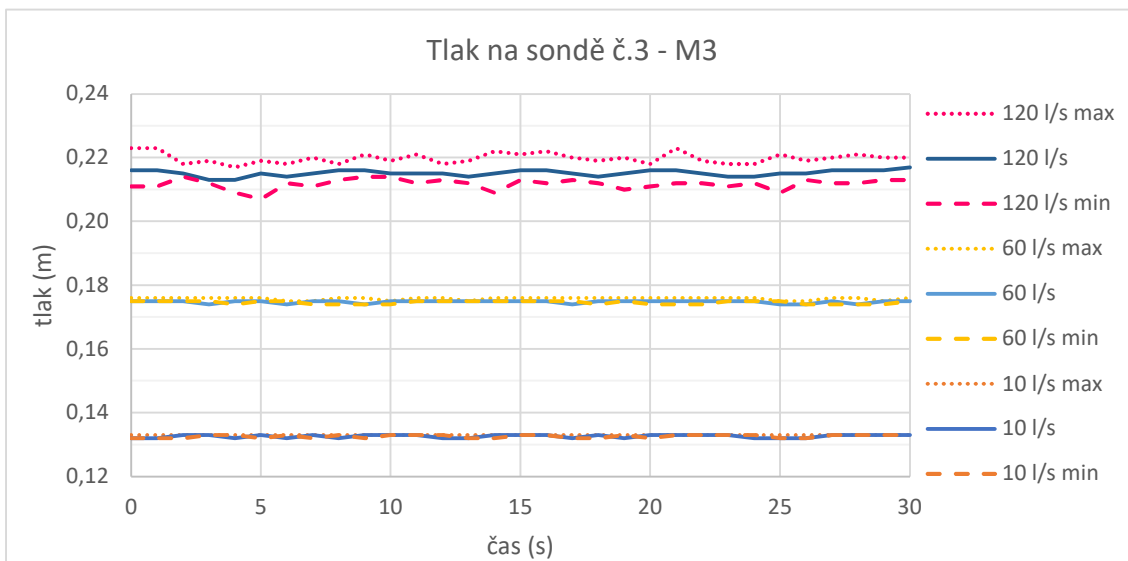
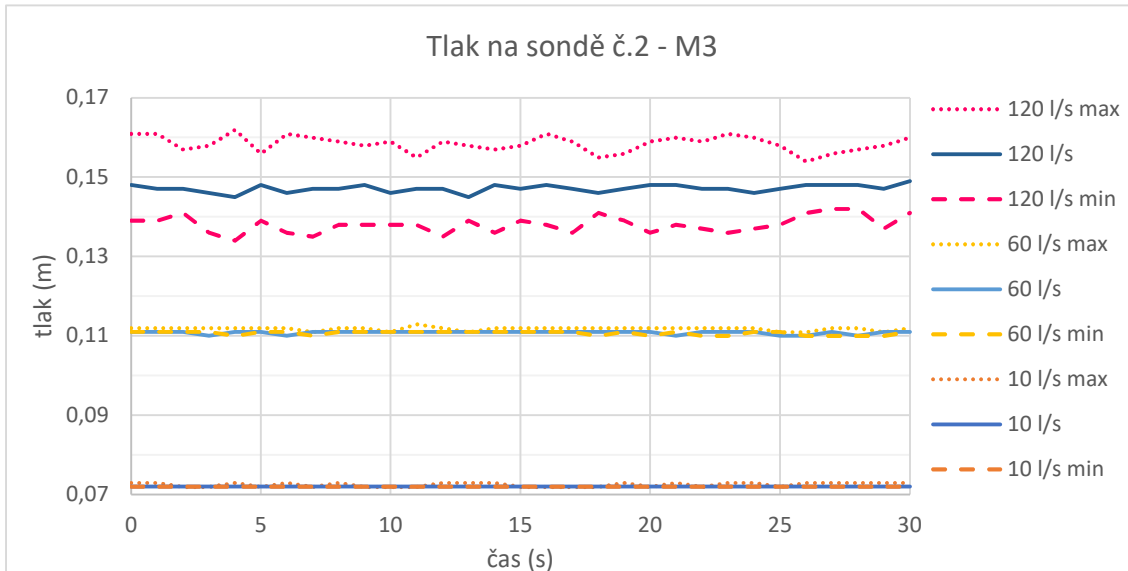
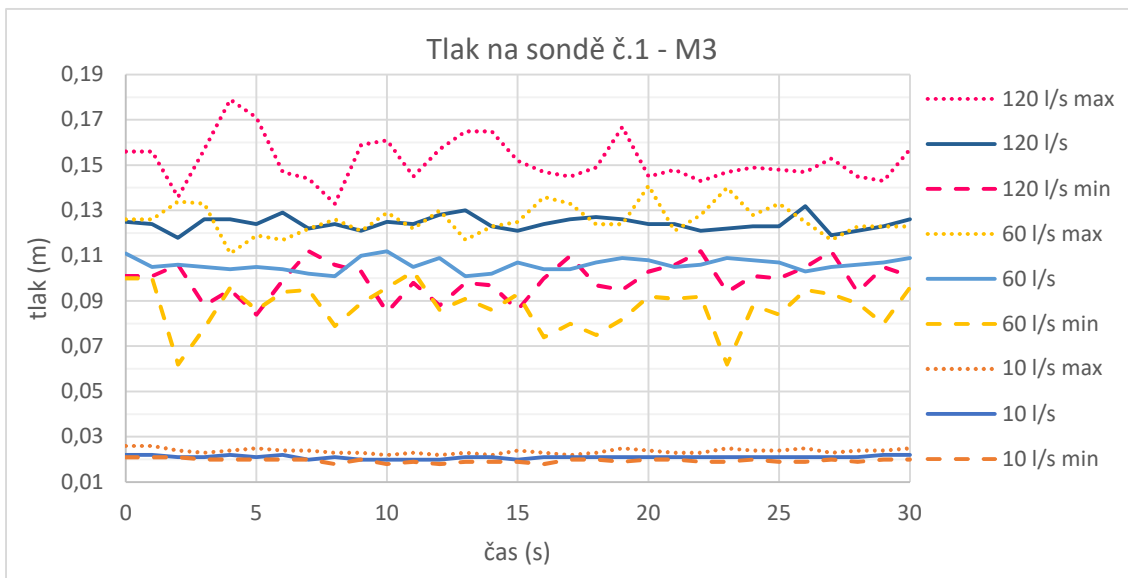


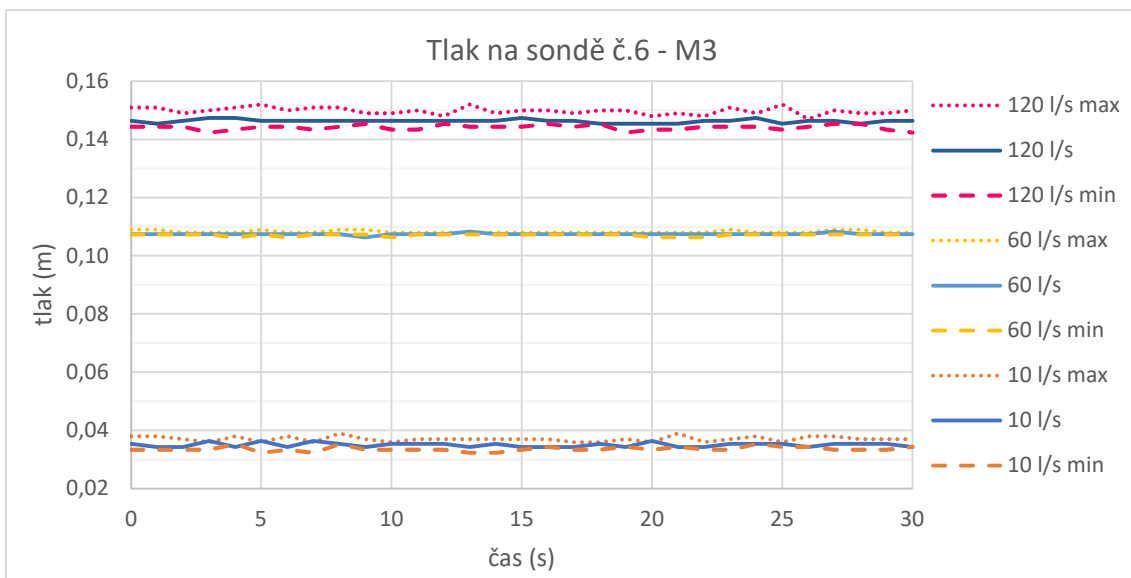
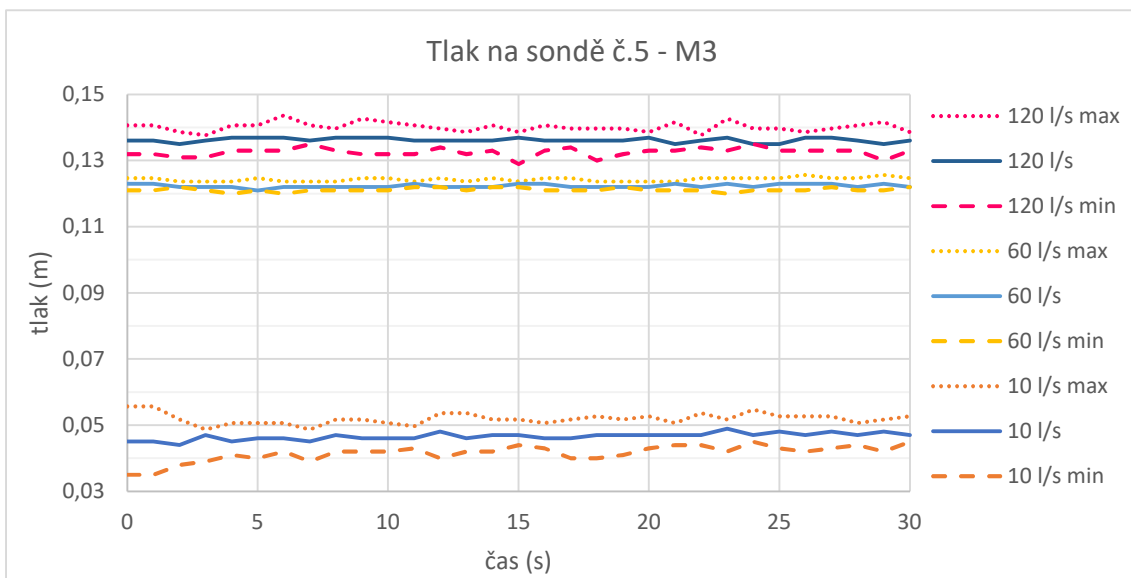
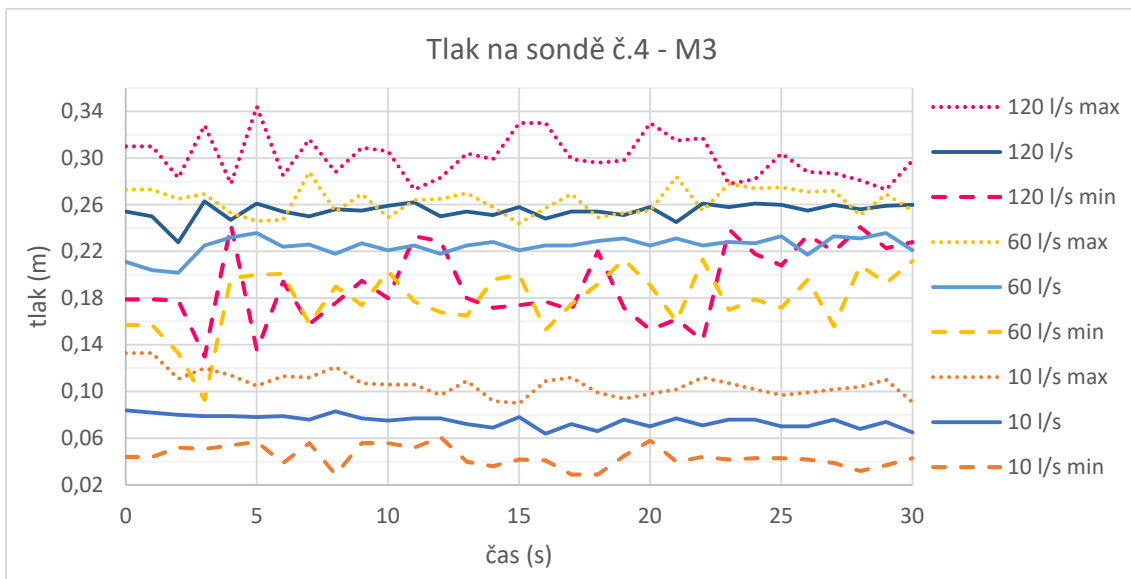


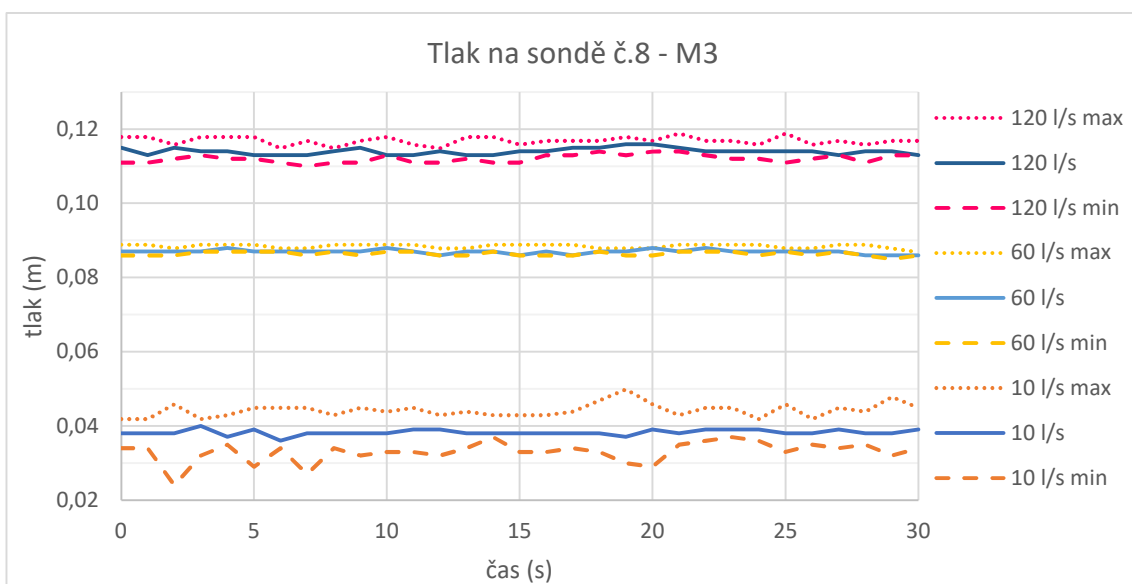
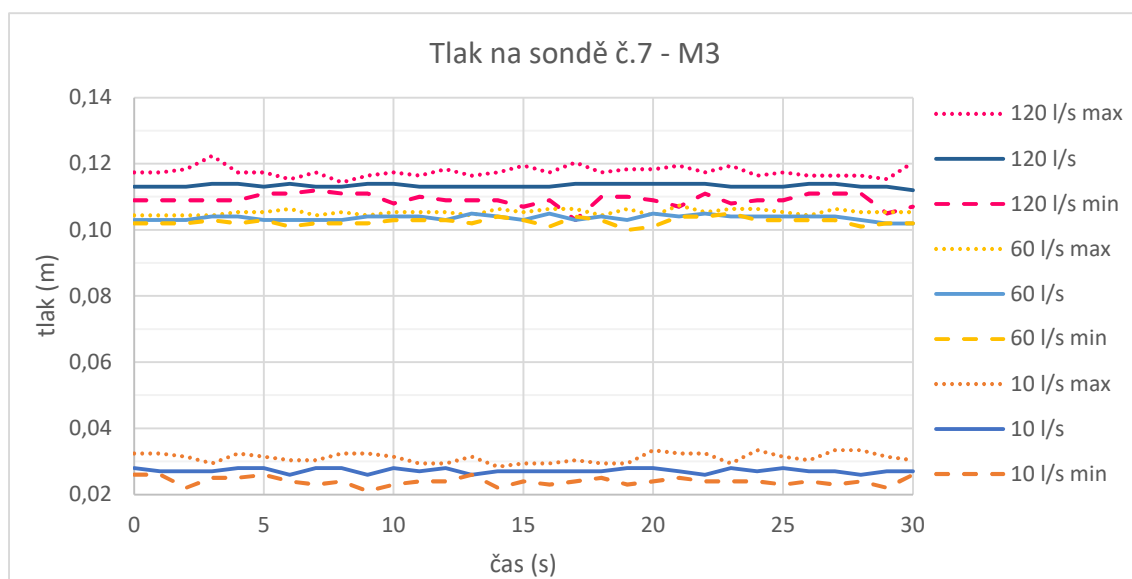


**M-3: Měření tlaků na modelu s pravoúhlnou přelivnou hranou**

Schéma rozložení sond je shodné s měřením M-1.







#### M-4: Měření tlaků na modelu s pravouhlou přelivnou hranou – osazenou proti vodě

Na grafech je pro vybrané průtoky vykreslen průběh minimálního, průměrného a maximálního tlaku během 30 s.

Tlak je měřen na 8 vybraných místech. Sondy č.1 a č.4 jsou umístěny za konstrukcí modelu. Ostatní tlakové sondy jsou umístěny na modelu viz schéma umístění tlakových sond.

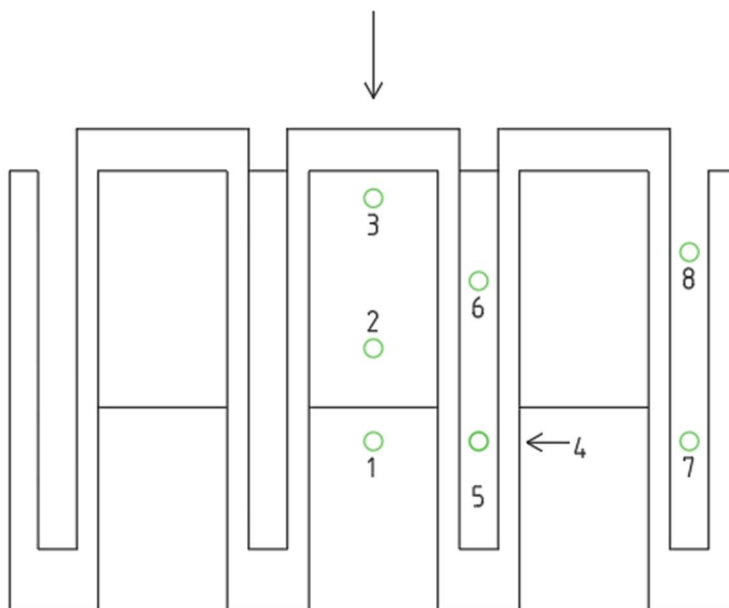


Schéma umístění tlakových sond

