

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Fyzikální výzkum labyrintových přelivů
s proměnlivou výškou přelivné hrany**

**Physical research of labyrinth spillways with variable
overflow edge height**

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.

květen 2023

Václav Strejček

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Strejček	Jméno: Václav	Osobní číslo: 494258
Zadávací katedra: K142 - Katedra hydrotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: Vodní hospodářství a vodní stavby		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Fyzikální výzkum labyrintových přelivů s proměnlivou výškou přelivné hrany	
Název bakalářské práce anglicky: Physical research of labyrinth spillways with variable overflow edge height	
Pokyny pro vypracování: V rámci zpracování bakalářské práce proveďte: Měření konzumpční křivky labyrintového přelivu standardního tvarového návrhu Měření konzumpční křivky modifikovaných labyrintových přelivů Vyhodnoťte a porovnejte výsledky měření konzumpčních křivek Vyhodnoťte proudové pole v nátokové části různých variant návrhu labyrintových přelivů Vyhodnoťte chování různých variant řešení labyrintového přelivu při převádění plávi a ledových ker Porovnejte výsledky provedených měření s běžně používanými přelivy	
Seznam doporučené literatury: - záznamy z měření labyrintových přelivů na Katedře hydrotechniky v roce 1996 - zahraniční a tuzemská periodika - materiály ICOLD (Mezinárodní přehradní komise)	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.	
Datum zadání bakalářské práce: 22.02.2023	Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023
	Údaj uveďte v souladu s jeho ak. roku
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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“.

22.2.2023

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

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

V Praze, 22.5.2023

Místo zpracování, datum

Jméno a Příjmení

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Satrapovi, CSc. za vedení mé práce a za cenné rady v průběhu tvorby i přípravy práce.

Dále děkuji panu prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng. za poskytnutí materiálu pro 3D tisk modelů, dále pánům Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. a Ing. Milanu Zukalovi, Ph.D. za ochotnou pomoc a odborné rady při stavbě modelů a měření ve Vodohospodářském experimentálním centru. Také bych chtěl poděkovat VOŠS a SPŠS Praha 1, Dušní 17 za možnost vytištění modelů na 3D tiskárnách.

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o výzkumu labyrintových přelivů se čtvercovým půdorysným tvarem a s proměnlivou výškou přelivné hrany. Cílem je vytvoření kapacitnějších a estetičtějších přelivů, než jsou v současnosti běžně používané. V rámci práce byly měřeny přepadové výšky pro vytvoření konzumpčních křivek, dále se vyhodnocovala schopnost převádění ledových ker a pláví a dokumentoval se směr proudnic. Díky daným průtokům a k nim naměřeným přepadovým výškám bylo možné dopočítat hodnotu součinitele přepadu, která může být použita pro pozdější návrh.

KLÍČOVÁ SLOVA

labyrintový přeliv, proměnlivá výška přelivné hrany, konzumpční křivka, ledové kry, pláví, proudnice

ABSTRACT

This thesis presents research of labyrinth spillways with a square plan shape and variable overflow edge height. The aim is to create more capacious and aesthetic spillways than those currently in common use. The work included measuring overflow heights to create consumption curves, as well as evaluating the ice floes and wooden debris transfer capability and documenting the direction of flowlines. With the given discharges and associated measured overflow heights, it was possible to calculate an overflow coefficient value that can be used for later design.

KEY WORDS

labyrinth spillway, variable overflow edge height, consumption curve, ice floes, wooden debris, flowlines

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. NÁVRH MODELU	4
2.1 Typový návrh	4
2.2 Tvarový návrh.....	4
2.2.1 Teoretický návrh	4
2.2.2 Skutečný návrh	6
2.2.3 Návrh spodní stavby	7
2.3 Materiálové řešení	8
3. MĚŘENÍ.....	9
3.1 Typ VS1.....	10
3.1.1 Zkosené hrany přelivné hrany	11
3.1.2 Válcová přelivná plocha.....	13
3.1.3 Pravoúhlé provedení přelivné hrany	15
3.2 Typ VS2	17
3.3 Typ VS3	21
3.3.1 Varianta I.	22
3.3.2 Varianta II.....	25
3.4 Typ VS4	28
4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	32
4.1 Porovnání provedení přelivné hrany	32
4.2 Součinitel přepadu m	35
4.2.1 Typ VS1.....	36
4.2.2 Typ VS2	37
4.2.3 Typ VS3	38

4.2.3.1 Varianta I.	38
4.2.3.2 Varianta II.....	39
4.2.4 Typ VS4	40
4.3 Porovnání s běžně používanými přelivy	41
4.4 Vyhodnocení proudového pole	44
4.5 Vyhodnocení převádění ledových ker a plávi	47
5. STANOVENÍ INŽENÝRSKÉHO NÁVRHU	49
5.1 Vzorový návrh.....	49
5.1.1 Důležitá data pro návrh	50
5.1.2 Návrh	51
5.1.2.1 Návrh jedné přelivné sekce	51
5.1.2.2 Návrh dvou přelivných sekcí	54
5.1.3 Zhodnocení vzorového návrhu	56
6. MOŽNOST VYUŽITÍ V RÁMCI INŽENÝRSKÝCH STUDIÍ	57
7. NÁVRHY PRO DALŠÍ ZKOUMÁNÍ	57
8. ZÁVĚR	58
9. CITACE	60
PŘÍLOHA A – TYP VS1	
PŘÍLOHA B – TYP VS2	
PŘÍLOHA C – TYP VS3	
PŘÍLOHA D – TYP VS4	

1. ÚVOD

Labyrintové přelivy sestávají z poměrně tenkých stěn a opakujícího se půdorysného tvaru v cyklech po celé šíři přelivu [1]. Tato práce se zabývá čtvercovým půdorysným tvarem cyklu s vodorovnou přelivnou hranou, ten slouží jako referenční, poté je přelivná hrana výškově upravována, aby byl vytvořen v pohledu na přeliv trojúhelník nebo více trojúhelníků.

Labyrintové přelivy nemají dostatečně popsané hydraulické chování – převládá názor, že při malých průtocích je kapacita vysoká, ale při větších se zahlcují a kapacita se snižuje. Používané labyrintové přelivy v současné době mají trapézový půdorysný tvar. Postup výpočtu pro tyto přelivy je popsán například v *Technical Advancements in Spillway Design: Progress and Innovations from 1985 to 2015* [2].

Mojí snahou bylo vytvoření labyrintových přelivů s geometrií, která ještě nebyla zkoumána. Osobním cílem bylo vytvoření kapacitnějších přelivů, než jsou běžně používané, a nalezení esteticky zajímavých, avšak hydraulicky funkčních přelivů, které by v plné míře zvládly nahradit běžně používané přelivy. Myšlenka takto upravených labyrintových přelivů mě napadla po přednášce pana doc. Ing. Ladislava Satrapy, CSc. v předmětu 142PPVD – Přehrady a provoz vodních děl, kde se o labyrintových přelivech a o svém výzkumu, který o nich pojednával, zmínil.

Veškerá měření probíhala ve Vodohospodářském experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT na zmenšených modelech vytvořených pomocí 3D tisku.

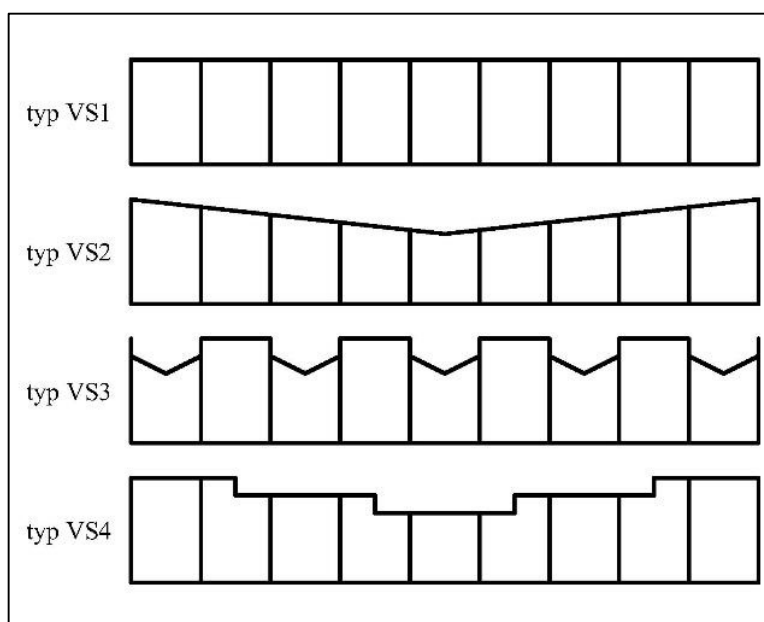
Předmětem této bakalářské práce je:

- měření konzumpční křivky labyrintového přelivu standardního tvarového návrhu
- měření konzumpční křivky modifikovaných labyrintových přelivů
- vyhodnocení a porovnání výsledků měření konzumpčních křivek
- vyhodnocení proudového pole v nátokové části různých variant návrhu labyrintových přelivů
- vyhodnocení chování různých variant řešení labyrintových přelivů při převádění plávi a ledových ker
- porovnání výsledků provedených měření s běžně používanými přelivy

2. NÁVRH MODELU

2.1 Typový návrh

Celkem byly navrženy 4 variantní typy, jeden referenční s vodorovnou přelivnou hranou, zbývající s přelivnou hranou výškově proměnlivou tak, aby v pohledu na přeliv tyto úpravy tvořily trojúhelník. Přehled označení variant typů dle výškového řešení přelivné hrany je patrný z Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Přehled navržených typových variant – pohled

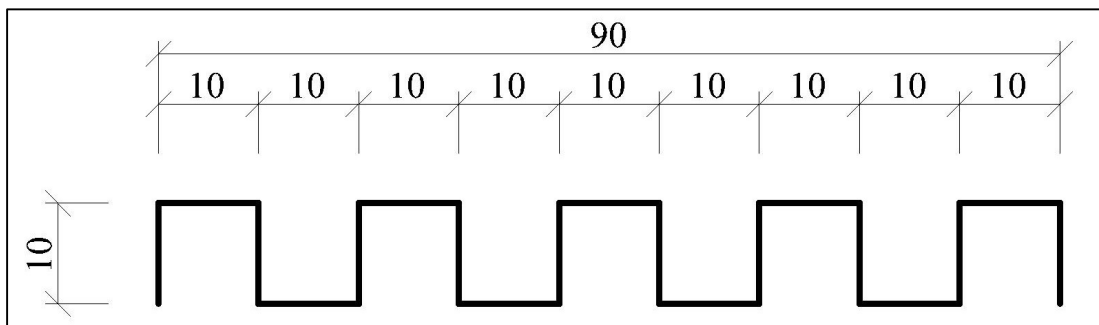
2.2 Tvarový návrh

2.2.1 Teoretický návrh

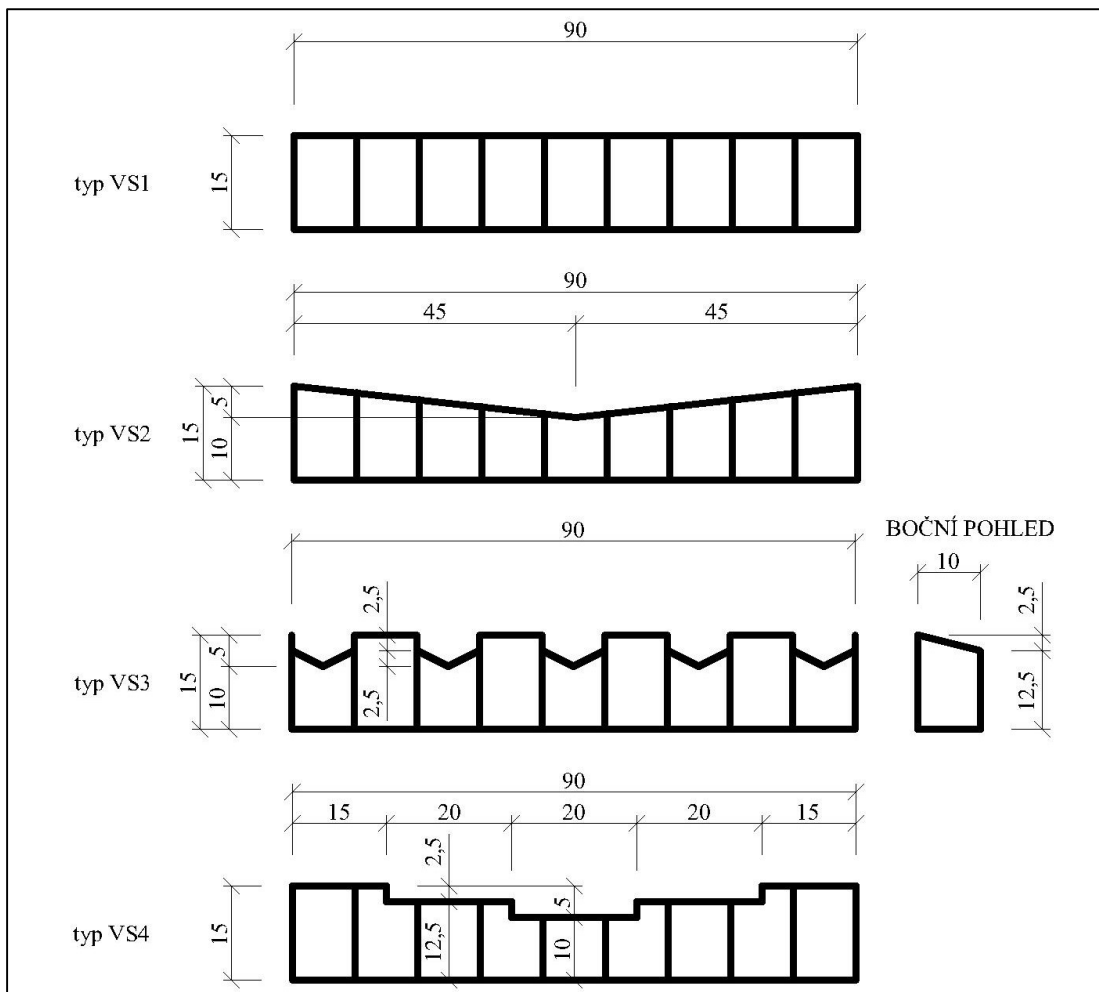
Rozměry byly navrženy pro měření v hydraulickém žlabu šířky 1 m. Měřítko rozměrů modelu odpovídá použití 1:X, rozměry je tedy možno násobit měřítkem X, v případě průtoků je třeba násobit $\sqrt{X^5}$, a chování labyrintu bude vždy odpovídat modelovému výzkumu.

Celková nerozvinutá osová šíře modelu je 90 cm, rozvinutá šíře v ose je 190 cm. Půdorysný tvar cyklu byl navržen jako čtvercový, osový rozměr strany cyklu všech typů byl stanoven na 10 cm. Výška typu VS1 je 15 cm v celé šíři, ostatní typy mají

výšku v nejnižším bodě 10 cm, v nejvyšším 15 cm. Půdorysné rozměry všech variant jsou vyznačeny v Obr. 2.2, výškové rozměry jednotlivých typů jsou ukázány v Obr. 2.3.



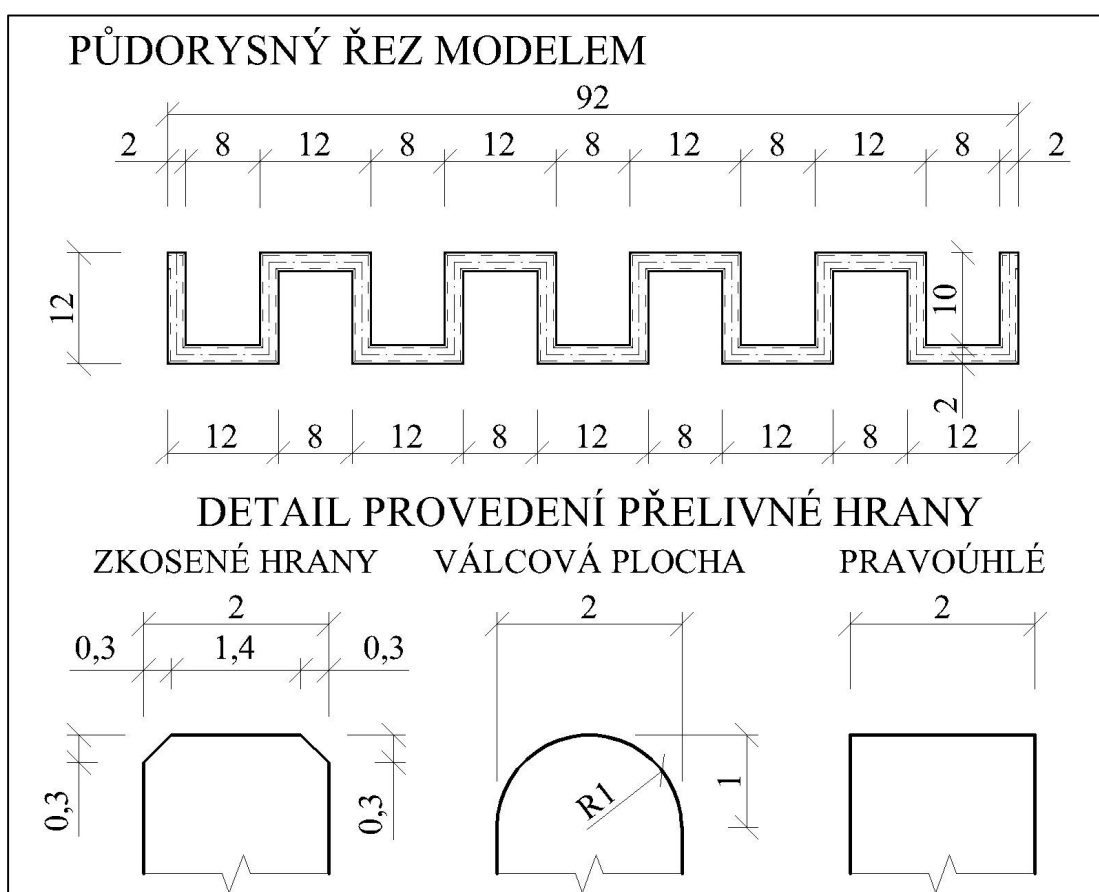
Obr. 2.2: Půdorysné rozměry osy labyrintových přelivů, kótováno v cm



Obr. 2.3: Výškové rozměry jednotlivých typů, typ VS3 doplněn o boční pohled, kótováno v cm

2.2.2 Skutečný návrh

Skutečný návrh respektuje teoretický návrh, je rozšířen o tloušťku stěny, která byla navržena 2 cm. Veškeré hrany, svislé i vodorovné, byly zkoseny o 3x3 mm, zkosení hran přelivné hrany bylo jedním z provedení přelivné hrany. Další variantou provedení přelivné hrany byla válcová plocha a pravoúhlé provedení, které byly měřeny na typu VS1 a následně vyhodnoceny, viz kapitola 4.1. Na Obr. 2.4 je znázorněn půdorysný řez s rozměry a detail provedení přelivné hrany, obojí kótováno v cm. Skutečná nerozvinutá šířka labyrintového přelivu je 92 cm.

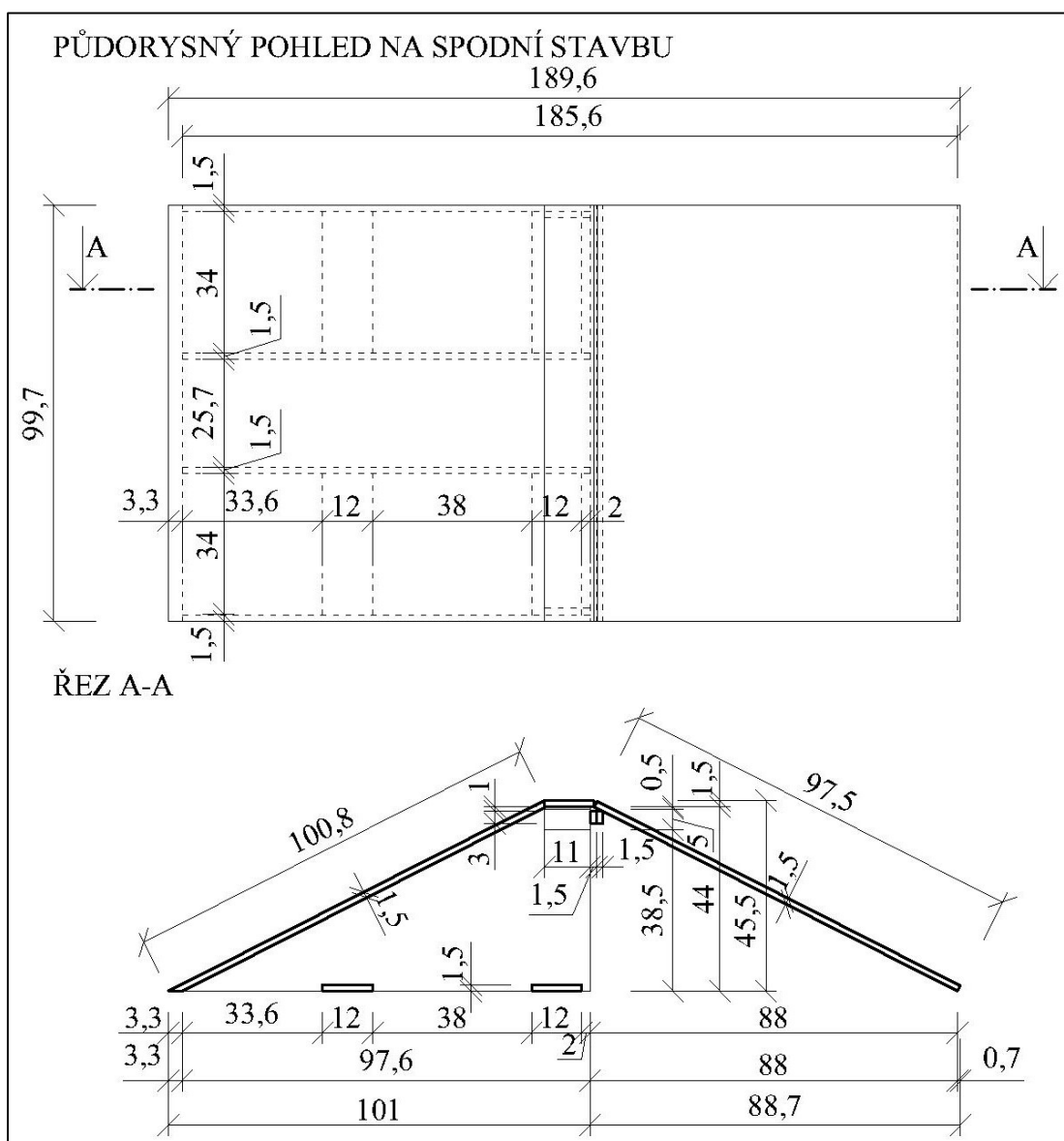


Obr.2.4: Půdorysný řez modelem a detail provedení přelivné hrany, kótováno v cm

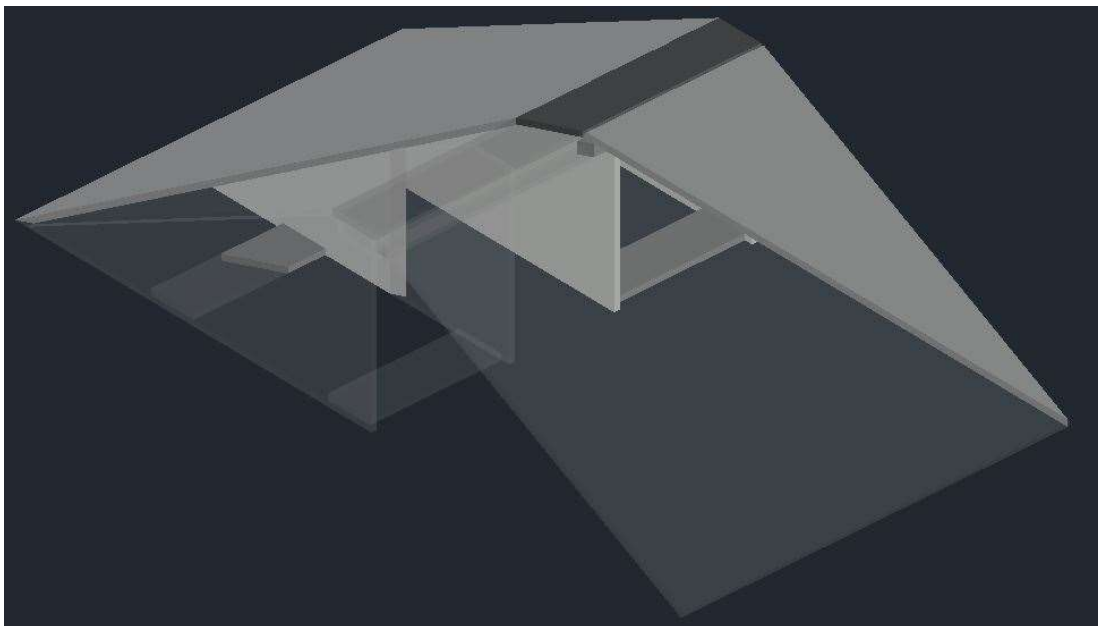
Model byl doplněn bočními pilíři, které byly navrženy hydraulicky vhodné, a nevznikaly proto boční kontrakce. Pilíře měly za úkol simulovat reálné použití v praxi, aby nebyl proud ovlivněn stěnami žlabu.

2.2.3 Návrh spodní stavby

Spodní stavba se skládá ze 4 nosných žebér ve tvaru pravoúhlého lichoběžníku, na jejichž ramena byla připevněna deska tvořící návodní líc. Výška byla navržena 45 cm, sklony vzdušního a návodního líce byly navrženy 1:2. Ve vrcholu byla 12 cm široká deska, která byla výměnná s daným typem měřených labyrintových přelivů. Na nosná žebra byla na vzdušní straně připevněna deska tvořící trám, na nějž se poté připevnila deska tvořící vzdušní líc. Rozměry spodní stavby jsou vyznačeny v Obr. 2.5, na Obr. 2.6 je 3D model diagonálního řezu spodní stavbou.



Obr. 2.5: Půdorysný pohled a řez spodní stavbou, kótováno v cm



Obr. 2.6: 3D model diagonálního řezu spodní stavbou

2.3 Materiálové řešení

Jednotlivé modely byly vytištěny pomocí technologie 3D tisku. Materiál použitý na tisk byl PLA (Polylactic acid – kyselina polyléččná), polyester z rostlinných materiálů [3]. Tisk labyrintů bylo potřeba rozdělit kvůli tisknutelnému rozhraní tiskáren na 5 částí. Jednotlivé části poté byly mezi sebou sešroubovány a styčné spáry byly kvůli nepropustnosti vyplněny silikonem. Sešroubované jednotlivé modely byly poté přišroubovány k příslušné desce šířky 12 cm, ložná spára byla taktéž vyplněna silikonem. Takto vytvořený celek se vkládal do žlabu a šrouboval ke spodní stavbě.

Na spodní stavbu byly použity konstrukční desky tl. 1,5 cm z pěněného PVC.

Pro pilíře byly použity desky PVC pro vytvoření tuhého vysokého prvku, stěny pilířů byly vytvořeny pomocí ohýbaného plechu.

3. MĚŘENÍ

Cílem měření bylo zjištění přepadových výšek pro dané průtoky za účelem vytvoření konzumpční křivky. Přepadová výška byla měřena hrotovým měřidlem v dostatečné vzdálenosti od přelivu, kde hladina není ovlivněna křivkou snížení. Naměřené hodnoty byly zaznamenávány do tabulek, které jsou součástí příslušné podkapitoly pro daný typ.

Zkoumaným chováním labyrintových přelivů byla schopnost převádění plávi a ledových ker. Ledové kry byly nahrazeny kusy voskové desky, díky stejné hustotě – 917 kg/m^3 a stejnému ponoru jako mají ledové kry. Toto chování bylo zaznamenáváno pomocí videí, z nichž se dodatečně získaly snímky nepřevedených ledových ker a plávi. Počet ledových ker pouštěných na model byl 15, byly v různých velikostech a tvarech a byly rozmístovány rovnoměrně po celé šíři. Plávi bylo pro účely měření vytvořeno větvičkami o průměru přibližně 1,5–2,5 cm, délky 35–50 cm.

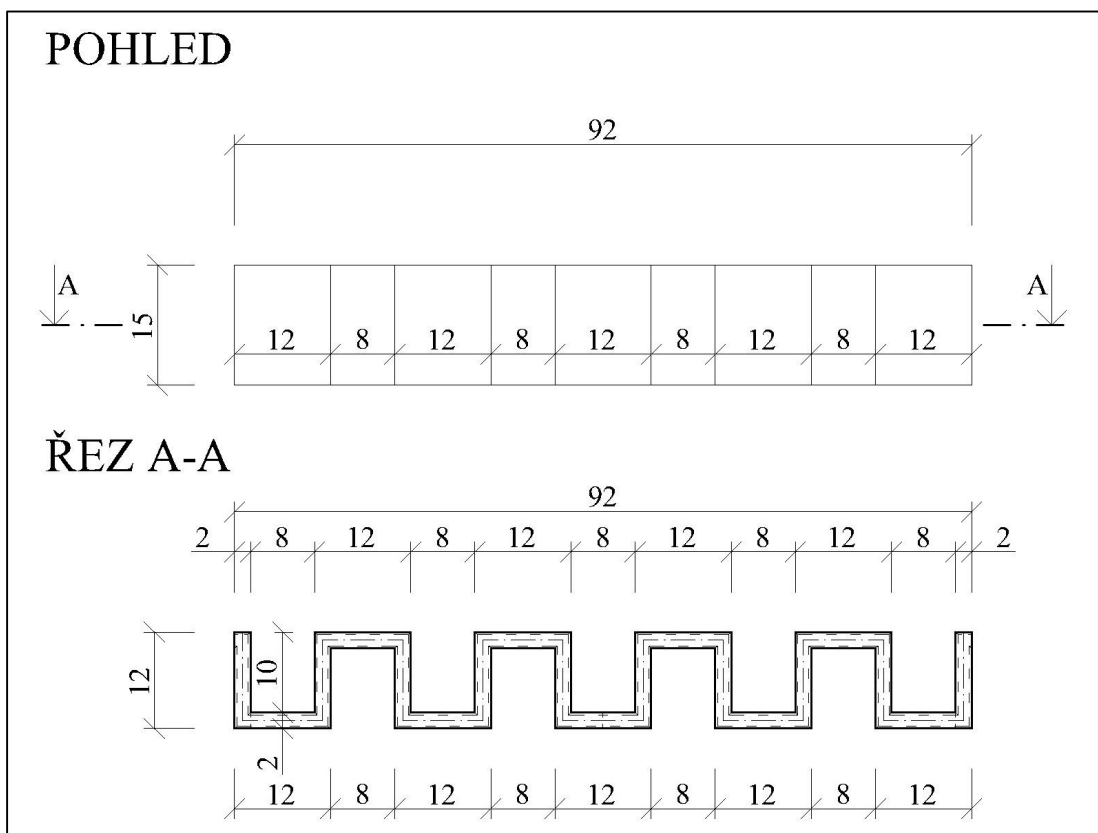
Dále se focením dokumentovaly směry proudnic v různých polohách vůči přelivu. Směry proudnic byly zjišťovány pomocí bavlnek přivázaných k rámu, který bylo možné nastavit do šesti výškových poloh po 5 cm. Poloha s označením 1 signalizovala směry proudnic v místě uchycení modelu ke spodní stavbě, poloha 6 signalizovala polohu 10 cm nad nejvyšším bodem modelu. Rám zajišťoval také 4 polohy ve vodorovném směru, první poloha byla 5 cm od návodní stěny labyrintového přelivu, další 3 polohy byly po 10 cm. Fotodokumentace směrů proudnic byla zaznamenávána standardně ze 2 míst – pohledem dolů ve středu žlabu a pohledem z levé strany po proudu skrze sklo žlabu v úrovni nejvyššího bodu modelu. V případě potřeby byla fotodokumentace doplněna pohledem z levého boku rámu žlabu šikmo dolů na model v místě návodní stěny přelivu. Předpokládaný směr proudnic pro typy s proměnlivou výškou je do nejnižších bodů těchto přelivů.

Podkapitola pro příslušný zkoumaný typ labyrintového přelivu obsahuje tabulku naměřených hodnot přepadových výšek s vyhodnocením převádění ledových ker a plávi, vykreslení konzumpční křivky, snímek nepřevedených ledových ker a plávi z videa, referenční fotografii s vyznačenými směry proudnic těsně pod hladinou pro průtoky 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s v první vodorovné poloze (5 cm od stěny modelu).

Pro porovnání je ve vykreslení konzumpční křivky daného typu vykreslena také konzumpční křivka Scimemiho beztlakové přelivné plochy proudnicového tvaru. Jejich hodnoty součinitele přepadu a přepadových výšek byly zjištěny pomocí výpočtu. Návrhový součinitel přepadu $m = 0,51$ byl použit pro nejvyšší dosažený průtok na daném typu labyrintového přelivu.

3.1 Typ VS1

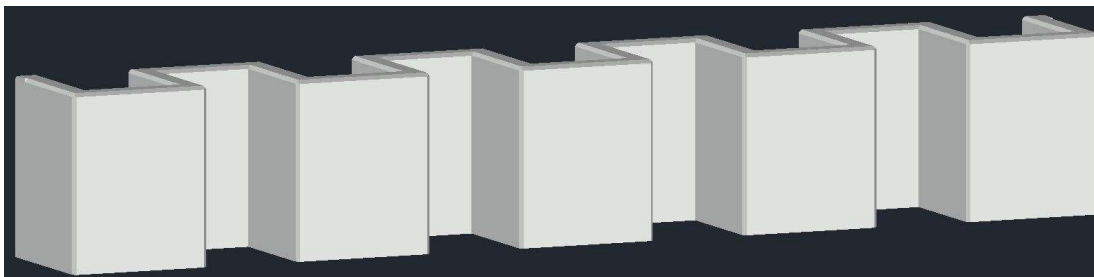
Typ VS1 je labyrintový přeliv s vodorovnou přelivnou hranou. Měření tohoto přelivu probíhalo pro 3 varianty provedení přelivné hrany – zkosené hrany, válcová plocha a pravoúhlé provedení, viz podkapitoly 3.1.1, 3.1.2 a 3.1.3. Účelem měření válcové plochy a pravoúhlého provedení bylo zjistit rozdíl oproti zkoseným hranám, aby se daly tyto provedení aplikovat na další typy modelů s předpokladem stejného ovlivnění. Toto porovnání je rozebráno v podkapitole 4.1. Rozměry a tvar typu VS1 jsou vyznačeny na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Pohled a řez typem VS1 včetně rozměrů, kótováno v cm

3.1.1 Zkosené hrany přelivné hrany

První měřenou variantou typu VS1 je varianta se zkosenými hranami, 3D model na Obr. 3.2.



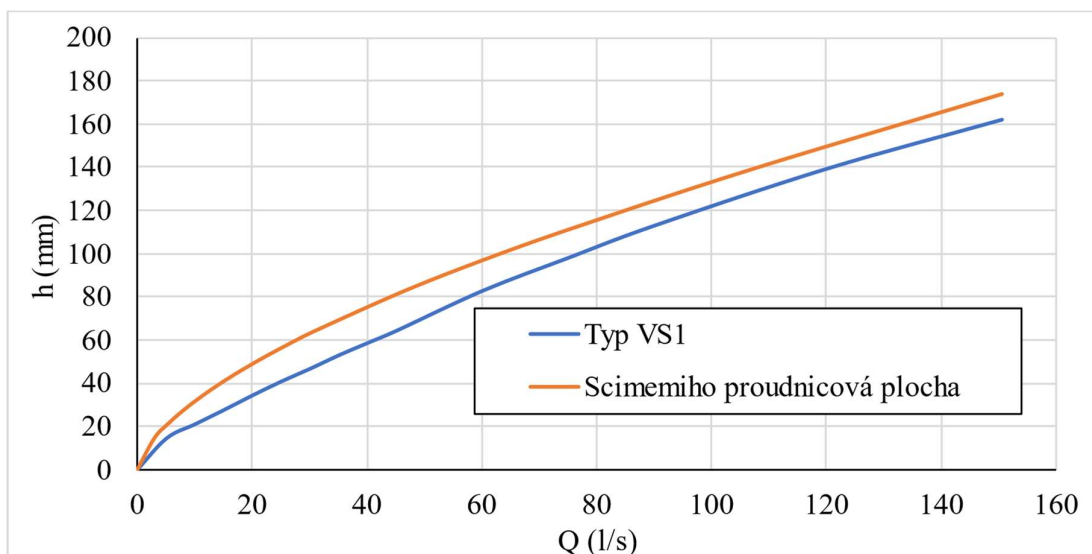
Obr. 3.2: 3D model typu VS1 – zkosené hrany

V příložené Tab. 3.1 jsou zaznamenané hodnoty přepadové výšky h pro příslušné hodnoty reálného průtoku Q . Tabulka také značí, při jakých průtocích model převedl ledové kry a plávi.

V příloženém Obr. 3.3 je znázorněna konzumpční křivka typu VS1 se zkosenými hranami a beztlakové proudnicové přelivné plochy podle Scimemiho, jejíž hodnoty byly vypočítány. Návrhový součinitel přepadu $m = 0,51$ byl použit pro nejvyšší dosažený průtok typu VS1.

Tab. 3.1: Záznam z měření typu VS1 – zkosené hrany

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
0	0	✘	✘
5	15	✘	✘
10	21	✘	✘
15	28	✘	✘
20	34	✓	✓
25	41	✓	✓
30	47	✓	✓
35	53	✓	✓
40	59	✓	✓
45	64	✓	✓
60	83	✓	✓
75	98	✓	✓
90	113	✓	✓
120	139	✓	✓
151	162	✓	✓



Obr. 3.3: Konzumpční křivka typu VS1 se zkosenými hranami a beztlakové přelivné plochy podle Scimemiho

V Tab. 3.1 je vidět, že dostatečné přepadové výšky pro převedení ledových ker a pláví je dosaženo až při modelovém průtoku 20 l/s. Na Obr. 3.4 je snímek nepřevedených ledových ker a na Obr. 3.5 je snímek nepřevedeného pláví, obojí při modelovém průtoku 15 l/s.

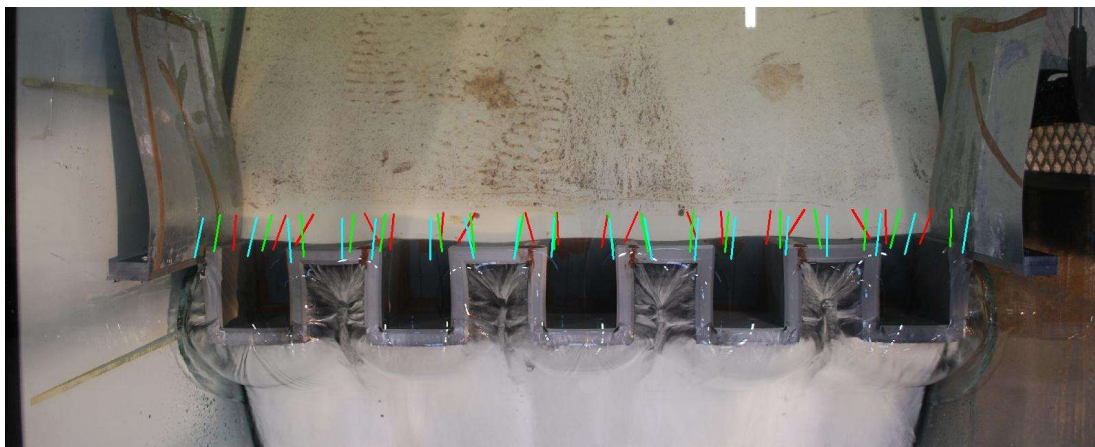


Obr. 3.4: Snímek nepřevedených ledových ker



Obr. 3.5: Snímek nepřevedeného plávi

Na Obr. 3.6, jsou vyznačeny pomocí programu AUTOCAD směry proudnic v první vodorovné poloze, svislá poloha se liší podle výšky hladiny. Při malé přepadové výšce jsou proudnice směřovány do návodních kapes přelivu, zatímco při větších výškách proudnice směřují do vzdušných kapes.



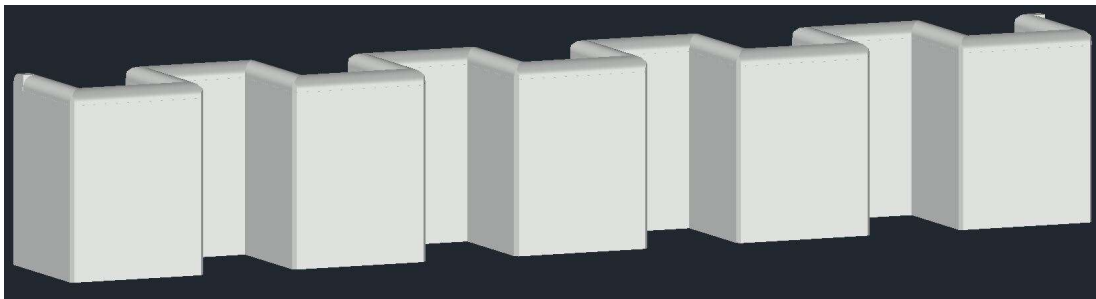
Obr. 3.6: Směry proudnic typu VS1 pro průtoky 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená), 90 l/s (modrá), pohled shora

Podrobnější fotodokumentace je v Příloze A – typ VS1.

3.1.2 Válcová přelivná plocha

V tomto měření se na model VS1 se zkosenými hranami pomocí silikonu přilepily díly ze 3D tisku, které tvořily válcovou přelivnou plochu, viz Obr. 3.7. Válcová plocha byla tvořena půlkruhem s průměrem 2 cm, tedy šířkou stěny. Cílem bylo zjistit rozdíl

provedení přelivné hrany. Výsledky tohoto porovnání jsou rozebrány v podkapitole 4.1.



Obr. 3.7: 3D model typu VSI – válcová přelivná plocha

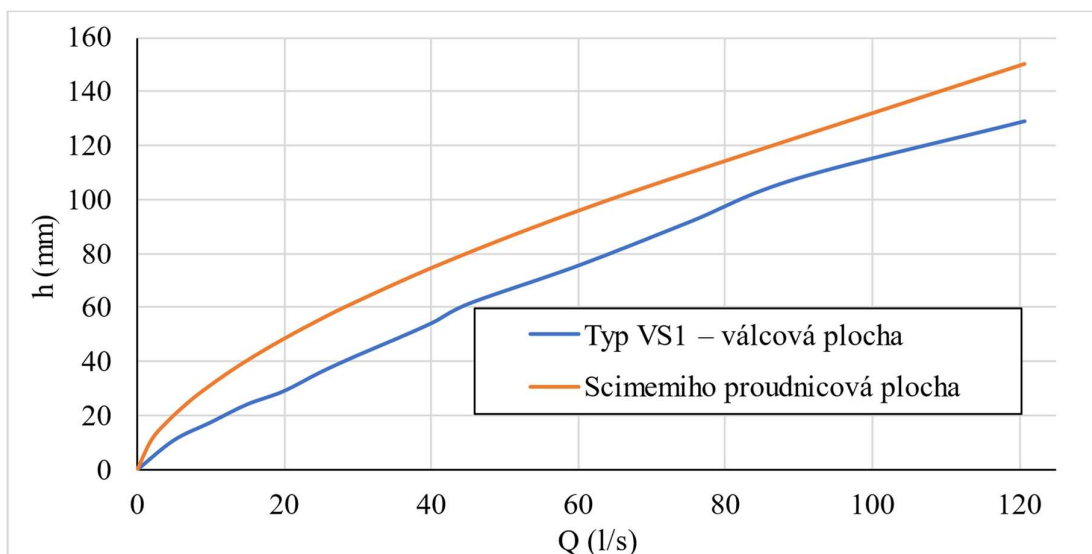
V příložené Tab. 3.2 jsou, jako v předchozí kapitole, zjištěné přepadové výšky h pro příslušné hodnoty reálného průtoku Q .

Schopnost převádění ledových ker a pláví se zde nezjišťovala, předpokládá se, že by k převedení došlo při stejném průtoku jako u provedení se zkosenými hranami, viz Tab. 3.1.

Tab. 3.2: Záznam z měření typu VSI – válcová přelivná plocha

Q	h
l/s	mm
0	0
5	11
10	18
15	24
20	29
25	36
30	42
35	48
40	54
45	62
60	76
75	92
90	108
121	129

V příloženém Obr. 3.8 jsou konzumpční křivky typu VSI s provedením válcové přelivné plochy a beztlakové přelivné plochy, viz předchozí kapitola.



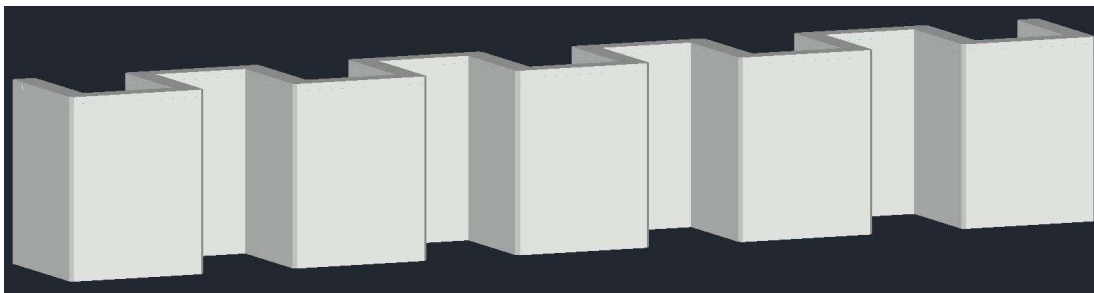
Obr. 3.8: Konzumpční křivka typu VS1 s provedením válcové přelivné plochy a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

Nebyly zjišťovány směry proudnic, předpokládají se stejné směry jako u provedení se zkosenými hranami, viz Obr. 3.6.

Fotodokumentace je součástí Přílohy A – typ VS1.

3.1.3 Pravoúhlé provedení přelivné hrany

Třetí variantní provedení přelivné hrany mělo za úkol, jako předchozí varianta, zjistit rozdíl oproti provedení se zkosenými hranami. V tomto měření se na model VS1 pomocí silikonu přilepily díly, které měly pravoúhlou úpravu, viz obr. 3.9. Výsledky jsou rozebrány v podkapitole 4.1.



Obr. 3.9: 3D model typu VS1 – pravoúhlé provedení přelivné hrany

V přiložené Tab. 3.3 jsou zjištěné přepadové výšky h pro příslušné hodnoty reálného průtoku Q , tak jako v přechozích kapitolách

Schopnost převádění ledových ker a plávi se zde, podobně jako u provedení válcové plochy, nezjišťovala – předpoklad převedení při stejném průtoku jako u provedení se zkosenými hranami, viz Tab. 3.1.

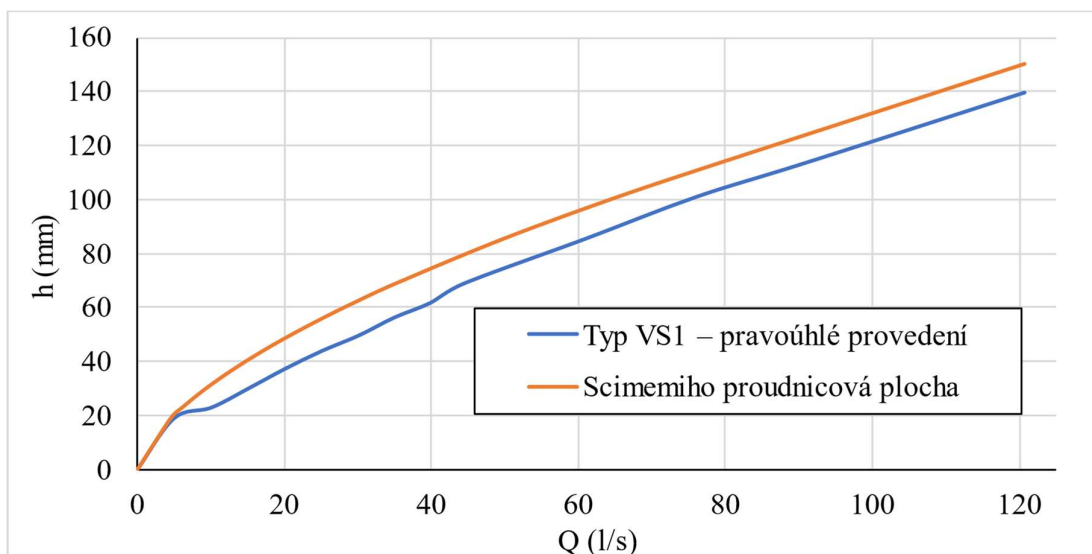
Tab. 3.3: Záznam z měření typu VS1 – pravoúhlé provedení přelivné hrany

Q	h
l/s	mm
0	0
5	19
10	23
15	30
20	37
25	44
30	50
35	56
40	62
45	69
61	85
76	101
91	114
121	140

V příloženém Obr. 3.10 jsou konzumpční křivky typu VS1 s pravoúhlým provedením přelivné hrany a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho, viz předchozí kapitoly.

Nebyly zjišťovány směry proudnic, předpokládají se stejné směry jako u provedení se zkosenými hranami, viz Obr. 3.6.

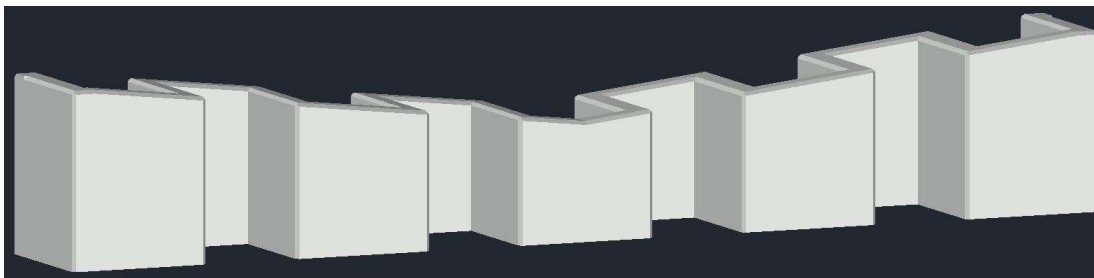
Fotodokumentace je součástí Přílohy A – typ VS1.



Obr. 3.10: Konzumpční křivka typu VS1 s pravoúhlým provedením přelivné hrany a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

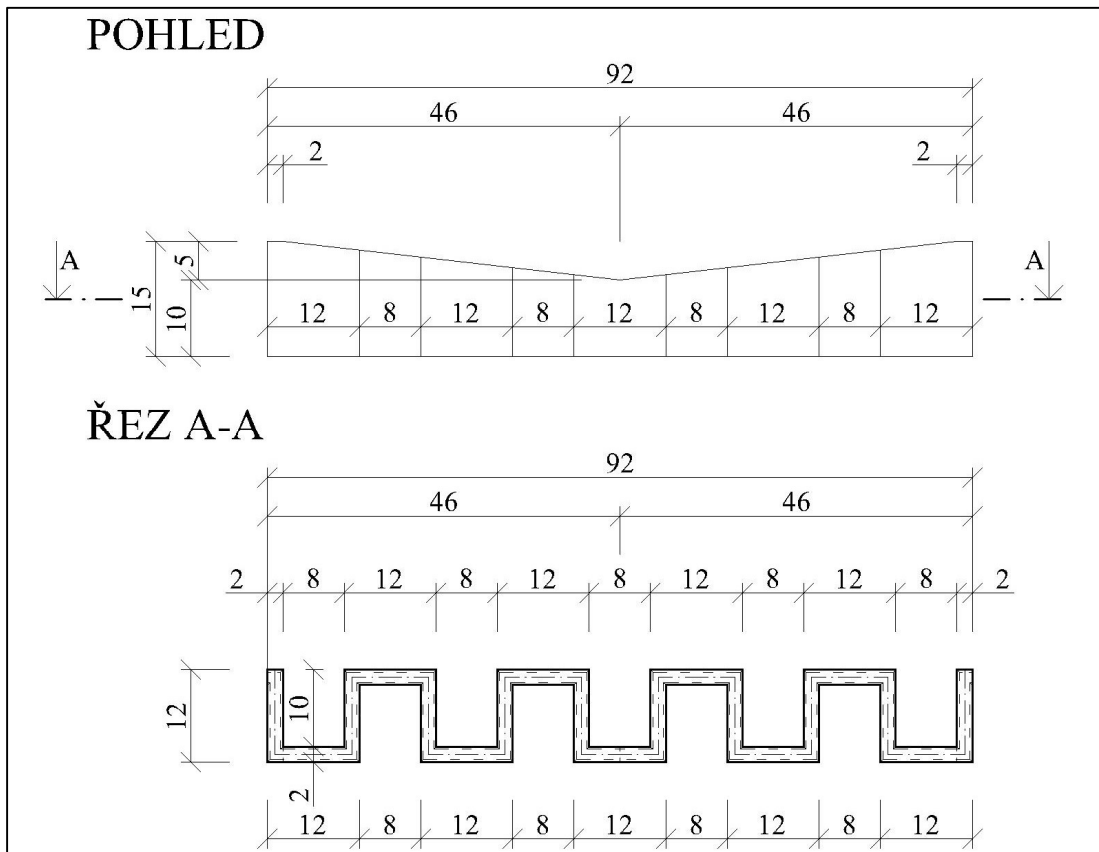
3.2 Typ VS2

Typ VS2 je prvním typem s proměnlivou výškou přelivné hrany. Výškovou úpravu tvoří trojúhelník, který má vrchol ve středu labyrintového přelivu. Vrchol snížení je o 5 cm níže než nejvyšší bod přelivu, tím jsou krajní stěny přelivu. Pohled a řez přelivem s rozměry – Obr. 3.12 a 3D model – Obr. 3.11.



Obr. 3.11: 3D model typu VS2

V Tab. 3.4 jsou zjištěné naměřené hodnoty přepadové výšky pro příslušné průtoky, viz předchozí kapitoly. Dále je zde ukázáno, kdy model převede ledové kry a plávi, jako v předchozí kapitole.

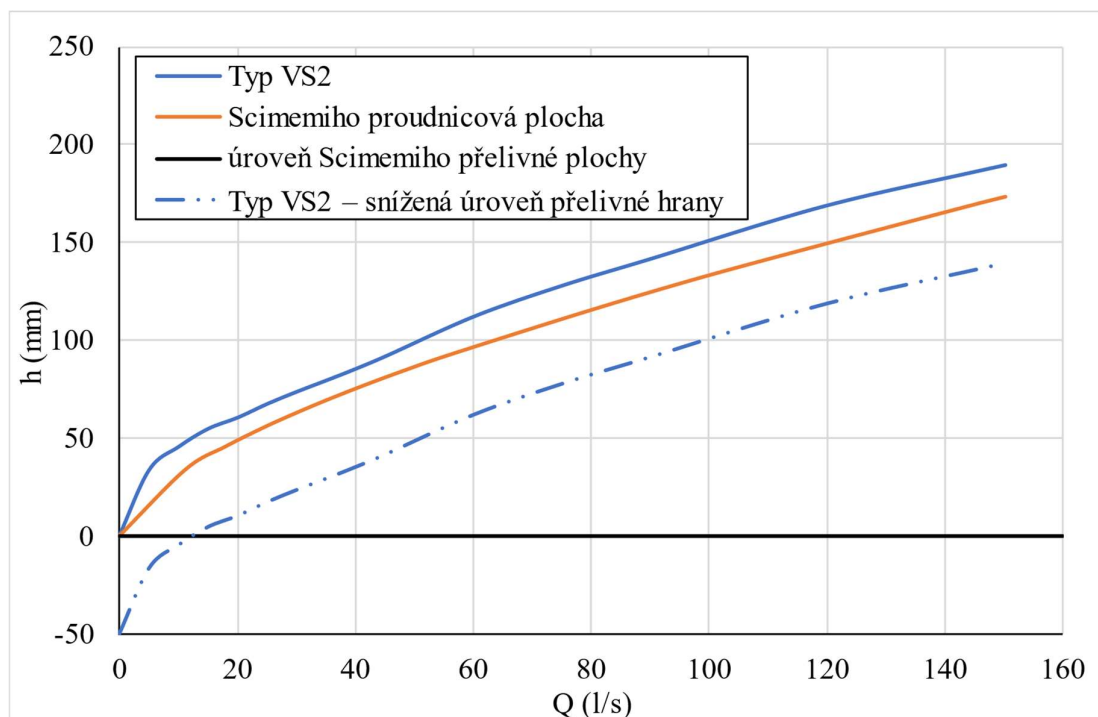


Obr. 3.12: Pohled a řez modelem VS2 včetně rozměrů, kótováno v cm

Tab. 3.4: Záznam z měření typu VS2

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
0	0	✘	✘
5	34	✘	✘
10	46	✘	✘
15	55	✘	✘
20	61	✓	✓
25	68	✓	✓
30	74	✓	✓
35	80	✓	✓
40	85	✓	✓
45	92	✓	✓
60	113	✓	✓
75	128	✓	✓
90	142	✓	✓
120	169	✓	✓
150	190	✓	✓

Na Obr. 3.13 jsou vyobrazeny konzumpční křivky typu VS2 a beztlakové přelivné plochy, viz předchozí kapitoly. Typ VS2 je zde umístěn dvěma způsoby: a) nejnižší bod typu VS2 je v úrovni přelivné hrany Scimemiho beztlakové plochy, b) typ VS2 je umístěn o 5 cm níže (= o snížení). Ve druhém způsobu umístění dojde k navýšení kapacity přelivu, avšak za cenu snížení zásobního objemu v nádrži.



Obr. 3.13: Konzumpční křivka typu VS2 ve dvou úrovních a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

Obdobně jako u typu VS1 dojde k převedení ledových ker a plávi až při průtoku 20 l/s. Na Obr. 3.14 je snímek zachycených ledových ker a na Obr. 3.15 je snímek zachyceného plávi, obojí při průtoku 15 l/s. Ledové kry i plávi byly koncentrovány do středu přelivu, tedy do místa s největší přepadovou výškou.



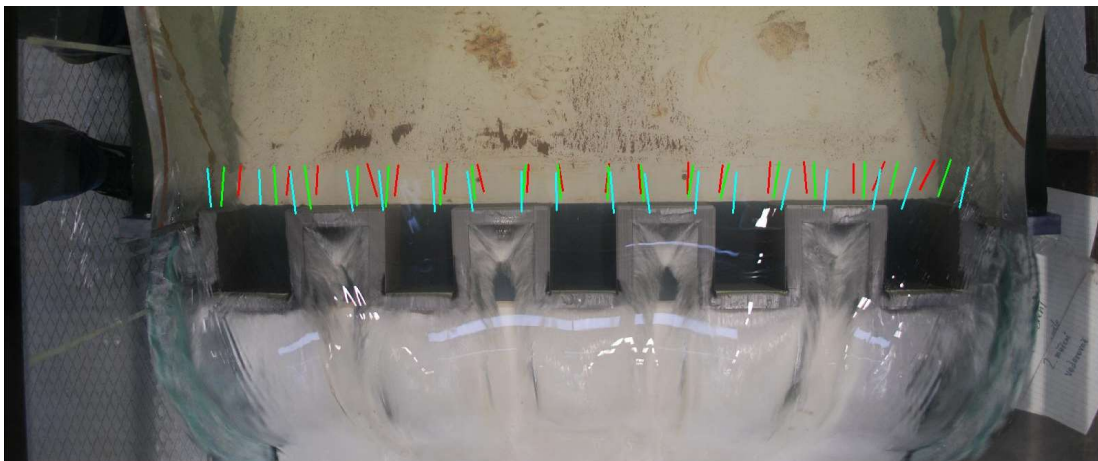
Obr. 3.14: Snímek nepřevedených ledových ker



Obr. 3.15: Snímek nepřevedeného plávi

Na Obr. 3.16 jsou vyznačeny směry proudnic při průtocích 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s. Dle vyznačených směrů je zřetelné, že proudnice směřují do středu přelivu a koncentrují největší rychlosti uprostřed, kde je přelivná hrana nejnižší.

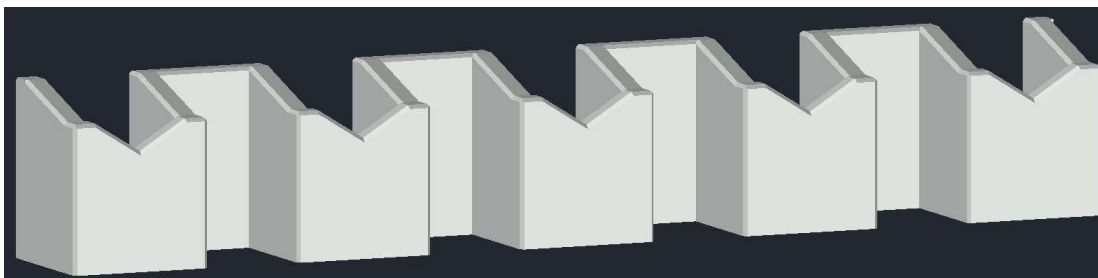
Podrobnější fotodokumentace je součástí Přílohy B – typ VS2.



Obr. 3.16: Směry proudnic typu VS2 pro průtoky 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená), 90 l/s (modrá), pohled shora

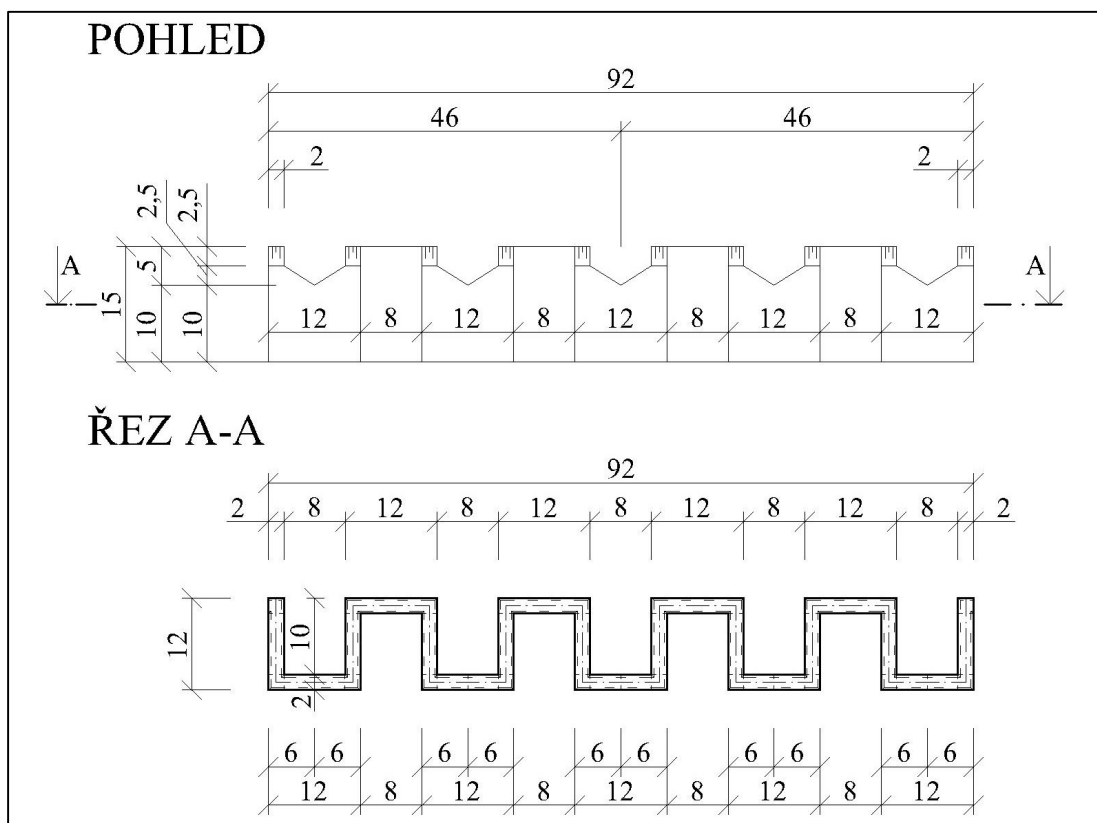
3.3 Typ VS3

Typ VS3 má výškově upravené pouze jednotlivé cykly přelivu. Nejnižší bod přelivné hrany je o 5 cm níže než nejvyšší bod. Rohy cyklu v upravené části je snížený o 2,5 cm. Rozměry a tvar úpravy jsou zakresleny v Obr. 3.18, na Obr. 3.17 je 3D model přelivu.



Obr. 3.17: 3D model typu VS3

Typ VS3 byl měřen ve dvou polohách – „po vodě“ a „proti vodě“. Varianta I. – „po vodě“, má výškově upravené stěny na straně vzdušného líce přelivu. Varianta II. – „proti vodě“, má tyto upravené stěny na straně návodního líce. Více jsou jednotlivé varianty rozebrány v podkapitolách 3.3.1 a 3.3.2.



Obr. 3.18: Pohled a řez modelem VS3 včetně rozměrů, kótováno v cm

3.3.1 Varianta I.

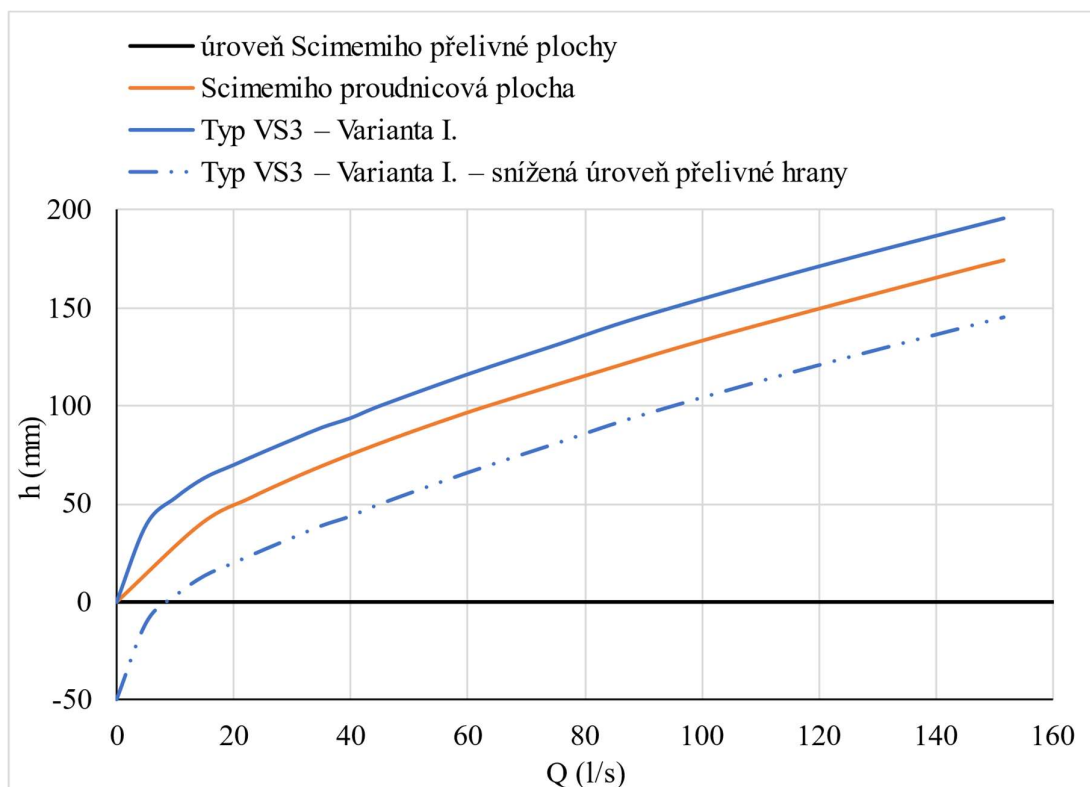
Varianta I. je první měřenou variantou typu VS3, výškově upravené stěny v tomto případě byly na vzdušné straně přelivu. Jako u ostatních modelů, i zde se hledala přepadová výška h pomocí reálných průtoků Q . Dále se zjišťovala schopnost převádět ledové kry a plávi. Získané výsledky jsou zobrazeny v Tab. 3.5.

Tab. 3.5: Záznam z měření typu VS3 – Varianta I.

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
0	0	✘	✘
5	40	✘	✘
10	53	✘	✘
15	63	✘	✘
20	70	✓	✓
25	77	✓	✓
30	83	✓	✓
35	89	✓	✓

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
40	94	✓	✓
45	100	✓	✓
60	116	✓	✓
75	131	✓	✓
90	146	✓	✓
119	170	✓	✓
152	195	✓	✓

Na Obr. 3.19 jsou konzumpční křivky typu VS3 – Varianta I. a beztlakové přelivné plochy, viz předchozí kapitoly. Typ VS3 – Varianta I. je zde umístěn také ve dvou polohách. První poloha má nejnižší bod typu VS3 – Varianta I. v úrovni přelivné hrany Scimemiho přelivné plochy, druhá poloha je o 5 cm níže (= o snížení), viz předchozí kapitola. I v tomto případě dojde u druhé polohy k navýšení kapacity za cenu snížení zásobního objemu.



Obr. 3.19: Konzumpční křivka typu VS3 – Varianta I. ve dvou úrovních a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

Z Tab 3.5 je vidět, že k převedení ledových ker a plávi dojde při průtoku 20 l/s. Snímek nepřevedených ledových ker je na Obr. 3.20, snímek nepřevedeného plávi je na Obr. 3.21. Ledové kry a plávi byly koncentrovány rovnoměrně do upravených cyklů. Výškově neupravená stěna cyklu při nedostatečné přepadové výšce zadržovala ledové kry i plávi.



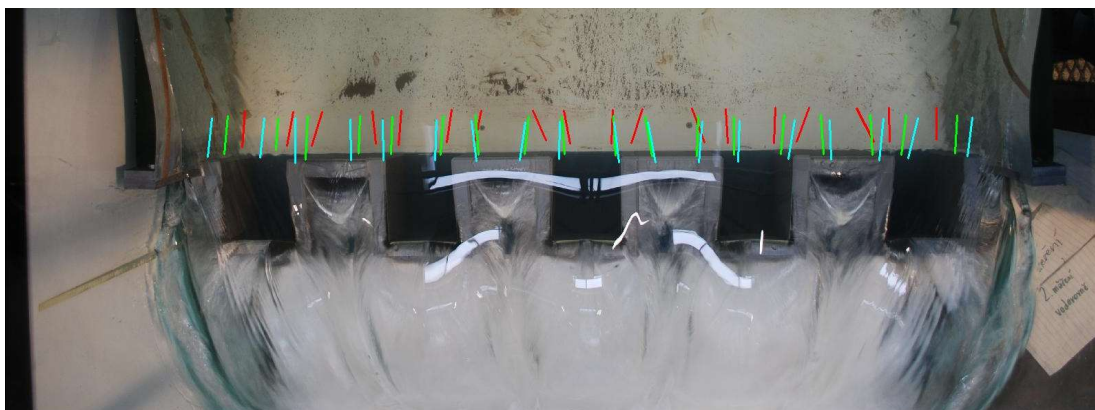
Obr. 3.20: Snímek nepřevedených ledových ker



Obr. 3.21: Snímek nepřevedeného plávi

Na Obr. 3.22 jsou vyznačené směry proudnic pro průtoky 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s. Při malé přepadové výšce proud směřuje na výškově upravené stěny. Při větších přepadových výškách voda směřuje přes neupravené stěny do kapes mezi upravenými stěnami.

Podrobnější fotodokumentace je součástí Přílohy C – typ VS3.



Obr. 3.22: Směry proudnic typu VS3 – Varianta I. pro průtoky 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená), 90 l/s (modrá), pohled shora

3.3.2 Varianta II.

Varianta II. má totožné půdorysné rozměry a tvar jako Varianta I., viz Obr. 3.18, jedinou změnou je otočení o 180°, tedy výškově upravené stěny jsou na návodní straně. Předpokladem bylo lepší převádění ledových ker a pláví, protože proud bude více koncentrován do výškově upravených cyklů, tedy lepší usměrnění ledových ker a pláví do tohoto prostoru.

V příložené Tab. 3.6 jsou naměřené hodnoty přepadové výšky h pro reálné průtoky Q , je zde také přehled, při jakém průtoku došlo k převedení ledových ker a pláví, jako u předchozích kapitol. Předpoklad nebyl naplněn z důvodu malého rozměru mezi upravenými stěnami. Větší kusy ledových ker neprošly, dokud nebyla dostatečná přepadová výška na výškově neupravených stěnách, snímky viz Obr. 3.24 a 3.25.

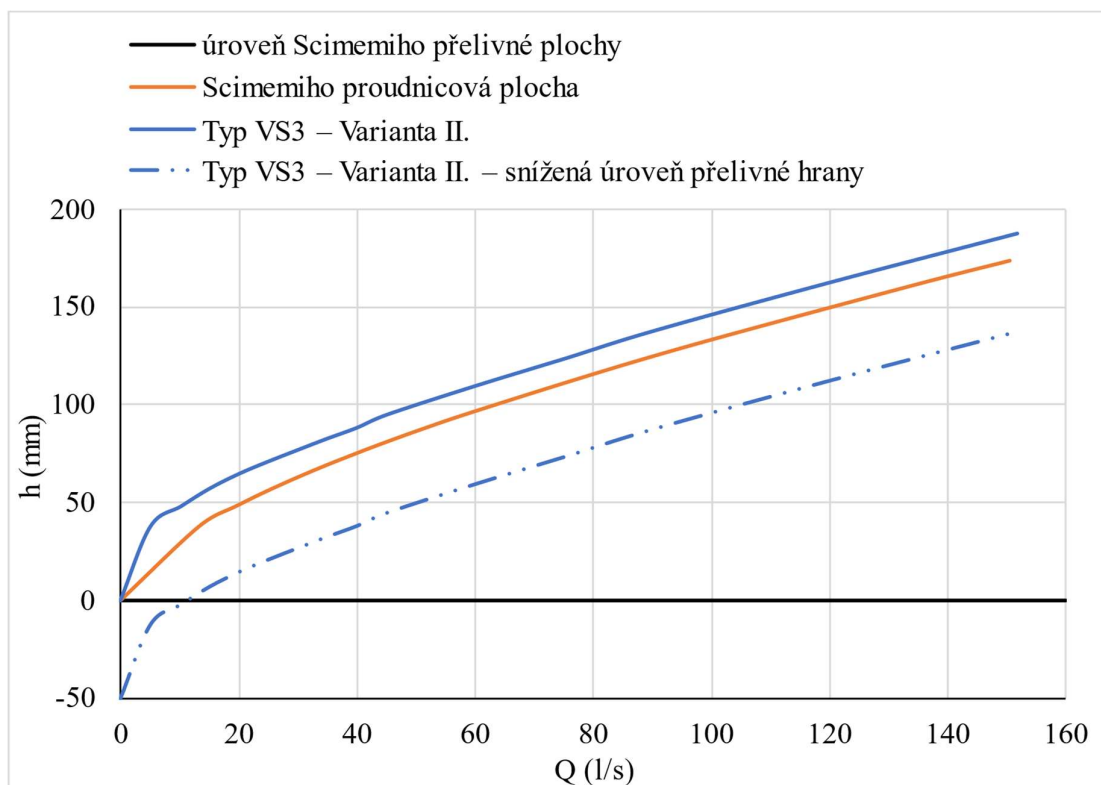
Tab. 3.6: Záznam z měření typu VS3 – Varianta II.

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
0	0	✘	✘
5	38	✘	✘
10	48	✘	✘
15	57	✘	✘
20	65	✘	✘
25	71	✘	✘
30	77	✓	✓
35	83	✓	✓
40	88	✓	✓

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
45	95	✓	✓
60	110	✓	✓
75	124	✓	✓
90	138	✓	✓
120	162	✓	✓
152	187	✓	✓

Na Obr. 3.23 jsou konzumpční křivky typu VS3 – Varianta II. ve dvou úrovních a beztlakové přelivné plochy. Jako u předchozích kapitol i zde by se kapacita navýšila snížením přelivné hrany, ovšem za cenu snížení zásobního prostoru v nádrži.

Na Obr. 3.24 je snímek nepřevedených ledových ker a na Obr. 3.25 je snímek nepřevedeného plávi. Je zde vidět, že se ledové kry i plávi zastavily o výškově neupravenou stěnu, protože hlavní koncentrace proudu, a tedy i vyšší rychlosti, jsou v nejnižším bodě přelivu, a ten je 10 cm před touto stěnou.



Obr. 3.23: Konzumpční křivka typu VS3 – Varianta II. ve dvou úrovních a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

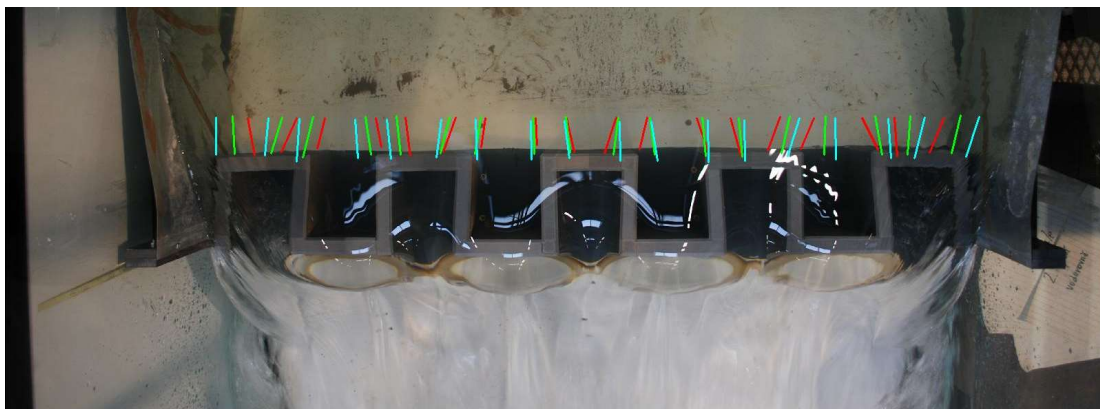


Obr. 3.24: Snímek nepřevedených ledových ker



Obr. 3.25: Snímek nepřevedeného plávi

Na Obr. 3.26 jsou vyznačeny směry proudnic pro 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s.



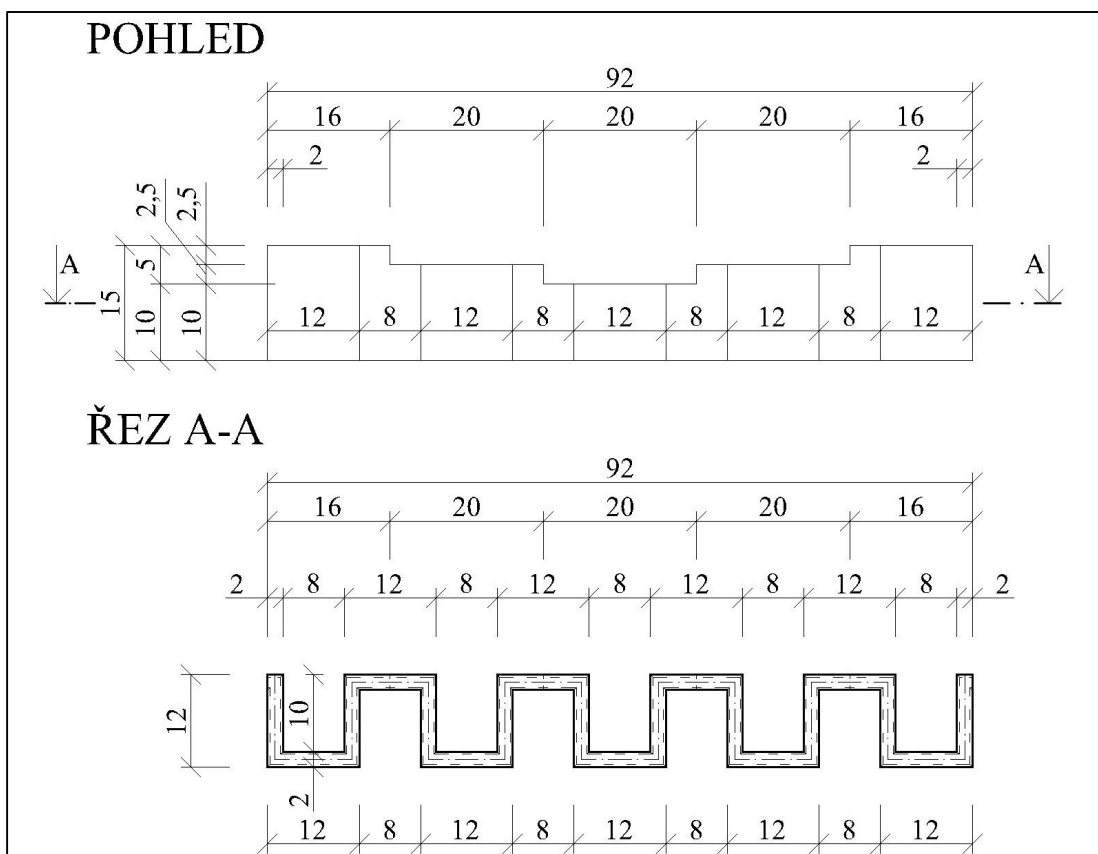
Obr. 3.26: Směry proudnic typu VS3 – Varianta II. pro průtoky 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená), 90 l/s (modrá), pohled shora

Dle Obr. 3.26 je zřetelné, že proudnice při všech průtocích směřují do středu výškově upravených stěn.

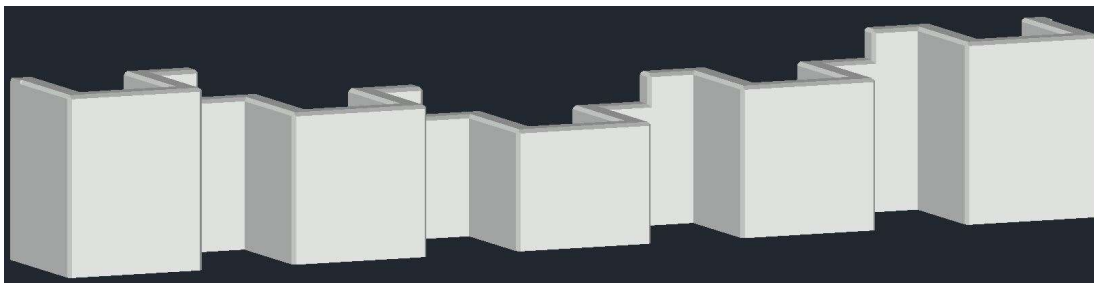
Podrobná fotodokumentace je součástí Přílohy C – typ VS3.

3.4 Typ VS4

Jedná se o ekvivalent typu VS2, rozdíl je v provedení úpravy. Zde je snížení o 5 cm dosaženo dvěma stupni vysokými 2,5 cm. Není zde tedy trojúhelník snížení jako u typu VS2, ale stupně. Na Obr. 3.27 jsou zobrazeny rozměry a tvar typu VS4, na Obr. 3.28 je 3D model typu VS4.



Obr. 3.27: Pohled a řez modelem VS4 včetně rozměrů, kótováno v cm



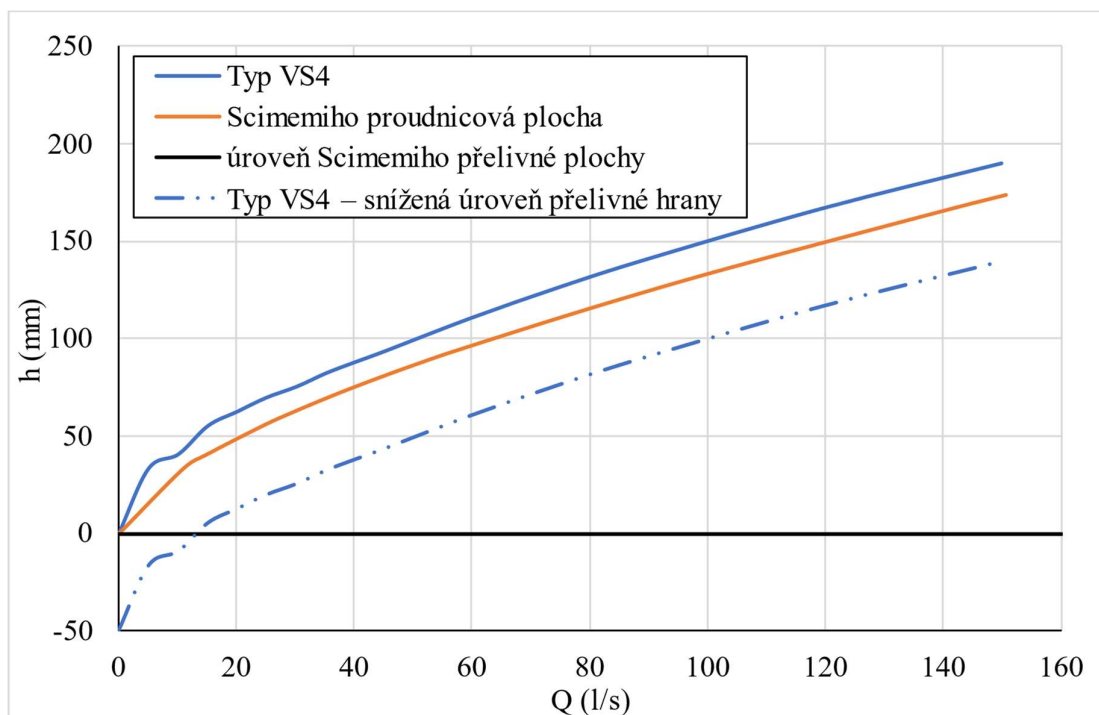
Obr. 3.28: 3D model typu VS4

V Tab. 3.7 je změřena přepadová výška h pro reálné průtoky Q , dále je v tabulce zaznamenán přehled, kdy je přeliv schopen převést ledové kry a plávi, viz předchozí kapitoly.

Tab. 3.7: Záznam z měření typu VS4

Q	h	úspěšně převedené	
		ledové kry	plávi
0	0	✘	✘
5	34	✘	✘
10	41	✘	✘
15	55	✓	✘
20	63	✓	✘
25	70	✓	✘
30	76	✓	✓
35	82	✓	✓
40	88	✓	✓
45	93	✓	✓
60	111	✓	✓
75	127	✓	✓
90	141	✓	✓
120	167	✓	✓
150	190	✓	✓

Na Obr. 3.29 jsou konzumpční křivky typu VS4 a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho, viz předchozí kapitoly. Jako u předchozích typů, i zde je možnost zvýšit kapacitu snížením úrovně přelivné hrany. Ovšem za cenu zmenšení zásobního objemu v nádrži.

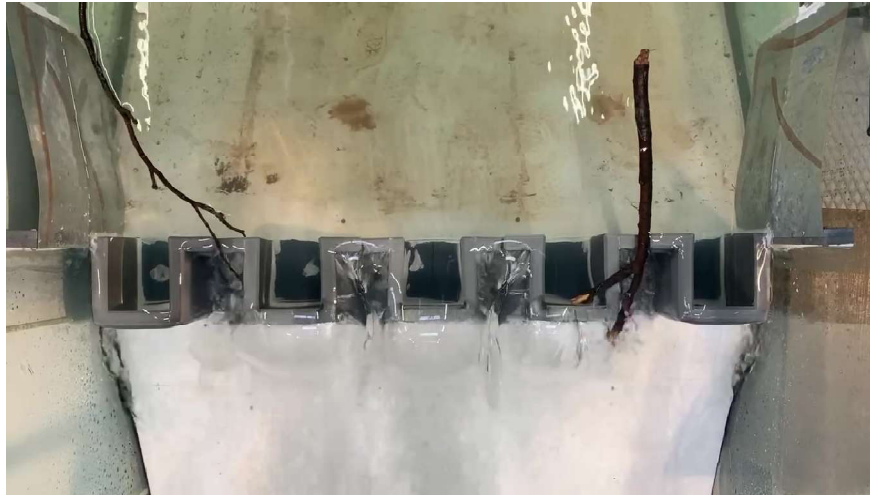


Obr. 3.29: Konzumpční křivka typu VS4 ve dvou úrovních a beztlakové přelivné plochy dle Scimemiho

Přeliv byl schopen převést ledové kry při průtoku 15 l/s, plávi bylo úspěšně převedeno až při průtoku 30 l/s. Na Obr 3.30 je snímek nepřevedených ledových ker a na Obr. 3.31 je snímek nepřevedeného plávi.



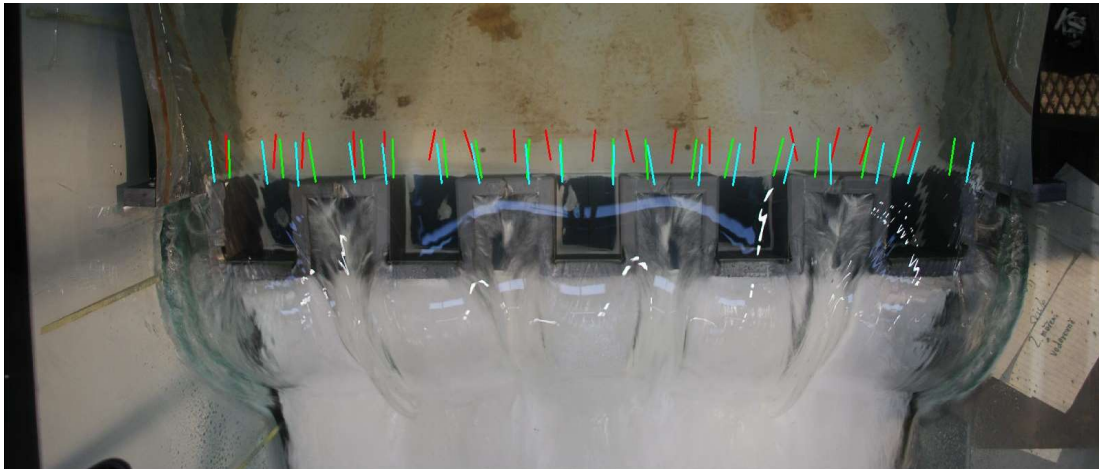
Obr. 3.30: Snímek nepřevedených ledových ker



Obr. 3.31: Snímek nepřevedeného plávi

K nepřevedení plávi při nižším průtoku došlo z důvodu malé přepadové výšky na krajních stěnách.

Na Obr. 3.32 jsou vyznačeny směry proudnic pro průtoky 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s. Je zde vidět, že průtoky jsou koncentrovány do středu přelivu bez ohledu na velikost průtoku.



Obr. 3.32: Směry proudnic typu VS4 pro průtoky 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená), 90 l/s (modrá), pohled shora

Podrobnější fotodokumentace je součástí Přílohy D – typ VS4.

4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vyhodnocení výsledků probíhalo za účelem zjištění vlastností zkoumaných úprav labyrintových přelivů. Nejdříve se porovnávaly možnosti provedení přelivné hrany, které se měřily na typu VS1, viz podkapitola 3.1. Dále se zjišťoval součinitel přepadu m pro jednotlivé labyrintové přelivy a rovnice pro jeho výpočet. Jako další se vyhodnocovalo proudové pole v nátokové části, schopnost převádění ledových ker a plávi jednotlivých typů. Nakonec se porovnávaly měřené labyrintové přelivy s běžně používanými typy přelivů – Scimemiho beztlakovou proudnicovou přelivnou plochou, viz podkapitoly 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4. Výsledky těchto vyhodnocení jsou řešeny v následujících podkapitolách.

4.1 Porovnání provedení přelivné hrany

Tato podkapitola se věnuje rozdílům provedení přelivné hrany. Měření probíhalo na typu VS1, viz podkapitola 3.1.

Typ VS1 má zkosené hrany, pro měření různých provedení se na původní přelivnou hranu pomocí silikonu připevnilly protikusy s dalšími provedeními přelivné hrany – válcovou plochou a pravoúhlým provedením.

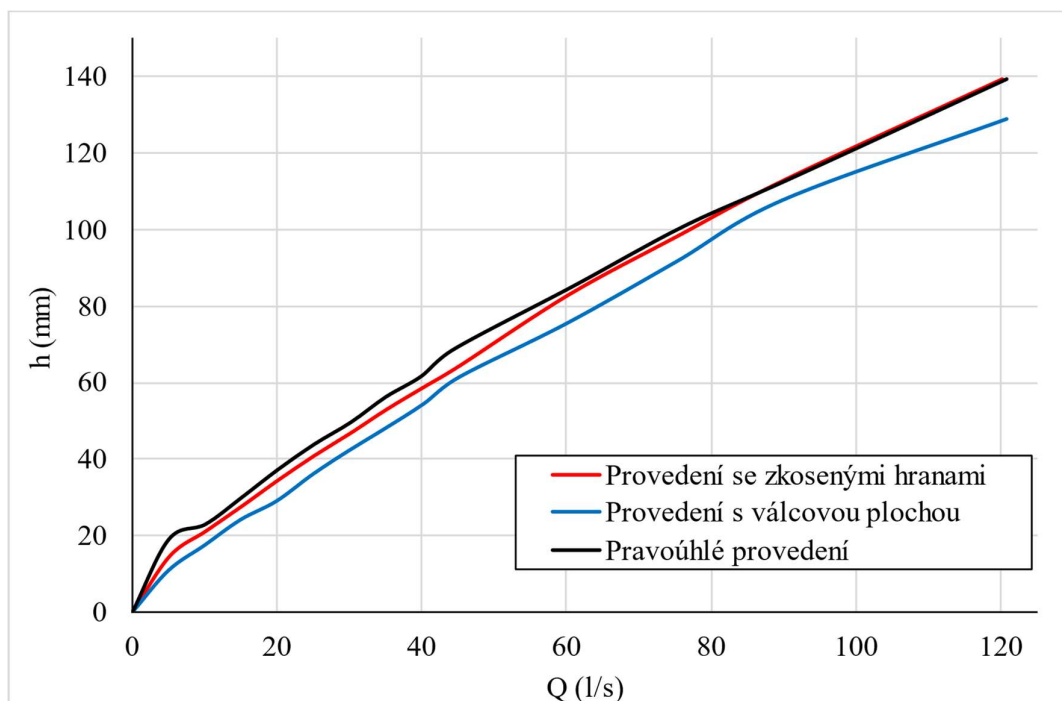
Zkosení hran má rozměry na modelu 3x3 mm, válcová plocha má průměr tloušťku stěny, tedy 2 cm.

V Tab. 4.1 jsou vedle sebe uvedena měření všech tří provedení s hodnotami reálných průtoků Q a jím příslušných přepadových výšek h . V Tab. 4.2 je porovnání kapacit válcové plochy a pravoúhlého provedení vůči kapacitě s provedením zkosených hran.

Na Obr. 4.1 jsou vykresleny konzumpční křivky variantního provedení přelivné hrany na typu VS1. Z obrázku je patrné, že provedení se zkosenými hranami a pravoúhlé provedení jsou průběhem velmi podobné a při vyšších průtocích dosahují totožných hodnot. Nejlépe vychází provedení s válcovou plochou přelivné hrany, avšak hodnoty jsou velmi blízko ostatním provedením.

Tab. 4.1: Záznamy z měření provedení přelivné hrany typu VS1

ZKOSENÉ HRANY		VÁLCOVÁ PLOCHA		PRAVOÚHLÉ	
Q	h	Q	h	Q	h
l/s	mm	l/s	mm	l/s	mm
0	0	0	0	0	0
5	15	5	11	5	19
10	21	10	18	10	23
15	28	15	24	15	30
20	34	20	29	20	37
25	41	25	36	25	44
30	47	30	42	30	50
35	53	35	48	35	56
40	59	40	54	40	62
45	64	45	62	45	69
60	83	60	76	61	85
75	98	75	92	76	101
90	113	90	108	91	114
120	139	121	129	121	140



Obr. 4.1: Konzumpční křivky provedení přelivných hran typu VS1

Tab. 4.2: Porovnání kapacit provedení přelivné hrany

PRŮTOK	REFERENČNÍ PROVEDENÍ		POROVNÁVANÉ TYPY PROVEDENÍ			
	ZKOSENÉ HRANY		VÁLCOVÁ PLOCHA		PRAVOÚHLÉ	
Q	h	kapacita přelivu	h	kapacita přelivu vůči zkoseným hranám	h	kapacita přelivu vůči zkoseným hranám
l/s	mm	%	mm	%	mm	%
0	0	0%	0	0%	0	0%
5	15	100%	11	134%	19	77%
10	21	100%	18	120%	23	92%
15	28	100%	24	114%	30	92%
20	34	100%	29	119%	37	92%
25	41	100%	36	113%	44	93%
30	47	100%	42	111%	50	94%
35	53	100%	48	110%	56	94%
40	59	100%	54	108%	62	95%
45	64	100%	62	104%	69	93%
60	83	100%	76	110%	85	97%
75	98	100%	92	107%	101	97%
90	113	100%	108	105%	114	100%
120	139	100%	129	108%	140	100%

Lze předpokládat podobné výsledky i u ostatních typů, u nichž nebyl rozdíl provedení přelivné hrany měřen.

Doporučuji provádět labyrintové přelivy řešené v této práci s válcovou přelivnou plochou nebo zkosenými hranami. Pravoúhlé provedení přelivné hrany není doporučeno z hlediska možného porušení hrany ledovými krami nebo plávim.

4.2 Součinitel přepadu m

Pro návrh a budoucí použití v praxi byly pro jednotlivé typy stanoveny rovnice pro výpočet součinitele přepadu m , který je nezbytný pro výpočet kapacity přelivu. Dané rovnice byly tvořeny pomocí programovacího jazyka MATLAB.

Nejdříve bylo důležité si zpětně z rovnice kapacity přelivu zjistit příslušné hodnoty součinitele přepadu pro dané průtoky a přepadové výšky.

Kapacita přelivu dle Bazina [4]:

$$Q = mb\sqrt{2gh^2}, \quad (4.1)$$

z toho upravená rovnice pro výpočet m :

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2gh^2}}, \quad (4.2)$$

kde: m součinitel přepadu [-],

Q reálný průtok z měření [m^3/s],

h přepadová výška příslušná danému Q [m],

b šířka přelivné hrany [m] – pro navržené modely $b = 0,92$ m.

Pro výpočet se hodnoty přepadových výšek h přepočítaly z mm na m a hodnoty reálných průtoků Q z l/s na m^3/s . Z těchto přepočítaných hodnot se vytvořil graf, kde Q tvořilo x-ovou osu. Poté se graf rozdělil podle průběhu na potřebný počet grafů, pro které se pak hledala spojnice trendu s největší podobností.

Při tvorbě rovnic se vycházelo z rovnice součinitele přepadu podle Bazina [4]:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s}\right)^2\right], \quad (4.3)$$

kde: m součinitel přepadu [-],

h přepadová výška [m],

s výška přelivu nad dnem [m].

Hodnoty přepadových výšek je nutno do výpočtu součinitele přepadu pro daný typ vydělit použitým měřítkem, kterým byly modelové rozměry zvětšeny.

4.2.1 Typ VSI

V Tab. 4.3 je porovnání výpočtů součinitele přepadu spočítaných pomocí rovnice 4.2 a rovnic vytvořených v MATLABu. Červeně je zde vyznačena nejnižší podobnost vypočteného součinitele přepadu z nalezených rovnic s dopočítaným součinitelem přepadu z rovnice 4.2.

Tab. 4.3: Porovnání výpočtu součinitele přepadu typu VSI

Q_r	h	h/b	m z rovnice 4.2	výpočet m pomocí rovnic z MATLABu	podobnost	
m^3/s	m		$b = 0,92 m$		%	
0	0	0	0	0	100%	$h/b \leq 0,023$ $\rightarrow m_1$
0,005	0,015	0,016	0,71	0,72	99,86%	
0,010	0,021	0,023	0,81	0,81	99,99%	
0,015	0,028	0,030	0,81	0,80	99,74%	$0,023 < h/b \leq 0,07$ $\rightarrow m_2$
0,020	0,034	0,037	0,77	0,77	99,67%	
0,025	0,041	0,044	0,75	0,75	99,76%	
0,030	0,047	0,051	0,73	0,73	99,41%	
0,035	0,053	0,058	0,71	0,71	99,89%	
0,040	0,059	0,064	0,69	0,69	99,93%	
0,045	0,064	0,070	0,68	0,68	99,92%	
0,060	0,083	0,090	0,62	0,62	99,50%	$h/b > 0,07$ $\rightarrow m_3$
0,075	0,098	0,107	0,60	0,60	99,47%	
0,090	0,113	0,123	0,58	0,58	99,89%	
0,120	0,139	0,151	0,57	0,57	99,74%	
0,151	0,162	0,176	0,57	0,57	99,88%	

Rovnice pro výpočet součinitele přepadu m_1 , m_2 , m_3 :

$$m_1 = \left(-250,7 + \left(\frac{50,02}{h+0,15}\right)\right) (0,92h), \quad (4.4)$$

$$m_2 = \left(4,726h + \left(\frac{-0,014523}{h^3}\right)^3\right) + \left(1 - 2,079 \left(\frac{h}{h+0,15}\right)\right), \quad (4.5)$$

$$m_3 = \left(0,2584 + \left(\frac{0,1681}{h}\right)^2\right) \left(1 + 6,849 \left(\frac{h}{h+0,15}\right)^2\right) (0,92h), \quad (4.6)$$

kde: m_i součinitel přepadu pro dané h/b [-],

h přepadová výška vydělená použitým měřítkem [m].

4.2.2 Typ VS2

Byl použit stejný postup jako u typu VS1 – pomocí rovnice 4.2 bylo zjištěno skutečné m , poté se pomocí programovacího jazyka MATLAB tvořily rovnice spojnice trendu, která nejvíce odpovídá průběhu skutečných hodnot.

V Tab. 4.4 je porovnání podobnosti hodnot součinitele přepadu mezi skutečnou a dopočítanou hodnotou. Červeně je vyznačena nejnižší podobnost.

Tab. 4.4: Porovnání výpočtu součinitele přepadu typu VS2

Q_r	h	h/b	m z rovnice 4.2	výpočet m pomocí rovnic z MATLABu	podobnost	
m^3/s	m		b = 0,92 m		%	
0	0	0	0	0	100%	
0,005	0,034	0,037	0,20	0,19	96,82%	$h/b < 0,1$ → m_1
0,010	0,046	0,050	0,25	0,26	99,31%	
0,015	0,055	0,060	0,29	0,30	96,51%	
0,020	0,061	0,066	0,33	0,32	97,50%	
0,025	0,068	0,074	0,35	0,35	99,36%	
0,030	0,074	0,080	0,37	0,37	99,72%	
0,035	0,080	0,087	0,38	0,38	99,49%	
0,040	0,085	0,092	0,39	0,39	99,70%	
0,045	0,092	0,100	0,40	0,40	99,98%	
0,060	0,113	0,122	0,39	0,40	98,66%	
0,075	0,128	0,139	0,40	0,40	99,71%	
0,090	0,142	0,154	0,41	0,41	99,11%	
0,120	0,169	0,184	0,42	0,43	98,86%	
0,150	0,190	0,206	0,45	0,44	99,41%	

Rovnice pro výpočet součinitele přepadu m_1 , m_2 :

$$m_1 = 5,281h + \left(1 - 472,6 \left(\frac{h}{h+0,1}\right)\right) (0,92h)^3, \quad (4.7)$$

$$m_2 = \left(-0,06443 + \left(\frac{0,9996}{h}\right)\right) \left(1 - 0,2267 \left(\frac{h}{(h+0,1)^2}\right)\right) (0,92h), \quad (4.8)$$

kde: m_i součinitel přepadu pro dané h/b [-],

h přepadová výška vydělená použitým měřítkem [m].

4.2.3 Typ VS3

4.2.3.1 Varianta I.

V Tab. 4.5 je porovnání podobnosti součinitele přepadu mezi skutečnou a vypočítanou hodnotou, červeně je označena nejnižší podobnost. Postup byl stejný jako u předchozích kapitol.

Tab. 4.5: Porovnání výpočtu součinitele přepadu typu VS3 – Varianta I.

Q_r	h	h/b	m z rovnice 4.2	výpočet m pomocí rovnic z MATLABu	podobnost	
m^3/s	m		$b = 0,92 \text{ m}$		%	
0	0	0	0	0	100%	
0,005	0,040	0,043	0,16	0,15	96,74%	$h/b \leq 0,102$ $\rightarrow m_1$
0,010	0,053	0,058	0,20	0,21	98,30%	
0,015	0,063	0,069	0,23	0,24	96,00%	
0,020	0,070	0,076	0,27	0,26	99,21%	
0,025	0,077	0,083	0,29	0,29	98,23%	
0,030	0,083	0,090	0,31	0,31	98,63%	
0,035	0,089	0,097	0,32	0,32	99,82%	
0,040	0,094	0,102	0,34	0,34	98,77%	
0,045	0,100	0,109	0,35	0,35	99,99%	
0,060	0,116	0,126	0,37	0,37	99,97%	
0,075	0,131	0,142	0,39	0,39	99,64%	
0,090	0,146	0,158	0,40	0,40	99,58%	
0,119	0,170	0,185	0,42	0,42	99,83%	
0,152	0,195	0,212	0,43	0,43	99,92%	

Rovnice pro výpočet součinitele přepadu m_1 , m_2 :

$$m_1 = 3,019h + \left(1 - 84,82 \left(\frac{h^3}{h+0,1}\right)\right)(0,92h), \quad (4.9)$$

$$m_2 = \left(-0,6669 + \left(\frac{-0,05267}{h^2}\right)\right) \left(1 - 3,282 \left(\frac{h}{h+0,1}\right)\right)(0,92h), \quad (4.10)$$

kde: m_i součinitel přepadu pro dané h/b [-],

h přepadová výška vydělená použitým měřítkem [m].

4.2.3.2 Varianta II.

Jako u předchozích kapitol, v Tab. 4.6 je porovnání podobnosti součinitele přepadu mezi skutečnou a dopočítanou hodnotou, červeně je označena nejnižší podobnost.

Tab. 4.6: Porovnání výpočtů součinitele přepadu typu VS3 – Varianta II.

Q_r	h	h/b	m z rovnice 4.2	výpočet m pomocí rovnic z MATLABu	podobnost	
m^3/s	m		b = 0,92 m		%	
0	0	0	0	0	100%	
0,005	0,038	0,041	0,17	0,18	94,08%	$h/b < 0,1$ → m_1
0,010	0,048	0,052	0,24	0,23	95,74%	
0,015	0,057	0,062	0,27	0,27	99,48%	
0,020	0,065	0,070	0,30	0,30	99,25%	
0,025	0,071	0,077	0,33	0,33	99,69%	
0,030	0,077	0,084	0,35	0,35	100,00%	
0,035	0,083	0,090	0,36	0,36	99,94%	
0,040	0,088	0,096	0,38	0,37	99,36%	
0,045	0,095	0,103	0,38	0,38	99,77%	
0,060	0,110	0,119	0,41	0,40	99,23%	
0,075	0,124	0,134	0,43	0,42	99,24%	
0,090	0,138	0,150	0,43	0,44	99,38%	
0,120	0,162	0,177	0,45	0,45	99,56%	
0,152	0,187	0,204	0,46	0,46	99,97%	

Rovnice pro výpočet součinitele přepadu m_1 , m_2 :

$$m_1 = 3,857h + \left(1 - 547,7 \left(\frac{h^3}{(h+0,1)^3}\right)^3\right) (0,92h), \quad (4.11)$$

$$m_2 = \left(-8,05 + \left(\frac{7,293}{h}\right)\right) \left(1 - 1,175 \left(\frac{h}{(h+0,1)}\right)^2\right) (0,92h)^2, \quad (4.12)$$

kde: m_i součinitel přepadu pro dané h/b [-],

h přepadová výška vydělená použitým měřítkem [m].

4.2.4 Typ VS4

V Tab. 4.7 je, jako u předchozích kapitol, porovnání podobnosti součinitele přepadu mezi skutečnou a dopočítanou hodnotou, červeně je označena nejnižší podobnost.

Tab. 4.7: Porovnání výpočtu součinitele přepadu typu VS4

Q_r	h	h/b	m z rovnice 4.2	výpočet m pomocí rovnic z MATLABu	podobnost	
m^3/s	m		$b = 0,92 \text{ m}$		%	
0	0	0	0	0	100%	
0,005	0,034	0,036	0,20	0,20	99,73%	$h/b < 0,1$ $\rightarrow m_1$
0,010	0,041	0,045	0,30	0,24	78,15%	
0,015	0,055	0,060	0,29	0,29	98,64%	
0,020	0,063	0,068	0,32	0,31	99,22%	
0,025	0,070	0,076	0,33	0,33	99,99%	
0,030	0,076	0,082	0,36	0,35	97,47%	
0,035	0,082	0,090	0,37	0,37	99,88%	
0,040	0,088	0,096	0,38	0,38	99,49%	
0,045	0,093	0,101	0,39	0,39	98,98%	
0,060	0,111	0,120	0,40	0,40	99,84%	
0,075	0,127	0,138	0,41	0,41	99,94%	
0,090	0,141	0,153	0,42	0,42	99,97%	
0,120	0,167	0,181	0,43	0,43	99,80%	
0,150	0,190	0,206	0,44	0,44	99,87%	

Rovnice pro výpočet součinitele přepadu m_1 , m_2 :

$$m_1 = 7,224h + \left(1 - 8,902 \left(\frac{h}{h+0,1}\right)\right)(0,92h), \quad (4.13)$$

$$m_2 = \left(0,3485 + \left(\frac{0,3302}{h}\right)\right) \left(1 + 0,3339 \left(\frac{h}{h+0,1}\right)\right)(0,92h), \quad (4.14)$$

kde: m_1 součinitel přepadu pro dané h/b [-],

h přepadová výška vydělená použitým měřítkem [m].

4.3 Porovnání s běžně používanými přelivy

Běžně používaným typem přelivů je proudnicová beztlaková přelivná plocha dle Scimemiho. Částečně je tato kapitola rozebrána v podkapitolách příslušných typů, kde jsou vyobrazeny konzumpční křivky se Scimemiho beztlakovou přelivnou plochou.

V Tab. 4.8 jsou porovnané všechny měřené typy přelivů s beztlakovou přelivnou plochou dle Scimemiho.

Z tabulky je zřetelné, že typ VS1 je v porovnání s beztlakovou přelivnou plochou kapacitnější, porovnání je ale pouze do maximálního průtoku 150 l/s. Součinitel přepadu u typu VS1 klesá, před maximálním průtokem se rozdíly hodnot součinitele přepadu snižují. Je možné, že pro vyšší průtoky by kapacita typu VS1 mohla klesnout pod kapacitu Scimemiho beztlakové přelivné plochy.

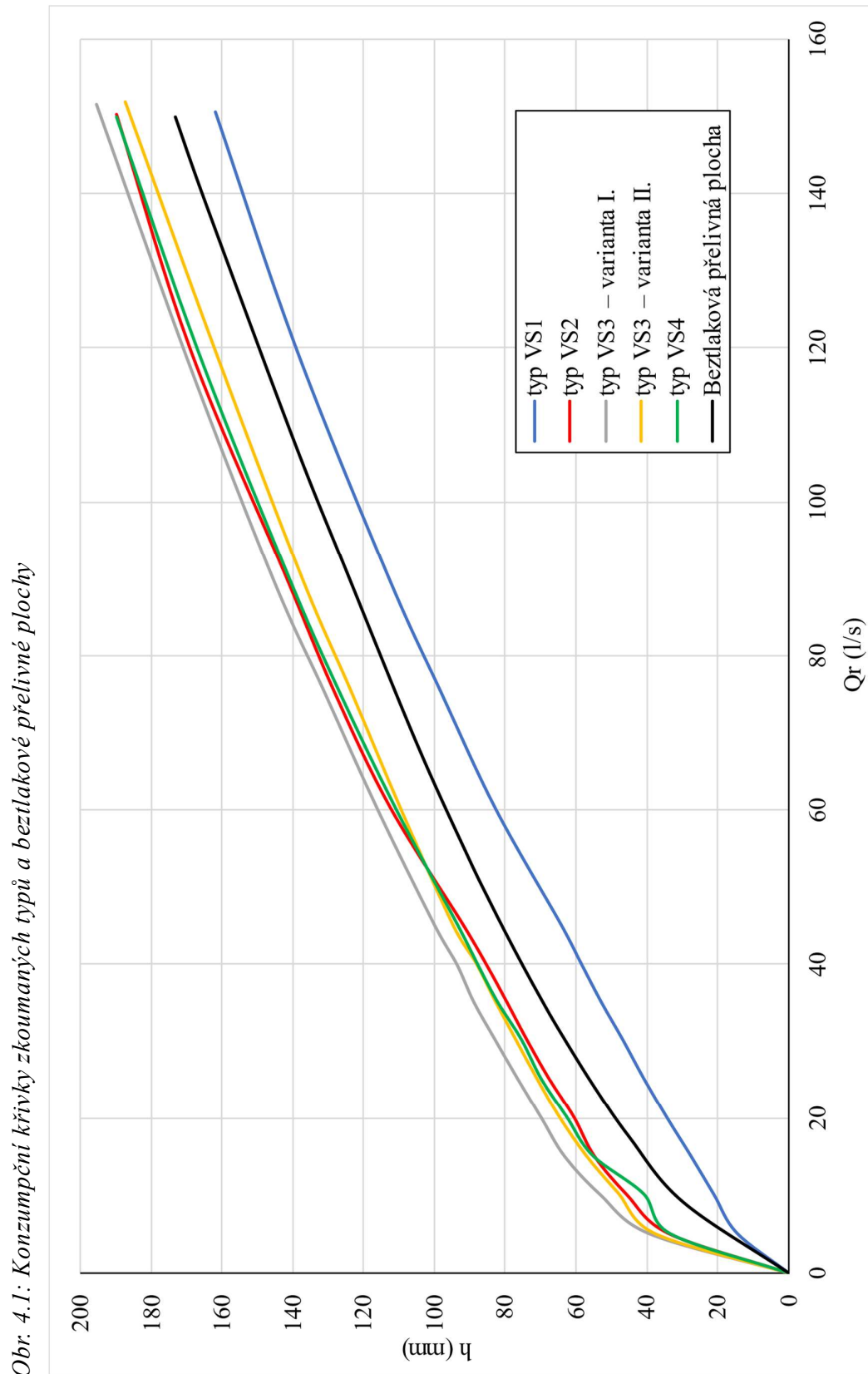
Všechny zkoumané typy s proměnlivou výškou přelivné hrany mají velmi podobné výsledky. Ovšem u těchto typů součinitel přepadu roste, proto je možné, že pro větší průtoky by mohl kapacitně vyrovnat i překonat beztlakovou plochu.

Na Obr. 4.1 jsou vykresleny konzumpční křivky všech zkoumaných typů a pro porovnání i beztlakové přelivné plochy. Je zde vidět odskočení kapacity mezi typem VS1 a výškově upravenými typy. Beztlaková přelivná plocha leží kapacitně mezi typem VS1 a typy s proměnlivou výškou přelivné hrany.

V rámci transformace povodňových vln jsou účinnější labyrintové přelivy s proměnlivou výškou přelivné hrany – dříve začnou aktivizovat retenční prostor v nádrži s pomalým převáděním povodňové vlny, zplošťují křivku transformace povodňové vlny a chrání povodí níže po toku. V případě osazení typů s výškovou úpravou stěn tak, aby nejnižší bod byl na stejné kótě jako původní přeliv, bychom zvětšili neovladatelný retenční prostor v nádrži během povodní za cenu snížení kapacity a zvýšení hladiny v nádrži. To v určitých případech skutečných vodních děl nemusí být problém. V případě nutnosti zachování maximální hladiny nádrži by bylo možné snižovat kótu nejnižšího bodu upravených přelivů, zmenšovat zásobní prostor v nádrži, ale díky výškově úpravě zploštit křivku transformace povodně.

Tab. 4.8: Přehled porovnání zkoumaných typů s beztlakovou přelivnou plochou

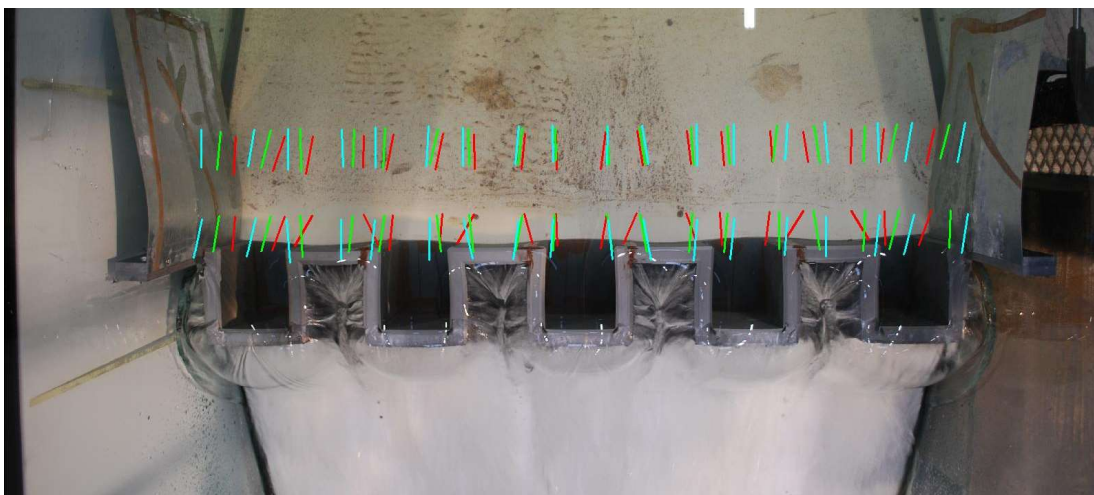
VS1			VS2			VS3 – VARIANTA I.		
Q (l/s)	h (mm)	m	Q (l/s)	h (mm)	m	Q (l/s)	h (mm)	m
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	15	0,71	5	34	0,20	5	40	0,16
10	21	0,81	10	46	0,25	10	53	0,20
15	28	0,81	15	55	0,29	15	63	0,23
20	34	0,77	20	61	0,33	20	70	0,27
25	41	0,75	25	68	0,35	25	77	0,29
30	47	0,73	30	74	0,37	30	83	0,31
35	53	0,71	35	80	0,38	35	89	0,32
40	59	0,69	40	85	0,39	40	94	0,34
45	64	0,68	45	92	0,40	45	100	0,35
60	83	0,62	60	113	0,39	60	116	0,37
75	98	0,60	75	128	0,40	75	131	0,39
90	113	0,58	90	142	0,41	90	146	0,40
120	139	0,57	120	169	0,42	119	170	0,42
151	162	0,57	150	190	0,45	152	195	0,43
VS3 – VARIANTA II.			VS4			SCIMEMI		
Q (l/s)	h (mm)	m	Q (l/s)	h (mm)	m	Q (l/s)	h (mm)	m
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	38	0,17	5	34	0,20	9	30	0,44
10	48	0,24	10	41	0,30	18	45	0,45
15	57	0,27	15	55	0,29	24	55	0,46
20	65	0,30	20	63	0,32	32	65	0,47
25	71	0,33	25	70	0,33	36	70	0,47
30	77	0,35	30	76	0,36	40	75	0,47
35	83	0,36	35	82	0,37	44	80	0,48
40	88	0,38	40	88	0,38	49	85	0,48
45	95	0,38	45	93	0,39	53	90	0,48
60	110	0,41	60	111	0,40	69	105	0,49
75	124	0,43	75	127	0,41	91	125	0,51
90	138	0,43	90	141	0,42	108	140	0,51
120	162	0,45	120	167	0,43	139	165	0,51
152	187	0,46	150	190	0,44	150	173	0,51



4.4 Vyhodnocení proudového pole

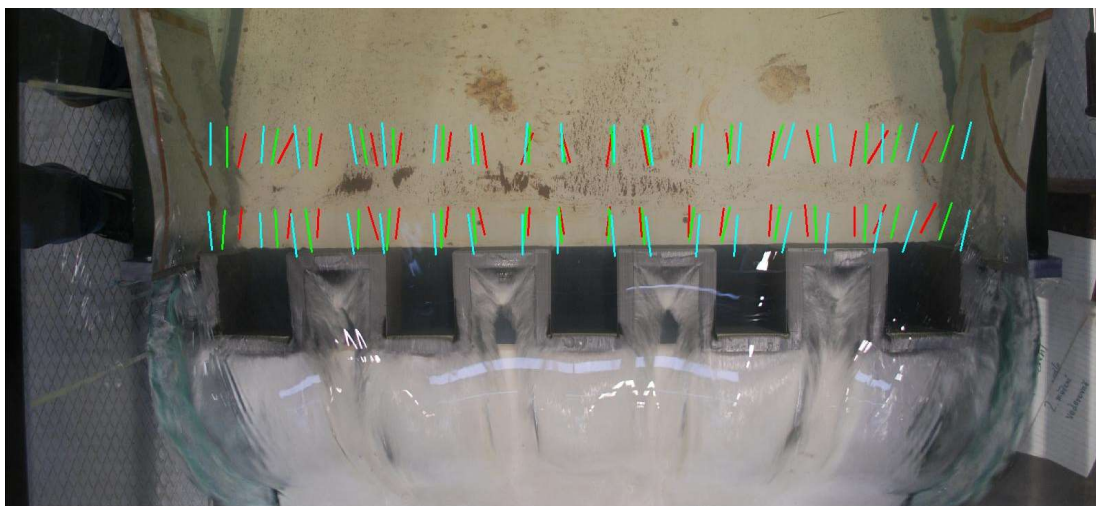
V rámci práce bylo vyhodnocováno proudové pole labyrintových přelivů v nátokové části. U labyrintových přelivů s proměnlivou výškou přelivné hrany byl předpoklad koncentrace proudu do nejnižších bodů úprav. Směry proudnic byly zjišťovány pomocí bavlnek na výškově nastavitelném rámu, tento rám byl popsán v kapitole 3. Směry proudnic byly vyznačeny v programu AUTOCAD.

Na Obr. 4.2 je snímek typu VS1 s vyznačenými směry proudnic pro průtoky 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s ve dvou vodorovných polohách, svislá poloha se lišila podle úrovně hladiny. Při malé přepadové výšce při průtoku 5 l/s proudnice u přelivu směřují do návodních kapes cyklů. Při větších průtocích směřují proudnice u přelivu naopak do vzdušných kapes. Směry proudnic ve 2. vodorovné poloze jsou po celé šíři stejné.



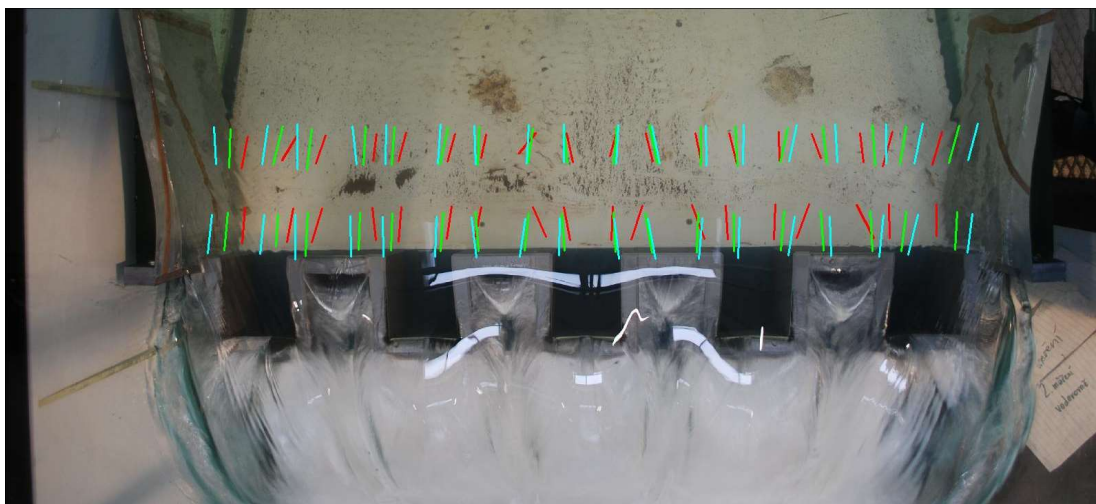
Obr. 4.2: Vyznačené směry proudnic pro 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená) a 90 l/s (modrá) v nátokovém poli typu VS1 v 1. a 2. vodorovné poloze

Na Obr. 4.3 je snímek s vyznačenými směry proudnic typu VS2. Směry byly vyznačeny pro průtoky 5 l/s, 45 l/s a 90 l/s. Předpoklad koncentrace proudu do středu labyrintového přelivu, tedy do nejnižšího bodu, byl potvrzen. U nižších průtoků, kdy je menší šířka přepadového paprsku proudnice směřují výrazněji na střed. U větších průtoků není směr na střed přelivu tolik výrazný. Proudnice v druhé vodorovné poloze mají stejné směry jako první vodorovné poloze.



Obr. 4.3: Vyznačené směry proudnic pro 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená) a 90 l/s (modrá) v nátokovém poli typu VS2 v 1. a 2. vodorovné poloze

Na Obr. 4.4 jsou vyznačené směry proudnic ve dvou vodorovných polohách pro typ VS3 – Varianta I. Při malém průtoku 5 l/s proudnice směřovaly do výškově upravených cyklů. Při větších průtocích směřují proudnice do kapes mezi výškově upravené cykly. Proudnice ve druhé vodorovné poloze korespondují se směry v první vodorovné poloze.



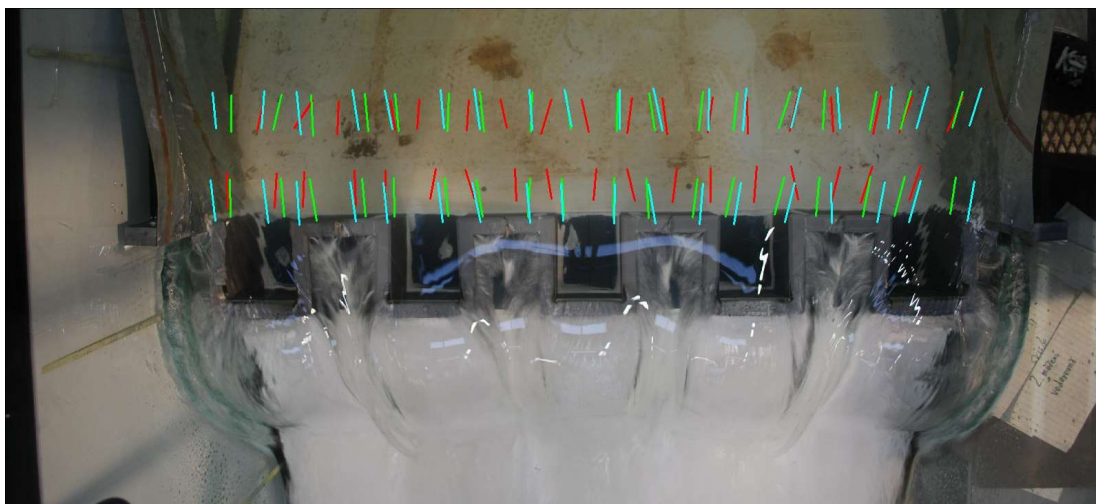
Obr. 4.4: Vyznačené směry proudnic pro 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená) a 90 l/s (modrá) v nátokovém poli typu VS3 – Varianta I. v 1. a 2. vodorovné poloze

Na Obr. 4.5 jsou vyznačené směry proudnic pro typ VS3 – Varianta II. U této varianty proudnice vždy směřují do cyklů s výškově upravenými stěnami bez ohledu na velikost průtoku a vodorovnou polohu.



Obr. 4.5: Vyznačené směry proudnic pro 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená) a 90 l/s (modrá) v nátokovém poli typu VS3 – Varianta II. v 1. a 2. vodorovné poloze

Na Obr. 4.6 jsou vyznačené směry proudnic pro typ VS4. Proudnice zde směřují, podobně jako u typu VS2, do středu přelivu, jak bylo předpokládáno. Směr proudnic je zde výrazný bez ohledu na velikost průtoku. Směr proudnic ve druhé vodorovné poloze odpovídá první vodorovné poloze.



Obr. 4.6: Vyznačené směry proudnic pro 5 l/s (červená), 45 l/s (zelená) a 90 l/s (modrá) v nátokovém poli typu VS4 v 1. a 2. vodorovné poloze

Směry proudnic odpovídaly předpokladu při vytváření výškových úprav. Předpoklad při větších průtocích neplní pouze typ VS3 – Varianta I., kdy proud nesměruje do výškově upravených cyklů, ale do kapes mezi těmito cykly.

4.5 Vyhodnocení převádění ledových ker a pláví

Rozměry a materiál ledových ker a pláví je popsán v kapitole 3.

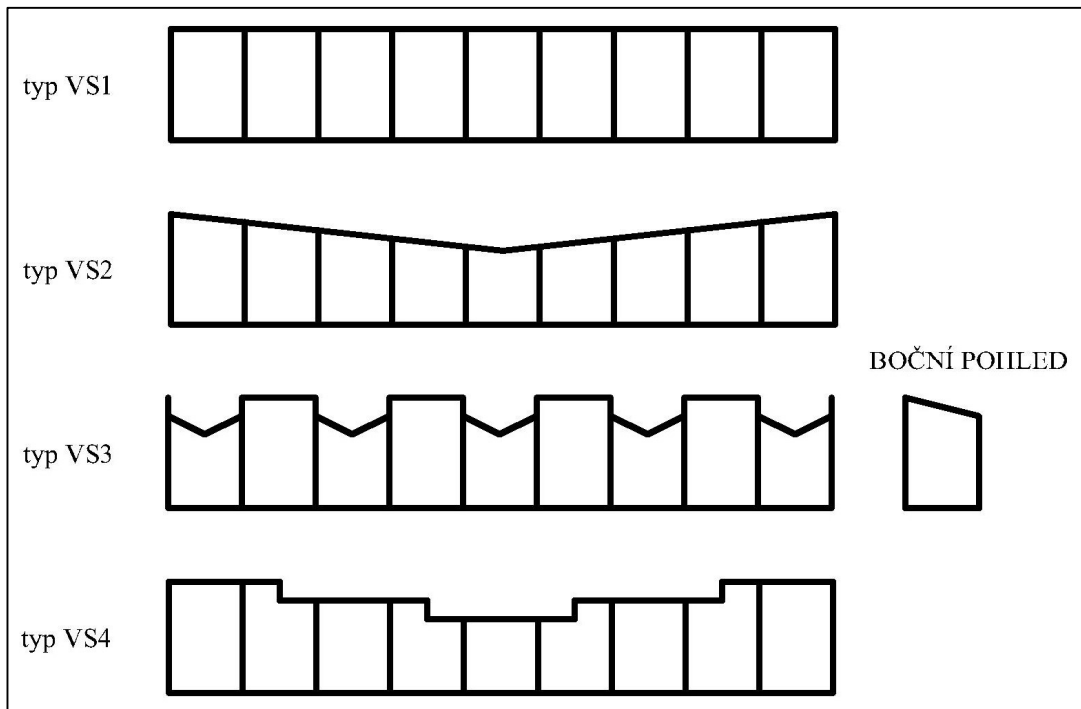
V Tab.4.9 je vyobrazeno, kdy dojde u jednotlivých typů k převedení ledových ker a pláví. Nejlépe převádí typy VS1, VS2 a VS3 – Varianta I., všechny tyto typy převedou ledové kry i pláví při 20 l/s v modelovém měřítku. VS3 – Varianta II. je z hlediska převádění nejhorší, k převedení dojde až při 30 l/s. Typ VS4 převedl ledové kry již při 15 l/s, nejdříve ze všech měřených typů, avšak pláví převedl jako typ VS3 – Varianta II. až při 30 l/s.

Tab. 4.9: Přehled minimálních průtoků pro převedení ledových ker a pláví

typ	Q_r	převede
	l/s	
VS1	20	ledové kry
		pláví
VS2	20	ledové kry
		pláví
VS3 – Varianta I.	20	ledové kry
		pláví
VS3 – Varianta II.	30	ledové kry
		pláví
VS4	15	ledové kry
	30	pláví

Na Obr. 4.7 je zobrazena výšková úprava jednotlivých typů labyrintových přelivů. Typ VS3 – Varianta I. byl měřen s výškově upravenými stěnami na vzdušném líci, typ VS3 – Varianta II. s výškově upravenými stěnami na návodním líci.

Z hlediska návrhu nepovažují rozdíly v převádění za významné, při volbě typu labyrintového přelivu proto není třeba přihlížet na schopnost převádění.



Obr. 4.7: Výšková úprava řešených typů labyrintových přelivů

5. STANOVENÍ INŽENÝRSKÉHO NÁVRHU

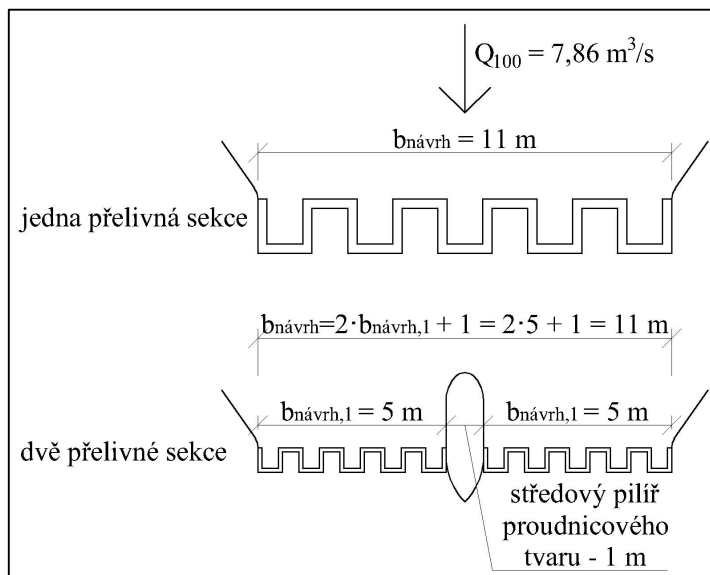
Stanovení inženýrského návrhu je ukázáno na příkladu skutečného vodního díla MVN Milíkov, které se nachází v Karlovarském kraji nedaleko města Cheb.

Veškerá data a rozměry byly převzaty z dokumentace B.1 Souhrnná technická zpráva projektu Rekonstrukce malé vodní nádrže Milíkov od společnosti Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a.s. [5].

5.1 Vzorový návrh

Návrh labyrintových přelivů na MVN Milíkov bude počítán pro dvě varianty. První varianta bude obsahovat jednu přelivnou sekci, která bude v celé šíři stávajícího bezpečnostního přelivu. Druhá varianta bude mít dvě přelivné sekce, které budou mít šíři 5 m a budou odděleny středovým pilířem šířky 1 m. Na Obr. 5.1 je nakresleno schéma pro obě varianty.

Pro návrh jsou krajní pilíře uvažovány hydraulicky vhodné, středový pilíř je uvažován proudnicového tvaru.



Obr. 5.1: Schéma návrhových variant na MVN Milíkov

5.1.1 Důležitá data pro návrh

- stoletý průtok $Q_{100} = 7,86 \text{ m}^3/\text{s}$,
- kóta koruny – 485,65 m n. m.,
- maximální kóta hladiny – 485,00 m n. m.,
- kóta bezpečnostního přelivu – 484,50 m n. m.,
- maximální hodnota přepadové výšky $h_{\max} = 0,5 \text{ m}$,
- délka přelivné hrany stávajícího bezpečnostního přelivu $b_{\text{původní}} = 11 \text{ m}$.
- stávající bezpečnostní přeliv je se zaoblenou hranou dle Kramera
- data stávajícího bezpečnostního přelivu pro konzumpční křivku jsou uvedeny v Tab. 5.1,

Tab. 5.1: Data stávajícího BP pro konzumpční křivku [5]

Hladina	h	μ	b_0	Q
m.n.m.	m	-	m	m^3/s
484,5	0	0,539	11	0
484,55	0,05	0,583	10,98	0,21
484,6	0,1	0,621	10,96	0,64
484,65	0,15	0,654	10,94	1,23
484,7	0,2	0,685	10,92	1,97
484,75	0,25	0,712	10,9	2,87
484,8	0,3	0,738	10,88	3,9
484,85	0,35	0,763	10,86	5,06
484,9	0,4	0,786	10,84	6,36
484,95	0,45	0,809	10,82	7,8
485	0,5	0,831	10,8	9,37

- v Tab. 5.2 jsou uvedeny hodnoty charakteristických čar nádrže.

Tab. 5.2: Charakteristické čary nádrže [5]

Charakteristiky nádrže		
Hladina (m n.m.)	A (m^2)	V (m^3)
480,05	0	0
482,00	836	815
483,00	2 170	2 318
484,40	4 482	7 254
485,00	5 427	10 347

5.1.2 Návrh

5.1.2.1 Návrh jedné přelivné sekce

- nerozvinutá šířka modelu $b_{\text{mod}} = 0,92$ m,

- stanovení měřítka x pro výpočet:

$$x = \frac{b_{\text{původní}}}{b_{\text{mod}}} = \frac{11}{0,92} = 11,96, \quad (5.1)$$

- přepočítání b_{mod} na návrhovou nerozvinutou šířku $b_{\text{návrh}}$:

$$b_{\text{návrh}} = x b_{\text{mod}} = 11,96 \cdot 0,92 = 11 \text{ m}, \quad (5.2)$$

- přepočítání Q_{100} na modelový průtok $Q_{100,\text{mod}}$:

$$Q_{100,\text{mod}} = \frac{Q_{100}}{\sqrt{x^5}} = \frac{7,86}{\sqrt{11,96^5}} = 0,016 \text{ m}^3/\text{s} = 16 \text{ l/s}, \quad (5.3)$$

- přepočítání h_{max} na maximální modelovou přepadovou výšku $h_{\text{max},\text{mod}}$:

$$h_{\text{max},\text{mod}} = \frac{h_{\text{max}}}{x} = \frac{0,5}{11,96} = 0,042 \text{ m} = 42 \text{ mm}, \quad (5.4)$$

- volba typu labyrintového přelivu \rightarrow z důvodu omezení $h_{\text{max},\text{mod}}$ a $Q_{100,\text{mod}}$ volím typ VS1, který při $Q = 15$ l/s má $h = 28$ mm (viz Tab. 3.1) $< h_{\text{max},\text{mod}} = 42$ mm při $Q_{100,\text{mod}} = 16$ l/s,

- hodnoty pro konzumpční křivku jsou uvedeny v Tab 5.3,

Tab. 5.3: Data typu VS1 pro konzumpční křivku jedné přelivné sekce – původní
kóta BP

Hladina	h_{skut}	$h_{\text{skut}}/b_{\text{návrh}}$	m	$b_{\text{návrh}}$	Q
m.n.m.	m	-	-	m	m ³ /s
484,5	0	0	0	11	0
484,55	0,05	0,005	0,28	11	0,15
484,6	0,1	0,009	0,50	11	0,77
484,65	0,15	0,014	0,66	11	1,86
484,7	0,2	0,018	0,76	11	3,31
484,75	0,25	0,023	0,81	11	4,92
484,8	0,3	0,027	0,81	11	6,46
484,84	0,34	0,031	0,80	11	7,73
484,85	0,35	0,032	0,80	11	8,04
484,9	0,4	0,036	0,78	11	9,60
485	0,5	0,045	0,74	11	12,82

Pozn.: v tabulce je tučně vyznačen řádek kdy dojde k převedení Q_{100} .

- vzorový výpočet m pro $h/b \leq 0,023$ podle m_1 pro typ VS1:

$$m_{h/b \leq 0,023} = \left(-250,7 + \left(\frac{50,02}{\frac{h_{\text{skut}}}{x} + 0,15} \right) \right) \left(0,92 \frac{h_{\text{skut}}}{x} \right), \quad (5.5)$$

- vzorový výpočet m pro $0,023 < h/b \leq 0,07$ podle m_2 pro typ VS1:

$$m_{0,023 < h/b \leq 0,07} = \left(4,726 \frac{h_{\text{skut}}}{x} + \left(\frac{-0,01452^3}{\left(\frac{h_{\text{skut}}}{x} \right)^3} \right)^3 \right) + \left(1 - 2,079 \left(\frac{\frac{h_{\text{skut}}}{x}}{\frac{h_{\text{skut}}}{x} + 0,15} \right) \right), \quad (5.6)$$

- díky menší přepadové výšce h o 15 cm lze kótu bezpečnostního přelivu posunout na kótu 484,65 m n.m. a tím navýšit zásobní prostor v nádrži, viz Tab. 5.4,

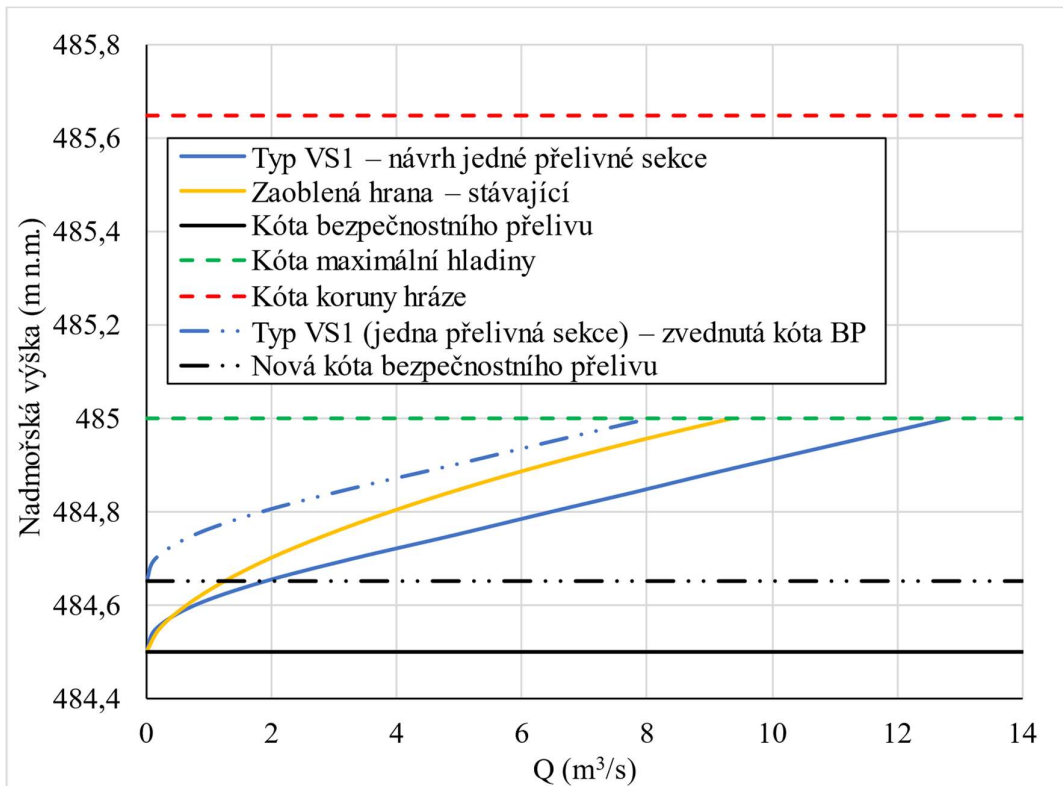
- vykreslení a porovnání konzumpčních křivek na Obr. 5.1,

Tab. 5.4: Data typu VS1 pro konzumpční křivku jedné přelivné sekce – nová kóta BP

Hladina	h_{skut}	$h_{\text{skut}}/b_{\text{návrh}}$	m	$b_{\text{návrh}}$	Q
m.n.m.	m	-	-	m	m ³ /s
484,65	0	0	0	11	0
484,7	0,05	0,005	0,28	11	0,15
484,75	0,1	0,009	0,50	11	0,77
484,8	0,15	0,014	0,66	11	1,86
484,85	0,2	0,018	0,76	11	3,31
484,9	0,25	0,023	0,81	11	4,92
484,95	0,3	0,027	0,81	11	6,46
484,99	0,34	0,031	0,80	11	7,73
485	0,35	0,032	0,80	11	8,04
485,05	0,4	0,036	0,78	11	9,60
485,15	0,5	0,045	0,74	11	12,82

Pozn.: v tabulce je tučně vyznačen řádek kdy dojde k převedení Q_{100} .

Při návrhu jedné přelivné sekce bychom mohli díky vyšší kapacitě labyrintového přelivu typu VS1 zvednout přelivnou hranu o 15 cm na kótu 484,65 m n.m., a tím navýšit zásobní objem v nádrži o přibližně 800 m³, to je navýšení o přibližně 11 % – hodnota byla spočítána pomocí interpolace hodnot v Tab. 5.2.



Obr. 5.1: Konzumpční křivka bezpečnostního přelivu s jednou přelivnou sekci

5.1.2.2 Návrh dvou přelivných sekcí

- nerozvinutá šířka modelu $b_{\text{mod}} = 0,92$ m,
- stanovení měřítka x pro výpočet, od $b_{\text{původní}}$ odečten 1 m – středový pilíř s proudnicovým tvarem:

$$x = \frac{b_{\text{původní}} - 1}{2b_{\text{mod}}} = \frac{11 - 1}{2 \cdot 0,92} = 5,43, \quad (5.7)$$

- přepočítání b_{mod} na návrhovou nerozvinutou šířku jedné sekce $b_{\text{návrh},1}$:

$$b_{\text{návrh},1} = x b_{\text{mod}} = 5,43 \cdot 0,92 = 5 \text{ m}, \quad (5.8)$$

- přepočítání Q_{100} na modelový průtok jedné sekce $Q_{100,\text{mod},1}$:

$$Q_{100,\text{mod},1} = \frac{Q_{100}}{\sqrt{x^5}} = \frac{7,86}{\sqrt{5,43^5}} = 0,057 \text{ m}^3/\text{s} = 57 \text{ l/s}, \quad (5.9)$$

- přepočítání h_{max} na maximální modelovou přepadovou výšku $h_{\text{max},\text{mod}}$:

$$h_{\text{max},\text{mod}} = \frac{h_{\text{max}}}{x} = \frac{0,5}{5,43} = 0,092 \text{ m} = 92 \text{ mm}, \quad (5.10)$$

- volba typu labyrintového přelivu \rightarrow z důvodu omezení $h_{\text{max},\text{mod}}$ a $Q_{100,\text{mod}}$ volím typ VS1, který při $Q = 60$ l/s má $h = 83$ mm (viz Tab. 3.1) $< h_{\text{max},\text{mod}} = 92$ mm při $Q_{100,\text{mod}} = 57$ l/s,
- data pro konzumpční křivku v Tab 5.5,

Tab. 5.5: Data typu VS1 pro konzumpční křivku se dvěma přelivnými sekcemi

Hladina	h_{skut}	$h_{\text{skut}}/b_{\text{návrh}}$	m jedné sekce	$b_{\text{návrh}}$	Q
m.n.m.	m	-	-	m	m ³ /s
484,5	0	0	0	2,5	0
484,55	0,05	0,010	0,54	2,5	0,27
484,6	0,1	0,020	0,78	2,5	1,10
484,65	0,15	0,030	0,80	2,5	2,07
484,7	0,2	0,040	0,76	2,5	3,03
484,75	0,25	0,050	0,73	2,5	4,04
484,8	0,3	0,060	0,70	2,5	5,11
484,85	0,35	0,070	0,68	2,5	6,24
484,9	0,4	0,080	0,65	2,5	7,24
484,93	0,43	0,086	0,63	2,5	7,88
485	0,5	0,100	0,61	2,5	9,49

Pozn.: v tabulce je tučně vyznačen řádek kdy dojde k převedení Q_{100} .

- vzorový výpočet m pro $h/b \leq 0,023$ podle m_1 pro typ VS1:

$$m_{h/b \leq 0,023} = \left(-250,7 + \left(\frac{50,02}{\frac{h_{skut}}{x} + 0,15} \right) \right) \left(0,92 \frac{h_{skut}}{x} \right), \quad (5.5)$$

- vzorový výpočet m pro $0,023 < h/b \leq 0,07$ podle m_2 pro typ VS1:

$$m_{0,023 < h/b \leq 0,07} = \left(4,726 \frac{h_{skut}}{x} + \left(\frac{-0,01452^3}{\left(\frac{h_{skut}}{x} \right)^3} \right)^3 \right) + \left(1 - 2,079 \left(\frac{\frac{h_{skut}}{x}}{\frac{h_{skut}}{x} + 0,15} \right) \right), \quad (5.6)$$

- vzorový výpočet m pro $h/b > 0,07$ podle m_3 pro typ VS1:

$$m_{h/b > 0,07} = \left(0,2584 + \left(\frac{0,1681}{\frac{h_{skut}}{x}} \right)^2 \right) \left(1 + 6,849 \left(\frac{\frac{h_{skut}}{x}}{\frac{h_{skut}}{x} + 0,15} \right)^2 \right) \left(0,92 \frac{h_{skut}}{x} \right), \quad (5.11)$$

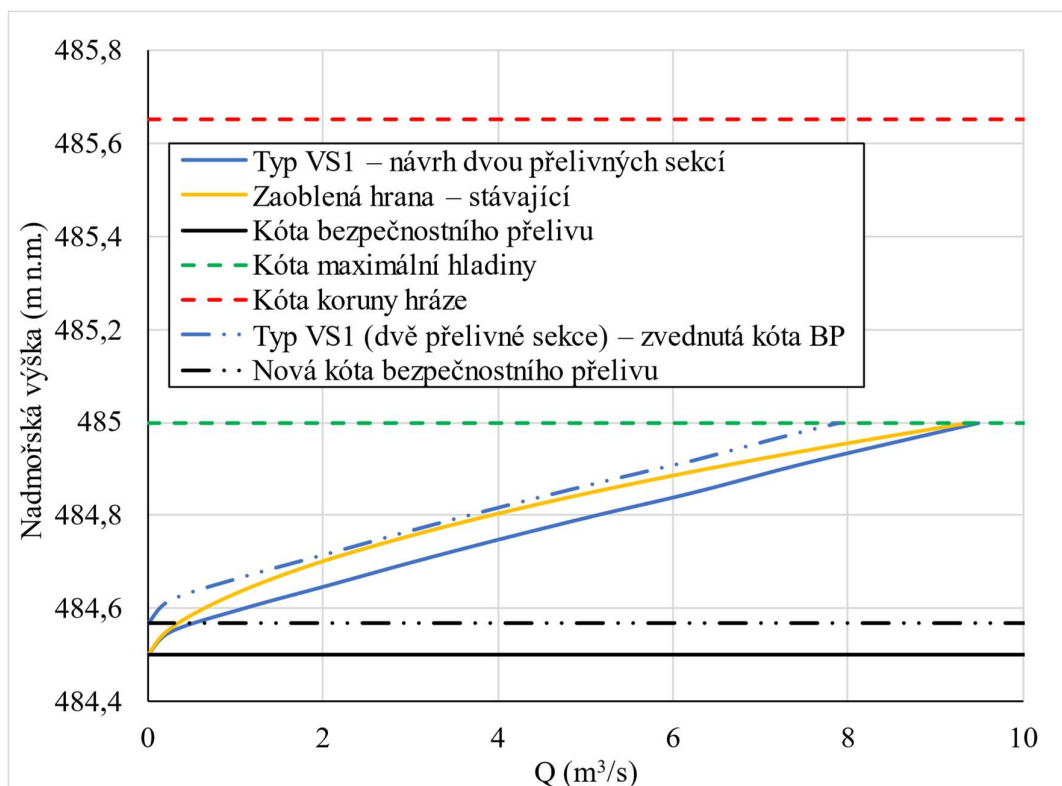
- díky menší přepadové výšce h lze kótu bezpečnostního přelivu zvednout na kótu 484,57 m n.m. a tím navýšit zásobní prostor v nádrži, viz Tab. 5.6,

Tab. 5.6: Data typu VS1 pro konzumpční křivku se dvěma přelivnými sekcemi – nová kóta BP

Hladina	h_{skut}	$h_{skut}/b_{návrh}$	m jedné sekce	$b_{návrh}$	Q
m.n.m.	m	-	-	m	m^3/s
484,57	0	0	0	2·5	0
484,62	0,05	0,010	0,54	2·5	0,27
484,67	0,1	0,020	0,78	2·5	1,10
484,72	0,15	0,030	0,80	2·5	2,07
484,77	0,2	0,040	0,76	2·5	3,03
484,82	0,25	0,050	0,73	2·5	4,04
484,87	0,3	0,060	0,70	2·5	5,11
484,91	0,34	0,068	0,68	2·5	6,00
485	0,35	0,070	0,68	2·5	6,24
484,97	0,4	0,080	0,65	2·5	7,24
485	0,43	0,086	0,63	2·5	7,88

Pozn.: v tabulce je tučně vyznačen řádek kdy dojde k převedení Q_{100} .

- vykreslení a porovnání konzumpčních křivek na Obr. 5.2,



Obr. 5.2: Konzumpční křivka bezpečnostního přelivu se dvěma přelivnými sekcemi

Při návrhu dvou přelivných sekcí lze díky vyšší kapacitě labyrintového přelivu typu VS1 zvednout přelivnou hranu o 7 cm na kótu 484,57 m n.m., a tím navýšit zásobní objem v nádrži o přibližně 400 m³, to je navýšení o přibližně 5 % – hodnota byla spočítána pomocí interpolace hodnot v Tab. 5.2.

5.1.3 Zhodnocení vzorového návrhu

V případě návrhu na MVN Milíkov bych volil jednu přelivnou sekci labyrintového přelivu s vodorovnou přelivnou hranou (typ VS1) s bočními pilíři proudnicového tvaru. Tento návrh by navýšil zásobní objem nádrže přibližně o 800 m³, to je rovno navýšení zásobního objemu o přibližně 11 %. Kvůli zvětšení zásobního objemu by bylo nutné znovu ověřit podmínky stability vodního díla proti posunutí v základové spáře a překlopení.

6. MOŽNOST VYUŽITÍ V RÁMCI INŽENÝRSKÝCH STUDIÍ

Dílčí výstupy z této práce jsou použity v bakalářské práci Ondřeje Němčanského Studie proveditelnosti VD Kryry na Podvineckém potoce, který ji zpracovává současně se mnou. V práci Ondřeje Němčanského je v rámci koncepčního a konstrukčního řešení nově budovaného VD Kryry uveden typ VS3 – Varianta II. jako varianta C [6].

7. NÁVRHY PRO DALŠÍ ZKOUMÁNÍ

V rámci budoucího zkoumání mnou navržených labyrintových přelivů je třeba se zaměřit na změnu výškové úpravy. S ohledem na výsledky doporučuji se věnovat pouze zmenšení snížení přelivných hran. Úpravami s menším snížením přelivné hrany bude možné se přiblížit kapacitně beztlakové přelivné ploše a vytvořit tak přelivy, které by měly podobnou kapacitu jako běžně používané přelivy. Zároveň by lépe transformovaly povodňové vlny, ačkoliv by došlo ke zmenšení neovladatelného retenčního prostoru během povodní vůči přelivů řešených v této práci. Tato úprava by ale stále zajišťovala zploštění transformační křivky povodňové vlny.

Variantou pokračujícího výzkumu je také možnost propojení výškové úpravy labyrintových přelivů s používaným trapézovým půdorysným tvarem.

8. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce jsem provedl fyzikální výzkum labyrintových přelivů s proměnlivou výškou přelivné hrany. Mnou navržené labyrintové přelivy mají čtvercový půdorysný tvar s délkou stěny 10 cm v modelovém měřítku. První navržený typ VS1 má vodorovnou přelivnou hranu a sloužil jako referenční, z kterého jsem vycházel. Výškově upravené byly 3 typy – VS2, VS3 a VS4. Typ VS2 má přelivnou hranu sníženou v celé šíři pomocí trojúhelníku s vrcholem ve středu přelivu 5 cm pod původní rovinou. Typ VS3 má snížené jednotlivé cykly, v nejnižším bodě o 5 cm od původní roviny, v rozích cyklu o 2,5 cm. Typ VS3 byl měřen ve dvou variantách, kde ve Variantě I. jsou výškově upravené stěny na vzdušném líci, u Varianty II. jsou na líci návodním. Typ VS4 má snížení podobné typu VS2, avšak ke snížení došlo pomocí dvou stupňů o výšce 2,5 cm.

V rámci práce jsem pro všechny typy labyrintových přelivů měřil přepadové výšky pro dané průtoky a vytvořil konzumpční křivky. Můj osobní cíl vytvořit kapacitnější přelivy, než jsou běžně používané, se povedlo splnit pouze u typu VS1. Výškově upravené typy jsou méně kapacitnější než Scimemiho beztlaková přelivná plocha. Délka přelivné hrany Scimemiho beztlakové přelivné plocha byla uvažována 92 cm, což se rovná nerozvinuté šíři mnou navržených labyrintových přelivů. Menší kapacita typů s proměnlivou výškou přelivné hrany je kompenzována lepší transformací povodňové vlny. Během transformace povodňové vlny výškově upravené typy dříve aktivizují retenční prostor v nádrži s pomalým upouštěním. Díky této vlastnosti zplošťují křivku transformace a chrání povodí níže po toku. Avšak dojde k navýšení hladiny v nádrži, to je ve většině případů nežádoucím jevem. V některých případech ale tato skutečnost nemusí vadit, v takových případech by výškově upravené typy byly vhodné.

Pro následný návrh byly v rámci vyhodnocování vytvořeny rovnice pro výpočet součinitele přepadu m jednotlivých typů. Tyto rovnice jsou pro každý typ limitovány poměrem h/b (přepadová výška/nerozvinutá šíře přelivu). Průměrná spolehlivost těchto rovnic je přibližně 99,5 %, tedy výpočet součinitele přepadu podle vytvořených rovnic je spolehlivý.

Při vyhodnocování proudového pole v nátokové části bylo zjištěno, že předpoklad koncentrace proudu do nejnižších bodů byl splněn. Pouze u typu VS3 – Varianta I. při větších hodnotách průtoků byla hlavní koncentrace proudu přes výškově neupravené stěny do kapes mezi upravenými cykly.

Chování při převádění ledových ker a plávi jsem během měření dokumentoval pomocí videí, z nichž pak byly dodatečně vytvořeny snímky zachycených ledových ker a plávi. Ledové kry byly nahrazeny kusy voskové desky, plávi bylo nahrazeno větvičkami. Typy VS1, VS2 a VS3 – Varianta I. převedly ledové kry i plávi při modelovém průtoku 20 l/s. Typ VS4 převedl ledové kry již při průtoku 15 l/s, avšak plávi až při průtoku 30 l/s. Nejhůře dopadl typ VS3 – Varianta II., který ledové kry i plávi převedl až při průtoku 30 l/s. Rozdíly mezi minimálními průtoky pro převedení nepovažuji za významné, a proto není třeba při návrhu na toto chování přihlížet.

V rámci stanovení inženýrského návrhu byl vypočítán vzorový návrh, který udává postup výpočtu v případě použití labyrintových přelivů, které jsou řešeny v této práci. Pro větší záběr možných případů byl návrh spočítán pro dvě varianty. První varianta měla jednu přelivnou sekci v šíři stávajícího bezpečnostního přelivu. Druhá varianta uvažovala v původní šíři přelivu dvě přelivné sekce oddělené středovým pilířem.

Tímto výzkumem se vytvořila řada možností řešení labyrintových přelivů. Z práce je patrné, že proměnlivá výška přelivné hrany může mít výraznější vliv na průběh konzumpční křivky, než bylo zaznamenáno. V případném budoucím zkoumání je potřeba se zaměřit na změny geometrie řešených typů. Tyto změny mohou přinést významné výsledky pro návrh a užití v praxi.

9. CITACE

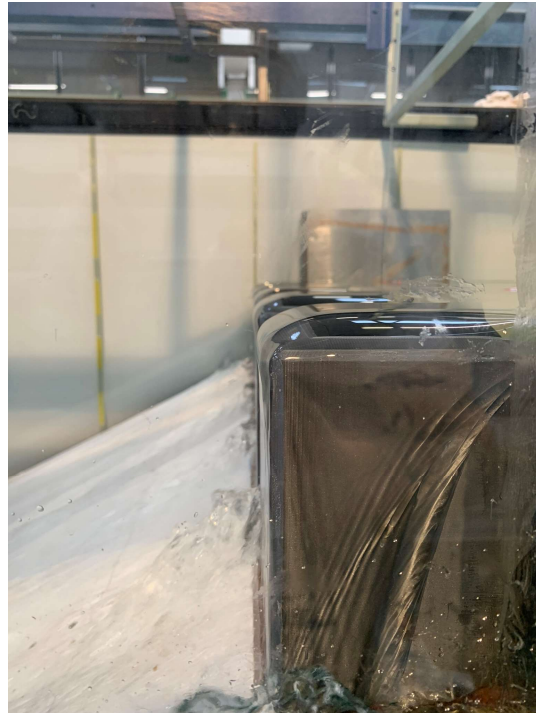
- [1] PŮBAL, Ondřej. *Analýza podtlakových podmínek na labyrintových přelivech*. Praha, 2007. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky.
- [2] ICOLD (2016). *TECHNICAL ADVANCEMENTS IN SPILLWAY DESIGN: Progress and Innovations from 1985 to 2015*. Bulletin No. 172.
- [3] PLA | Prusa Knowledge Base [online]. In: . [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/pla_2062#_ga=2.44870882.776335977.1680620533-992079698.1677194102
- [4] KOLÁŘ, Václav, Cyril PATOČKA a Jiří BÉM. *Hydraulika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [5] OUHEL, Jan a Libor PĚKNÝ. *VODOHOSPODÁŘSKÝ ROZVOJ A VÝSTAVBA, A.S. Rekonstrukce malé vodní nádrže Milikov: B.1. Souhrnná technická zpráva*. Praha, 2022 [cit. 11.5.2023].
- [6] NĚMČANSKÝ, Ondřej. *Studie proveditelnosti VD Kryry na Podvineckém potoce*. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky.

PŘÍLOHA A – TYP VS1

A.1 Zkosené hrany přelivné hrany



*Obr. A.1.1: Pohled na model
po směru proudění*



Obr. A.1.2: Pohled na přepad – $Q = 5$ l/s



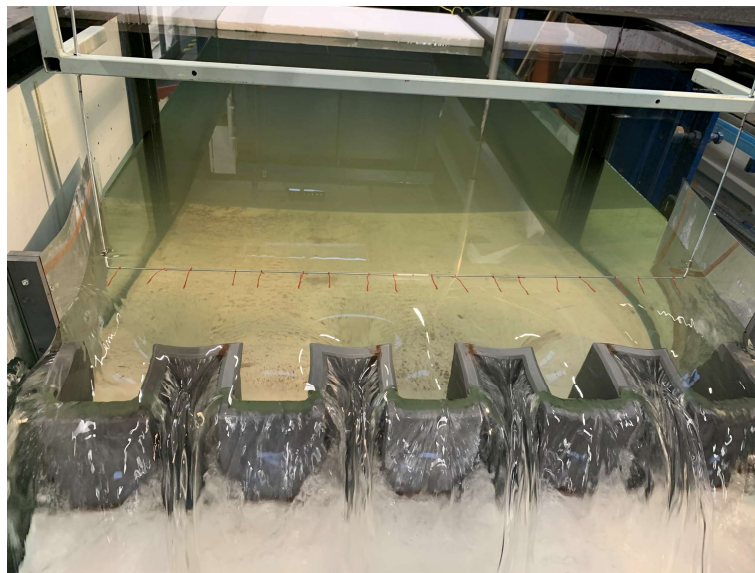
Obr. A.1.3: Směr proudnic pro $Q = 5$ l/s, 2. vodorovná poloha, 3. svislá poloha



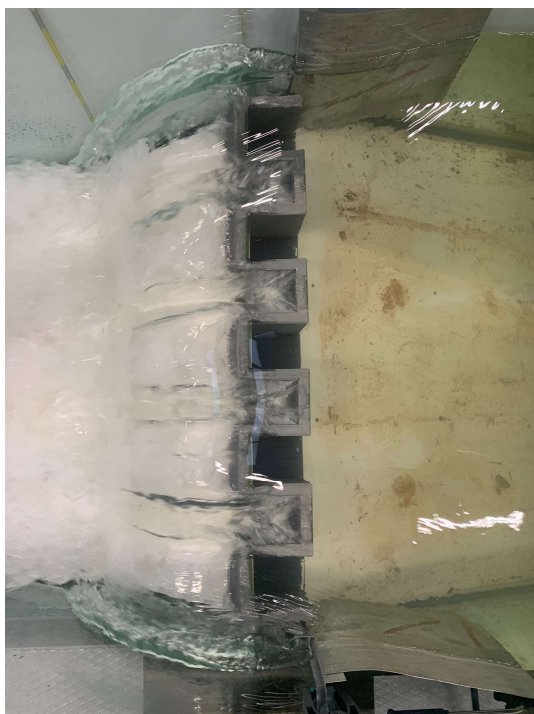
Obr. A.1.4: Směr proudnic pro $Q = 45$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. A.1.5: Směr proudnic pro $Q = 90$ l/s, 2. vodorovná poloha, 5. svislá poloha



Obr. A.1.6: Pohled na přeliv, $Q = 45$ l/s



Obr. A.1.7: Pohled shora, $Q = 150$ l/s



Obr. A.1.8: Pohled do přepadu, $Q = 150$ l/s



Obr A.1.9: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s

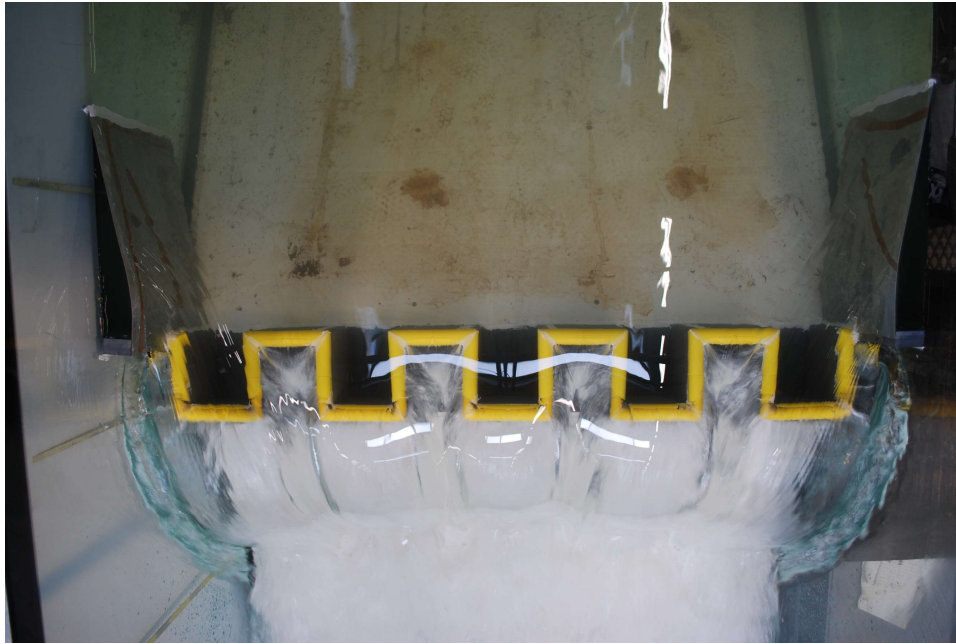
A.2 Válcová přelivná plocha



Obr. A.2.1: Pohled na model po směru proudění



Obr. A.2.2: Pohled na přeliv, $Q = 45$ l/s



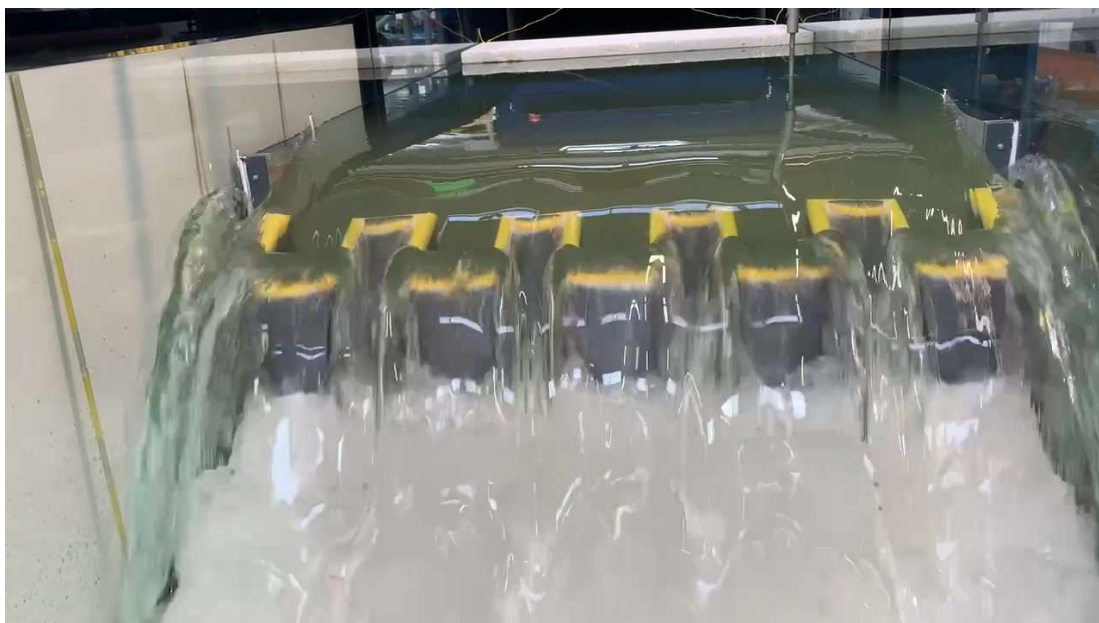
Obr. A.2.3: Pohled shora, $Q = 120$ l/s



Obr. A.2.4: Pohled do přepadu, $Q = 5$ l/s



Obr. A.2.5: Pohled do přepadu, $Q = 12$ l/s

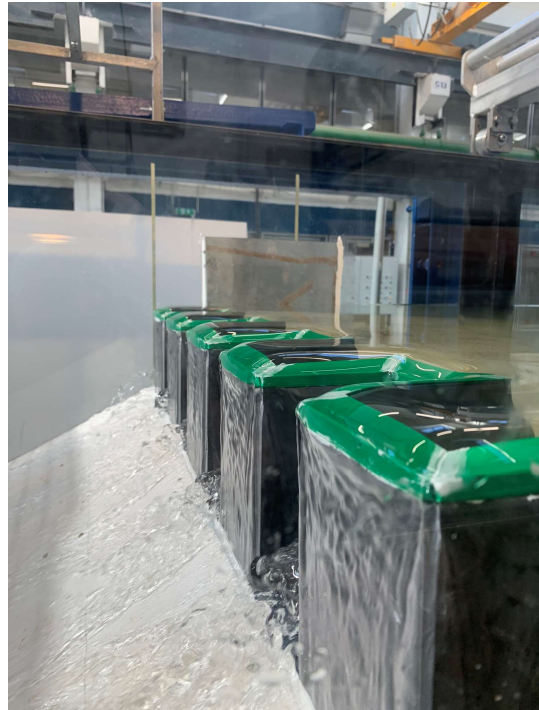


Obr A.2.6: Pohled na přepad, $Q = 120$ l/s

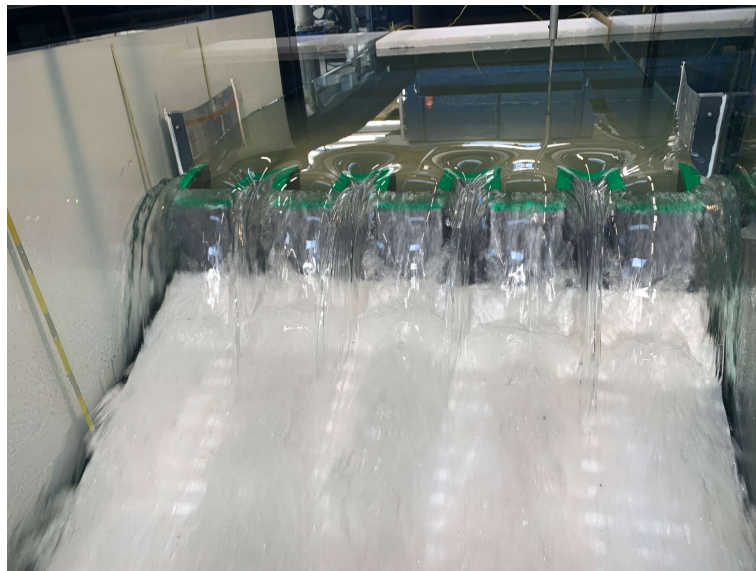
A.3 Pravoúhlé provedení přelivné hrany



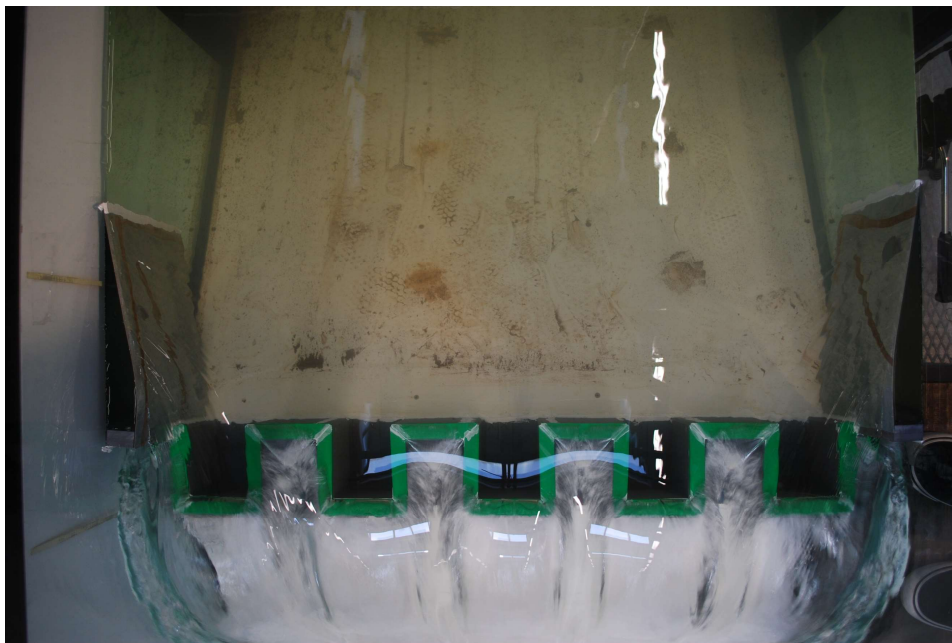
*Obr. A.3.1: Pohled na model
po směru proudění*



Obr. A.3.2: Pohled na přeřad – $Q = 5$ l/s



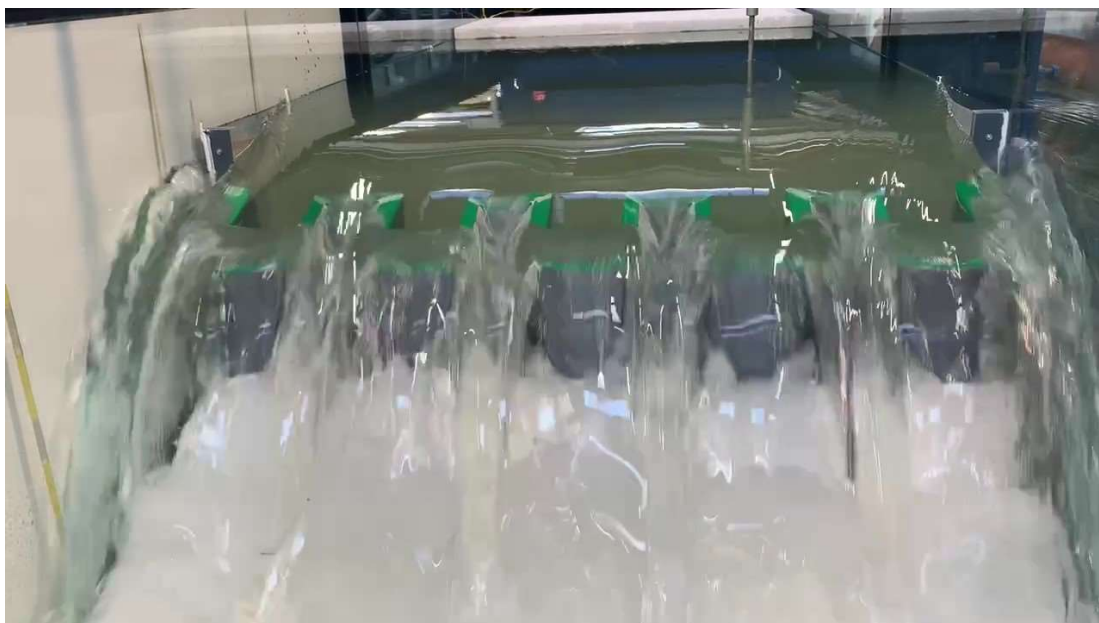
Obr. A.3.3: Pohled na přeliv, $Q = 40$ l/s



Obr. A.3.4: Pohled shora, $Q = 120$ l/s



Obr. A.3.5: Pohled do přepadu, $Q = 120$ l/s



Obr. A.3.6: Pohled na přepad, $Q = 120$ l/s

PŘÍLOHA B – TYP VS2



*Obr. B.1: Pohled na model
po směru proudění*



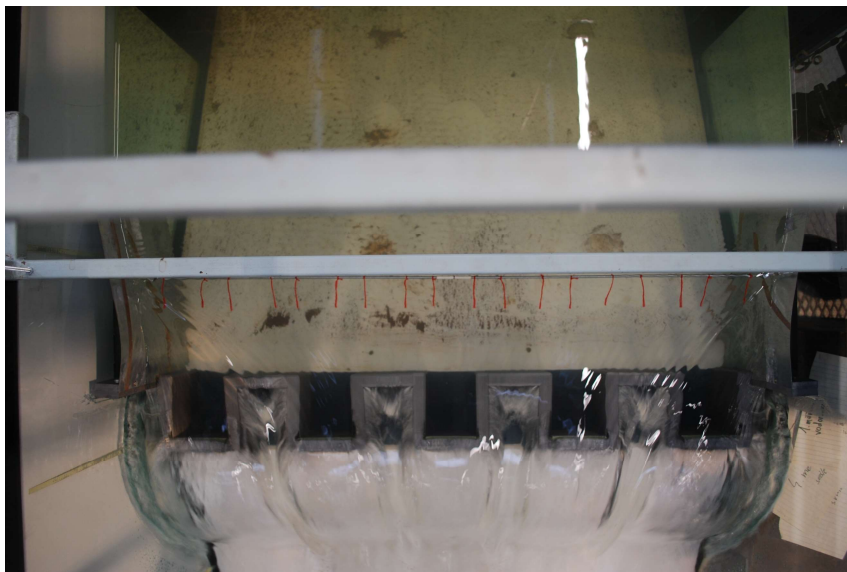
Obr. B.2: Pohled na přepad – $Q = 5 \text{ l/s}$



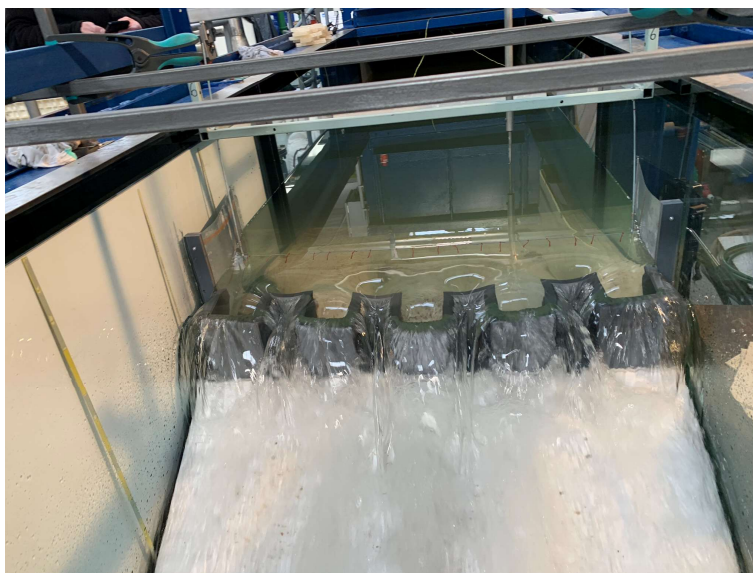
Obr. B.3: Směr proudnic pro $Q = 5 \text{ l/s}$, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. B.4: Směr proudnic pro $Q = 45$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. B.5: Směr proudnic pro $Q = 90$ l/s, 2. vodorovná poloha, 5. svislá poloha



Obr. B.6: Pohled na přeliv, $Q = 40$ l/s



Obr. B.7: Pohled shora, $Q = 150$ l/s



Obr. B.8: Pohled do přepadu, $Q = 150$ l/s



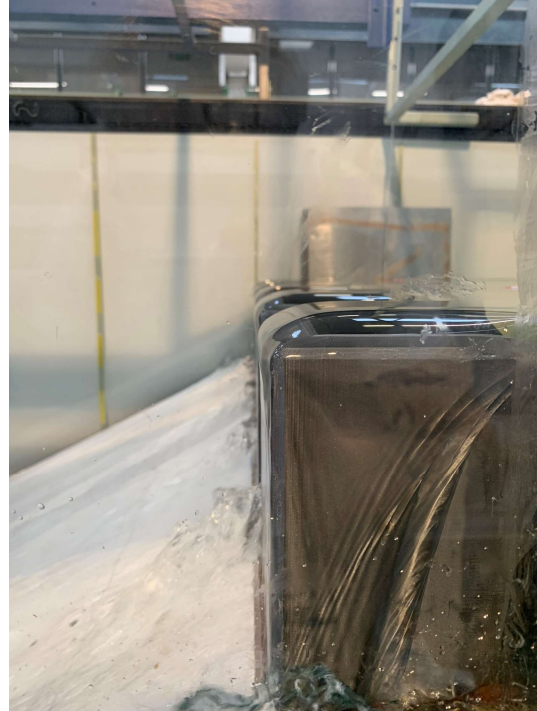
Obr B.9: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s

PŘÍLOHA C – TYP VS3

C.1 Varianta I.



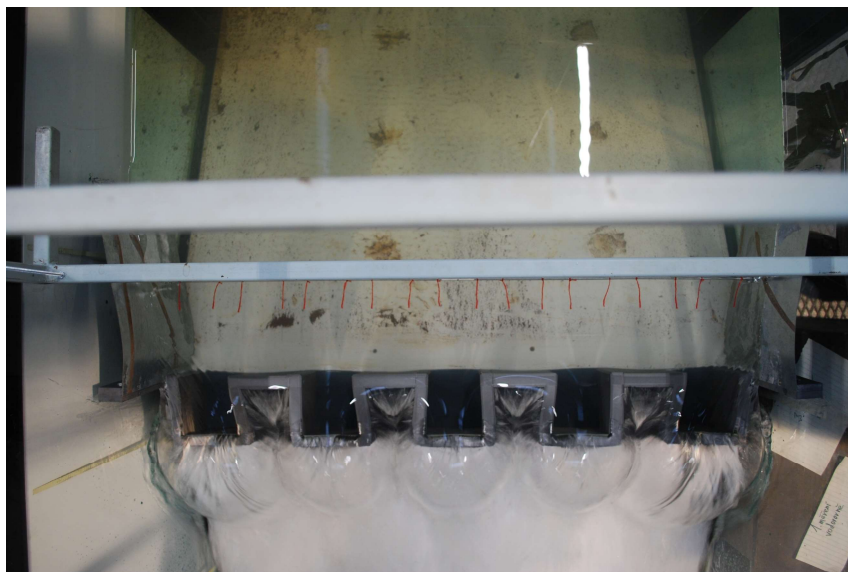
*Obr. C.1.1: Pohled na model
po směru proudění*



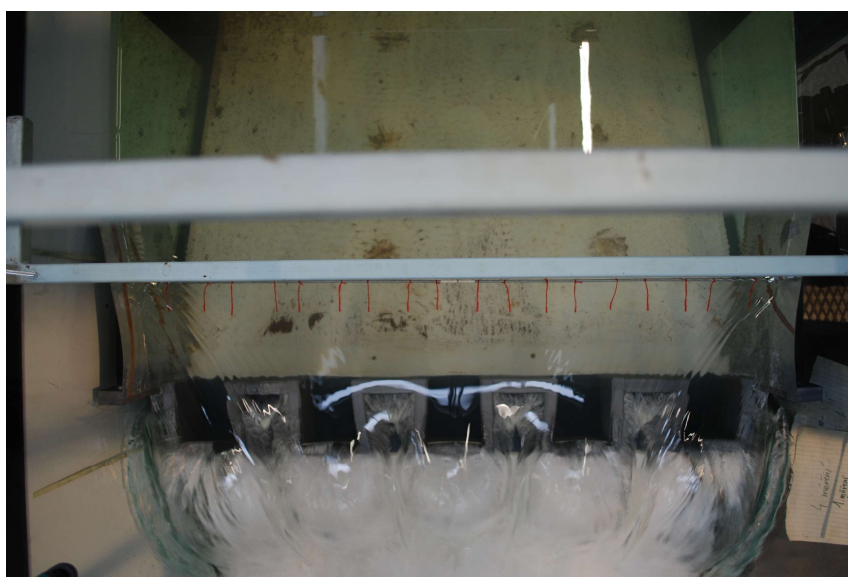
Obr. C.1.2: Pohled na přepad – $Q = 10$ l/s



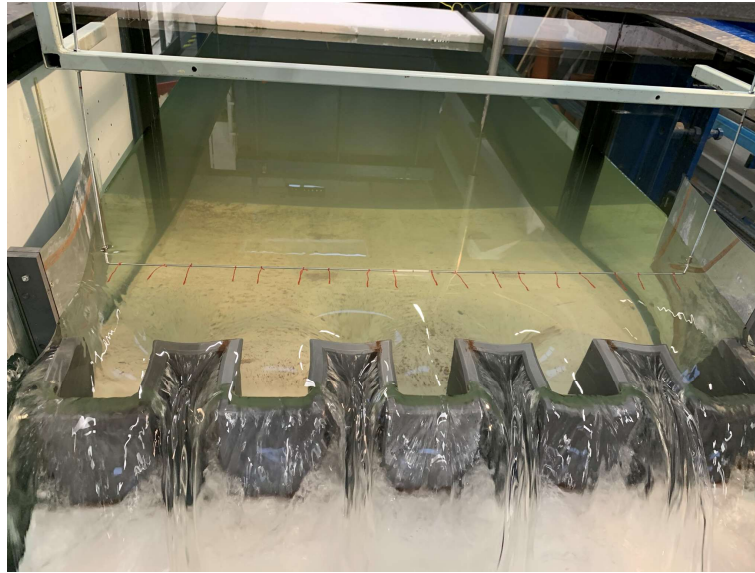
Obr. C.1.3: Směr proudnic pro $Q = 5$ l/s, 2. vodorovná poloha, 3. svislá poloha



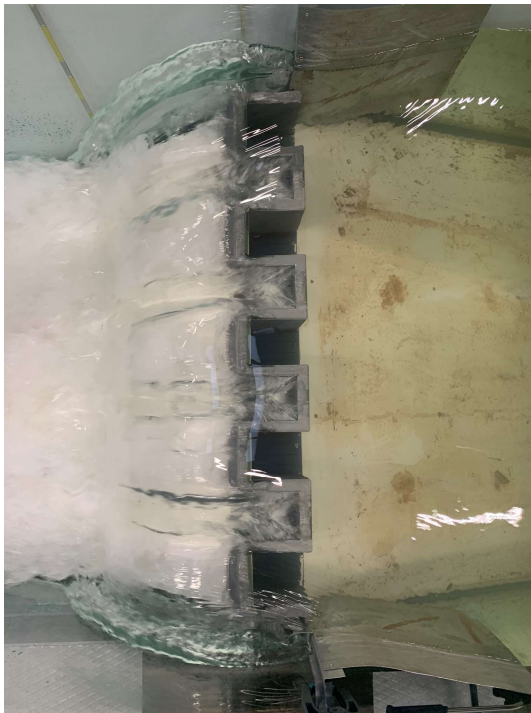
Obr. C.1.4: Směr proudnic pro $Q = 45$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. C.1.5: Směr proudnic pro $Q = 90$ l/s, 2. vodorovná poloha, 5. svislá poloha



Obr. C.1.6: Pohled na přeliv, $Q = 45$ l/s



Obr. C.1.7: Pohled shora, $Q = 150$ l/s

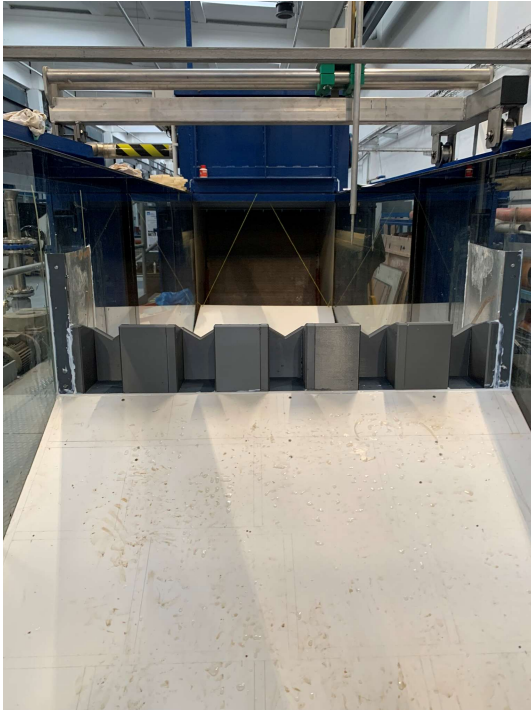


Obr. C.1.8: Pohled do přepadu, $Q = 150$ l/s



Obr. C.1.9: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s

C.2 Varianta II.



Obr. C.2.1: Pohled na model proti směru proudění



Obr. C.2.2: Pohled na přepad – $Q = 5 \text{ l/s}$



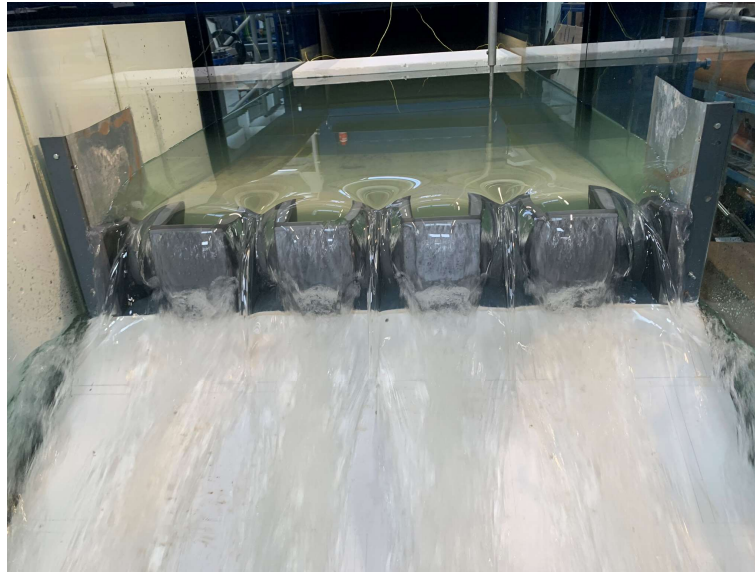
Obr. C.2.3: Směr proudnic pro $Q = 5 \text{ l/s}$, 2. vodorovná poloha, 3. svislá poloha



Obr. C.2.4: Směr proudnic pro $Q = 45$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



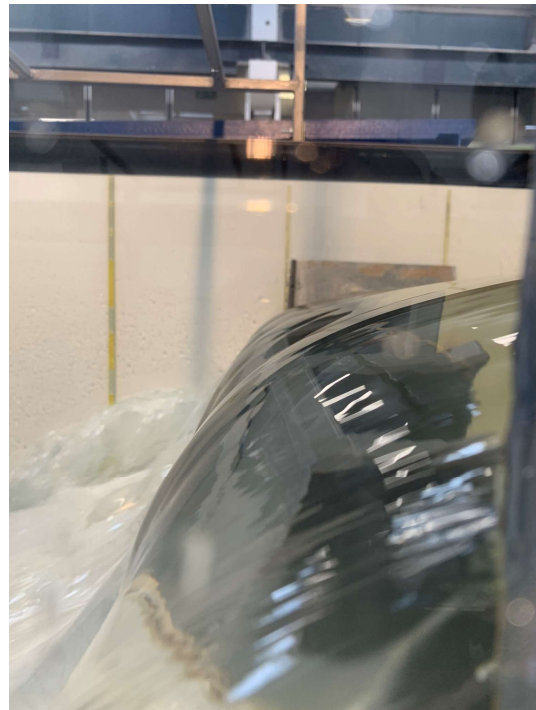
Obr. C.2.5: Směr proudnic pro $Q = 90$ l/s, 2. vodorovná poloha, 5. svislá poloha



Obr. C.2.6: Pohled na přeliv, $Q = 35$ l/s



Obr. C.2.7: Pohled shora, $Q = 150$ l/s



Obr. C.2.8: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s



Obr. C.2.9: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s

PŘÍLOHA D – TYP VS4



*Obr. D.1: Pohled na model
po směru proudění*



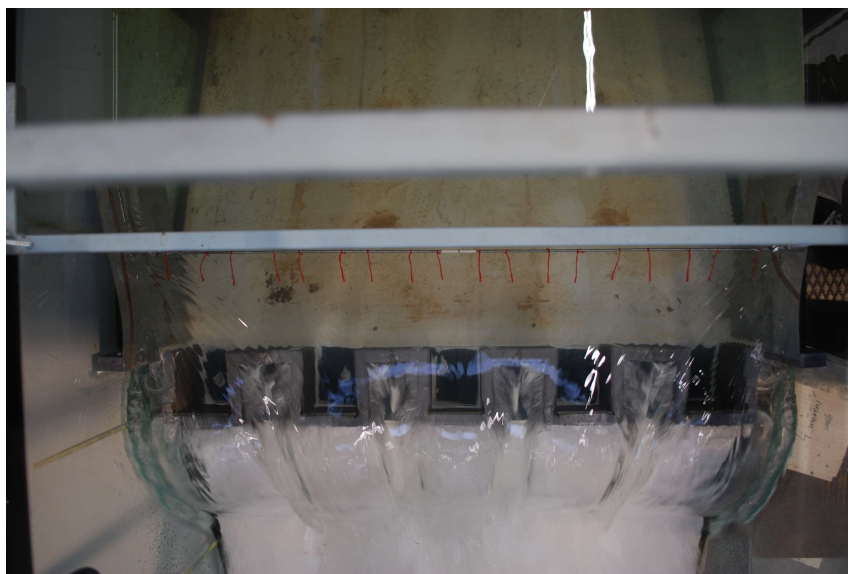
Obr. D.2: Pohled na přepad – $Q = 25$ l/s



Obr. D.3: Směr proudnic pro $Q = 5$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. D.4: Směr proudnic pro $Q = 45$ l/s, 2. vodorovná poloha, 4. svislá poloha



Obr. D.5: Směr proudnic pro $Q = 90$ l/s, 2. vodorovná poloha, 5. svislá poloha



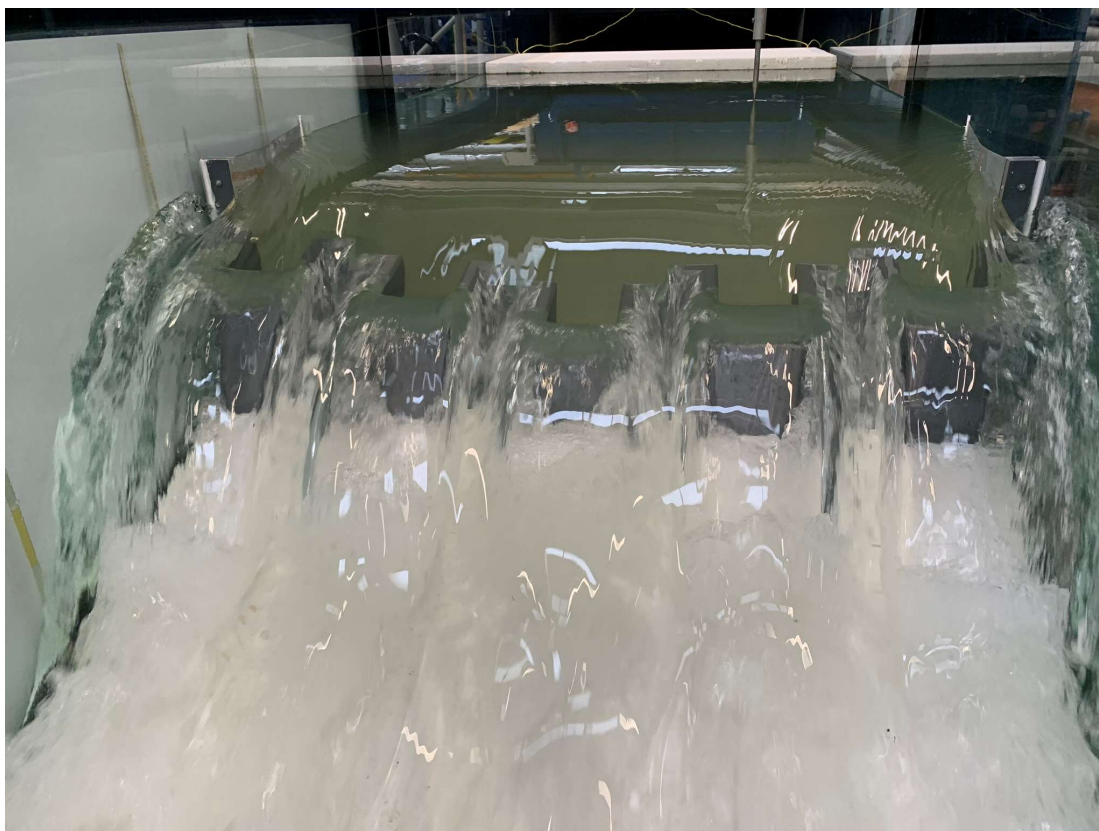
Obr. D.6: Pohled na přeliv, $Q = 45 \text{ l/s}$



Obr. D.7: Pohled shora, $Q = 150 \text{ l/s}$



Obr. D.8: Pohled do přepadu, $Q = 150 \text{ l/s}$



Obr. D.9: Pohled na přepad, $Q = 150$ l/s