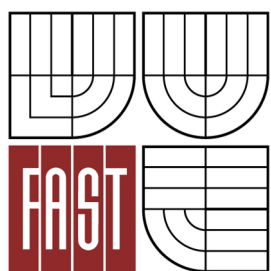




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

SILOVÉ ÚČINKY PROUDU S VOLNOU HLADINOU NA USMĚRŇOVACÍ PRVEK

EFFECT OF FREE SURFACE FLOW FORCES ON THE RECTIFYING ELEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

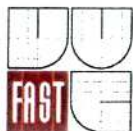
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAN HÖLL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. JAN HÖLL

Název Silové účinky proudu s volnou hladinou na usměrňovací prvek

Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2013

Datum odevzdání diplomové práce 17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Čábelka, J.; Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. ACADEMIA Praha, 1987.
- Šulc, J.; Žoužela, M.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice. Výzkumná zpráva, LVV ÚVS FAST VUT v Brně, 2013.
- Šulc, J.; Žoužela, M.; Mišta, Z.: Hydrotechnický výzkum kapacity skluzu a bezpečnostního přelivu VD Dalešice a možnosti jejího zvýšení. Sborník příspěvků z konference HYDROTURBO 2010, STU v Bratislave, 2010, str. 165 - 174, ISBN 978-80-227-3363-2.
- Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968.
- Šulc, J.; Žoužela, M.: Hydraulický modelový výzkum kapacity přelivu a skluzu se zvýšenými bočními stěnami VD Dalešice. Výzkumná zpráva, LVV-UVS-FAST VUT v Brně, 2009.
- Šulc, J.: Shaping the outflow jet of tainter gates and hollow cone valves directed into water tunnels. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 29, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2005, str. 45 - 54, ISSN 0949-5061.
- Haindl K., Lískovec L., 1973: Nadkritické proudění ve vodním stavitelství. VÚVH v Praze. Sešit č. 132. 1973.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Student na hydraulickém modelu v laboratoři ÚVS změří statické a dynamické zatížení prvku způsobené usměrněním nadkritického proudu s výraznými příčnými vlnami. Po následném zpracování měření definuje výslednou sílu v závislosti na rychlosti, hloubce a změně (odklonu) směru proudu. Výstupem budou podklady pro dimenzování usměrňovacích prvků použitelných ve spadištích přelivů, korytech skluzů a štolách spodních výpustí vodohospodářských děl.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá zkoumáním silových účinků proudu na usměrňovací prvek a skládá se z několika částí. První část zpracovává a vyhodnocuje naměřené údaje z fyzikálního modelu. V další části je měření ověřováno podle zákonů hydrauliky. Ve třetí, poslední části, dochází ke srovnání obou postupů a návrhu vhodné výpočtové metodiky.

Klíčová slova: fyzikální model, usměrňovač, silový účinek, Froudovo kritérium

Abstract: This diploma thesis deals with the research of the effect of free surface flow forces on the rectifying element and consists of several parts. The first part processes and evaluates the measured values from a physical model. In the next part measurement is checked according to hydraulic laws. In the third part comparison of both methods is created.

Keywords: physical model, rectifying element, strength effect, Froude criterion

Bibliografická citace VŠKP

HÖLL, Jan. *Silové účinky proudu s volnou hladinou na usměrňovací prvek*. Brno, 2013. 83 s., 71 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 1. 2014

.....

podpis autora

Poděkování

Za cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D a dále prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc.

Taktéž chci poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. TEORETICKÉ PODKLADY	11
2.1. STANOVENÍ CÍLE EXPERIMENTU	12
2.2. PŘÍKLADY ŘEŠENÍ	13
2.2.1. VD Těrlicko	13
2.2.2. VD Karolinka	15
2.2.3. VD Boskovice.....	17
2.2.4. VD Souš	19
2.2.5. VD Dalešice.....	21
2.3. NADKRITICKÉ (BYSTRINNÉ) PROUDĚNÍ.....	23
2.4. PODOBNOSTNÍ MĚŘÍTKA V HYDRAULICKÉM MODELOVÁNÍ.....	25
2.4.1. Geometrická podobnost.....	25
2.4.2. Kinematická podobnost.....	25
2.4.3. Dynamická podobnost.....	26
2.5. PŘÍČNÉ VLNY	28
2.6. MOŽNOSTI STANOVENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ PROUDU	29
3. INFORMACE K EXPERIMENTU	31
3.1. DEFINOVÁNÍ PROBLÉMU A POŽADAVKY	31
3.2. MODELOVANÉ STAVY.....	31
3.3. OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY MODELOVÉ PODOBNOSTI	31
3.4. ZKUŠEBNÍ HYDRAULICKÝ MODEL	33
3.5. MĚRNÁ TRAŤ	36
3.6. MĚŘÍCÍ TECHNIKA	38
3.6.1. Hloubka proudu	38
3.6.2. Účinky sil	38
3.6.3. Měření průtoku	40
3.6.4. Měření délek	40
4. POSTUP EXPERIMENTU	41
4.1. KALIBRACE MODELU	41
4.2. VERTIKÁLNÍ A HORIZONTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	43
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	45
5.1. VERTIKÁLNÍ DEFLEKTOR	45
5.1.1. Ověření navrhnutého postupu.....	46
5.1.2. Vlastnosti působících sil při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$	48
5.1.3. Vlastnosti působících sil při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$	50
5.1.4. Vlastnosti působících sil při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$	52

5.1.5.	Vlastnosti působících sil při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$	54
5.1.6.	Vyhodnocení.....	56
5.2.	HORIZONTÁLNÍ DEFLEKTOR.....	58
5.2.1.	Průběh experimentu	59
5.2.2.	Vyhodnocení.....	62
6.	VÝPOČET S VYUŽITÍM ZÁKONŮ HYDRAULIKY.....	64
6.1.	HYDRAULICKÉ PODKLADY.....	64
6.1.1.	Impulsová věta.....	64
6.1.2.	Tlak v kapalině	65
6.2.	VÝPOČET – VERTIKÁLNÍ DEFLEKTOR.....	66
6.3.	VÝPOČET – HORIZONTÁLNÍ DEFLEKTOR	68
7.	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	70
7.1.	DIMENZOVÁNÍ VERTIKÁLNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	70
7.2.	DIMENZOVÁNÍ HORIZONTÁLNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	72
7.3.	DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ APLIKACE PŘI STANOVENÍ ZATÍŽENÍ USMĚRŇOVACÍCH PRVKŮ	74
8.	ZÁVĚR.....	75
9.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	76
10.	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	77
11.	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
12.	SEZNAM TABULEK.....	80
13.	SEZNAM PŘÍLOH	81

1. Úvod

Současná doba je charakteristická významnými klimatickými změnami. Na ně navazují hydrologické extrémy, které z velké části nepříznivě ovlivňují činnost člověka. Nebezpečí vycházející z těchto extrémů lze poměrně efektivně snižovat budováním vhodných staveb na vodních tocích. Tyto stavby dokáží nejen vodu zadržovat, ale umí s ní i nakládat ve prospěch člověka, ať už se jedná o výrobu elektrické energie či zásobování pitnou vodou.

Z hlediska bezpečnosti objektů na vodních tocích a v jejich okolí je nutné věnovat zvýšenou pozornost převádění povodňových vln. Z minulosti připomeňme roky 1996, 1997, 2002 a 2006, které se zapsaly do dějin České republiky a střední Evropy právě nečekaně velkými povodněmi. Tyto si vynutily pozornost hydrologů a zpřísnění časových řad průtoků.

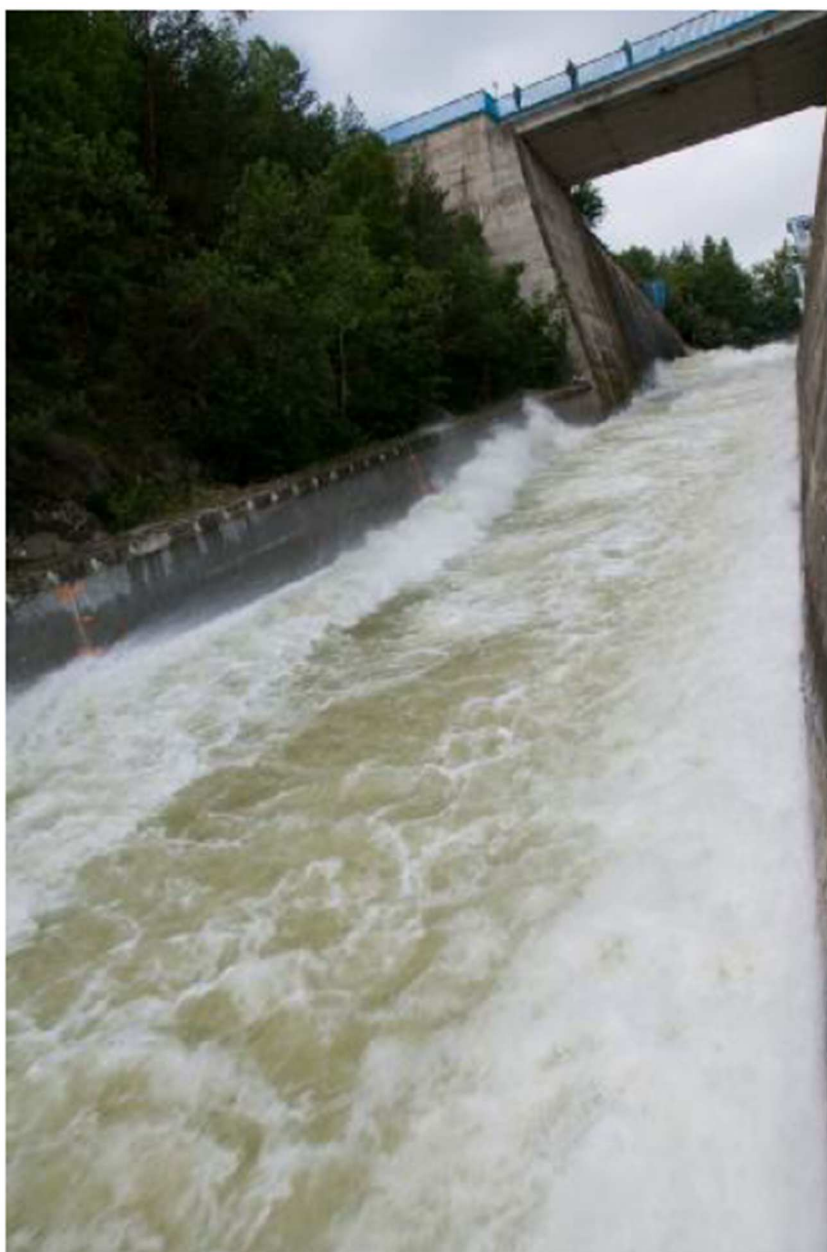
Současná legislativa zvyšuje požadavky v případech většiny vodních děl na hodnoty návrhových průtoků a průtoků převáděných objekty při kontrolních povodních. Na řadě významných děl musí bezpečnostní přelivy převést vlastním vodním dílem transformovanou povodňovou vlnu s dobou opakování $N = 10\,000$ let. To v některých případech vyvolává nutnost zvýšit kapacitu bezpečnostního objektu v porovnání s původními navrhovanými parametry až 3x. Tento požadavek vyvolává úpravy tvarů objektů i změnu manipulačních řádů vodních děl [1].

V návaznosti na tento fakt probíhají nebo se plánují stavební úpravy bezpečnostních prvků vodních děl. S tím souvisí i jejich navrhování na těchto objektech, které mají za cíl v rozumné míře nezvedat náklady na stavební úpravu, ale zároveň napomoci bezpečnému převádění návrhových průtoků.

Cílem této práce je zjednodušující metodika pro dimenzování usměrňujících prvků proudu na vodohospodářských objektech, které byly do této doby konstruovány na základě hydraulického modelování.

2. Teoretické podklady

V praxi se usměrňující prvky používají nejčastěji ke změně směru proudu, zamezení výběhu vln na stavební konstrukci, která jím může být soustavně poškozována, či k zamezení tvorby příčných vln v částech bezpečnostních přelivů a na ně navazujících skluzů. Jedná se o opatření s poměrně nízkými náklady (v porovnání s rozsáhlými stavebními úpravami), které ale dokáží účinně zamezovat vzniku nežádoucích stavů na objektech vodních děl. Tato opatření mohou být představována horizontálním deflektorem či usměrňovacím pilířem. Tyto jsou převážně umístovány v místě bezpečnostních přelivů, skluzů případně odpadních štol spodních výpustí tedy tam, kde je očekáván vznik nadkritického režimu proudění.



Obrázek 1 - Proudové poměry na skluzu VD Dalešice [2]

2.1. Stanovení cíle experimentu

Při návrhu opatření (ať už usměrňovacího pilíře nebo horizontálního deflektoru) se vychází z určitých silových účinků usměrňovaného proudu vody. Návrhové parametry (délka, tloušťka, sklon, umístění) jednotlivých prvků musely být v minulosti zkoumány na hydraulickém modelu a z výsledků experimentu byly vyvozovány vlastnosti tak, aby účinek opatření byl co možná nejlepší (viz Kapitola 2.6).

Je tedy na místě vytvořit zpřesňující metodiku přepočtu silových účinků proudu pomocí hydraulických zákonů a tzv. korekčního koeficientu. Cílem není vyloučení modelového výzkumu, nýbrž zpřesnění výpočtu zátěže usměrňovacích prvků navržených při jeho provádění.

V zásadě je třeba řešit tři situace. V první změřit účinky proudu na hydraulickém modelu, v druhé definovat postup použití empirických vztahů. V posledním kroku je třeba oba postupy porovnat a určit koeficient přepočtu mezi nimi. Pomocí určeného postupu a korekčního koeficientu pak bude možné, s určitými omezeními, počítat zatížení bezpečnostních prvků od vodního proudu a navrhnout tak samotnou konstrukci.



Obrázek 2 - Použití horizontálního deflektoru ve štole spodních výpustí VD Souš [3]

2.2. Příklady řešení

V posledních několika letech samozřejmě docházelo k pokusům v oblasti usměrnění kritického proudu, a to zejména v laboratořích vodohospodářského výzkumu na Fakultě stavební, Vysokého učení technického v Brně. Jednalo se o řešení pomocí hydraulického modelování, a tak některá modelovaná opatření jsou úspěšně instalována na vodních dílech a spolehlivě tak plní jejich funkci (viz VD Souš).

2.2.1. VD Těrlicko

Pro vodní dílo Těrlicko byl řešen výzkum úpravy skluzu pro převádění zvýšených povodňových průtoků v listopadu 2006. Dílo, jež bylo do provozu uvedeno v roce 1963, se nachází na řece Stonávce u obce Těrlicko v Moravskoslezském kraji. Zvýšení kapacity bezpečnostního přelivu VD v souladu se současnou legislativou bylo součástí rekonstrukce objektu. Pro posouzení možnosti zvýšení kapacity byla vypracována studie, která sleduje účinky transformace povodňové vlny (PV) s dobou opakování $N = 1000$ a $N = 10\,000$ let.

Z požadavků na výzkum vyplynulo, že dostupný matematický model nepostihuje velmi komplikované proudové podmínky na výstupu ze spadiště do skluzu, neumožňuje simulaci příčných vln v nadkritickém proudu a nepočítá s reálným vlivem provzdušnění. Bylo tak v podstatě rozhodnuto o realizaci modelového výzkumu skluzu.

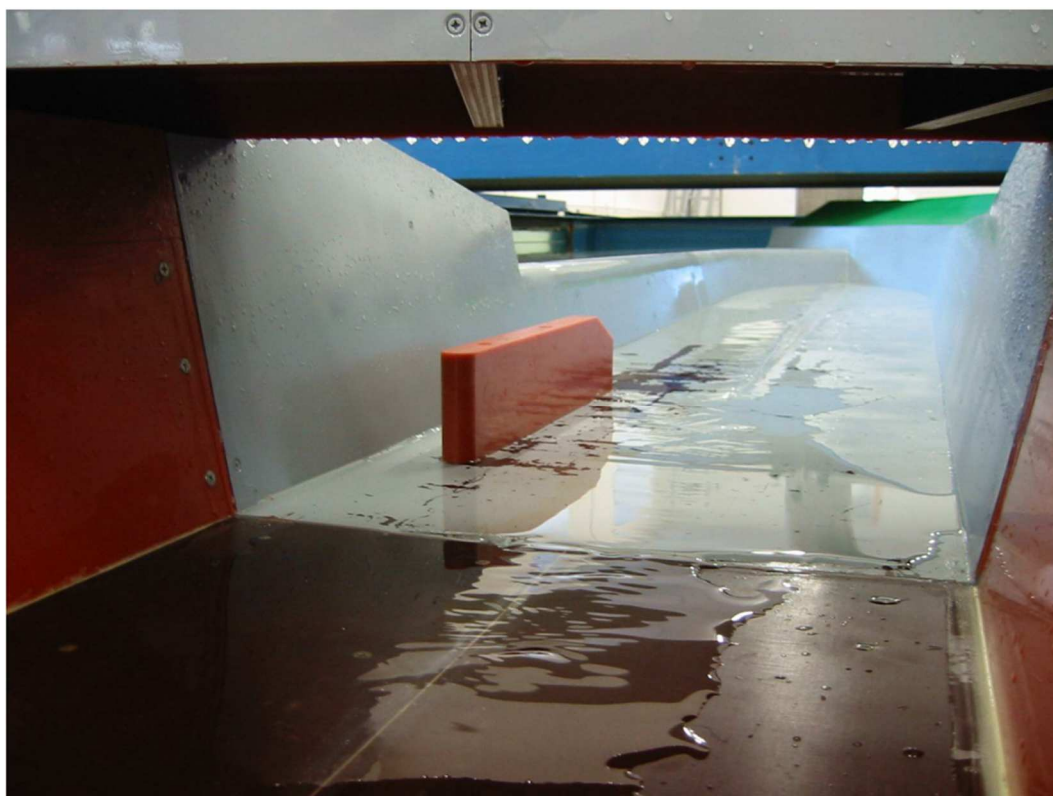
Na modelu byl pozorován výrazný vznik příčných vln, které měly tendenci vybíhat na stěny skluzu. Cílem tedy bylo, mimo jiné, snížení úrovně výběhu příčných vln na boční stěny skluzu a homogenizace proudu s cílem dosáhnout ideální pravolevé symetrie hladiny.

Pro dosažení určených cílů byly voleny usměrňovací prvky umístitelné do prostoru spadiště bez nutnosti úpravy stávající konstrukce. Kritériem pro výběr prvků byla snadná proveditelnost, rozměrová minimalizace a ekonomické hledisko.

Nakonec byla po sérii několika experimentů vyhodnocena optimální varianta usměrňovacího prvku – pilíře (délky 10 m), pomocí kterého bylo dosaženo výrazného útlumu vzniku příčných vln [4].



Obrázek 3 - Protiproudňý pohled na hladinové poměry na začátku modelu skluzu [4]



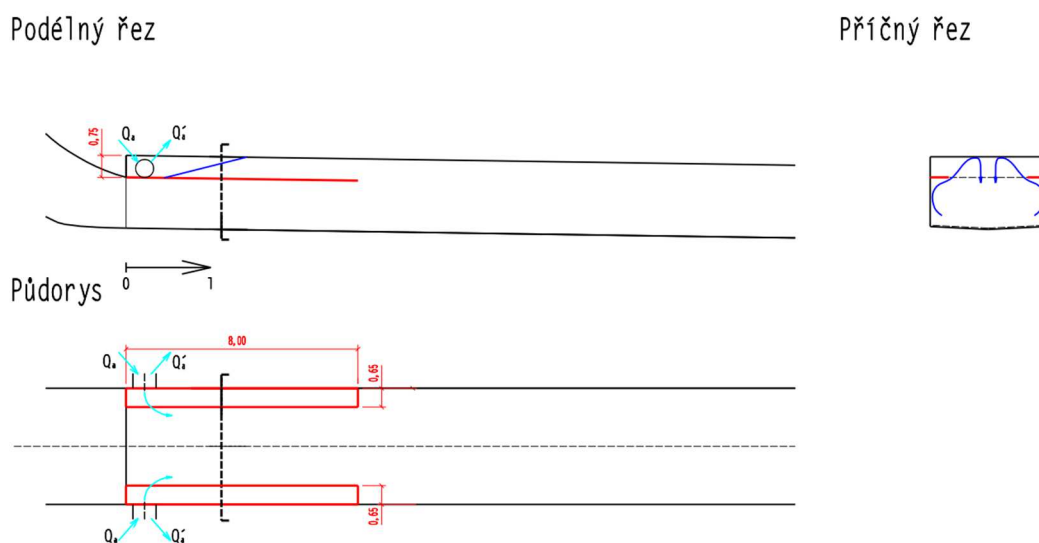
Obrázek 4 - Protiproudňý pohled na usměrňovací pilíř doporučeného tvaru a pozice [4]

2.2.2. VD Karolinka

Vodní dílo Karolinka bylo uvedeno do provozu v roce 1985. Jeho hlavní účel je zásobování vodou oblasti Vsetínska a Vlárská. Dílo zlepšuje průtoky ve vodním toku Stanovnice, vybudováním malé vodní elektrárny (MVE) v prostoru strojovny spodních výpusť je využíváno i energeticky. Důležitým účelem díla je snížení povodňových průtoků na vodním toku. Předmětem modelového výzkumu bylo v souladu se současnou legislativou zvýšení kapacity bezpečnostního přelivu a odpadní štoly.

Vzhledem ke komplikovaným proudovým poměrům v počátečním úseku odpadní štoly bylo značně složité nalézt optimální úpravu z hlediska tvarového i ekonomického případně stavebního. Vzhledem ke stavu stropu štoly byla snaha snížit jeho zatížení hydrodynamickým účinkem proudu respektive usměrnit proud tak, aby k obtékání stropu nedocházelo. K tomuto účelu byly využívány zejména usměrňovače rovinných tvarů, jejichž účelem bylo usměrnit proud tak, aby nedocházelo k výstřikům po úroveň stropu a následného zahlcení celého průtočného průřezu [5].

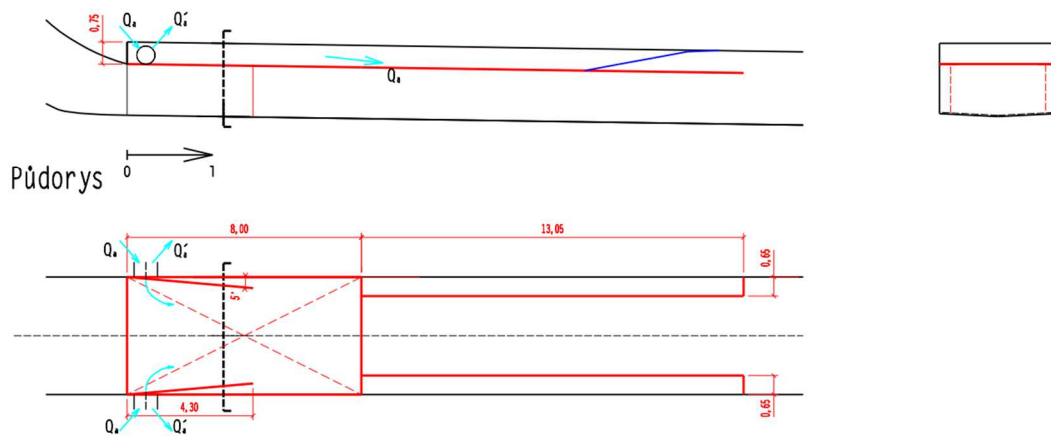
Z výsledku modelového experimentu byla nakonec doporučena stavební úprava ve formě sníženého stropu v kombinaci se zavzdušňovacím potrubím.



Obrázek 5 - Jedna ze zkoušených variant úprav proudových poměrů [5]

Podélný řez

Příčný řez



Obrázek 6 - Kombinace vertikálních odchylovačů a horizontálních deflektorů [5]



Obrázek 7 - Hydraulický model odpadní štolý VD Karolinka [5]

2.2.3. VD Boskovice

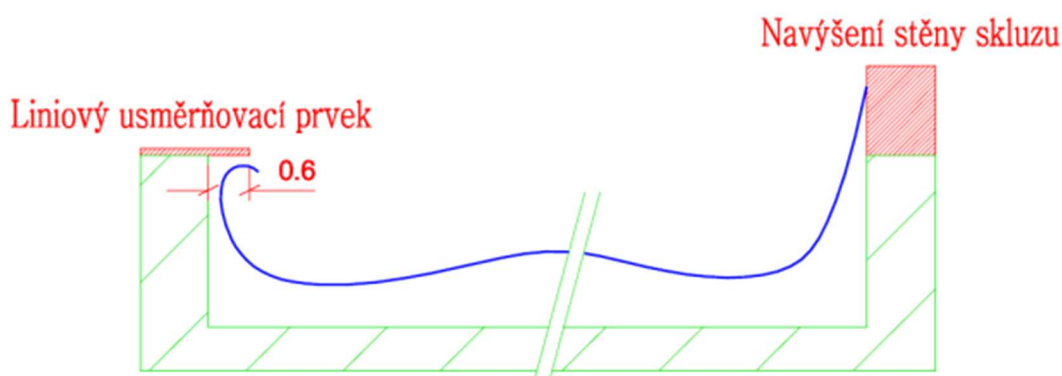
Původním účelem VD bylo vodárenské využití. Dnes slouží převážně k nalepšení průtoků v říčce Bělé, k výrobě elektrické energie a ke snížení povodňových průtoků. Přehradní profil se nachází v místě vzdáleném asi 7 km od soutoku Bělé s řekou Svitavou, v úzkém a hlubokém údolí u Vratíkova.

Návrhový průtok pro stávající bezpečnostní objekt (přeliv, skluz a vývar) vycházel z transformace návrhové povodně, která měla dobu opakování $N = 100$ let. Současně platná norma však pro vodní dílo II. Kategorie udává dobu opakování návrhového průtoků $N = 1000$ let. Tento nesoulad požadované kapacity bezpečnostního objektu se současnou legislativou je jedním z rozhodujících důvodů jeho rekonstrukce. Jelikož se jedná o značně rozsáhlou rekonstrukci s dopadem na průtokové poměry ve více objektech, bylo tak dohodnuto provedení hydraulického modelového výzkumu rekonstruovaného bezpečnostního objektu.

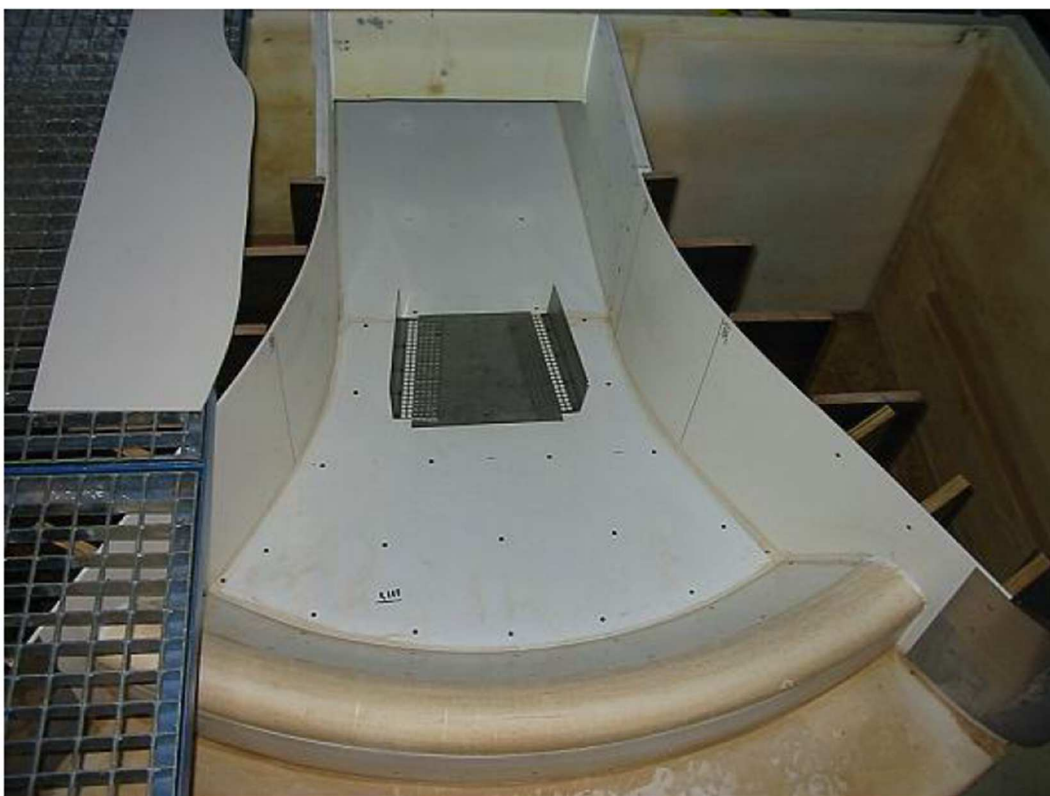
Účelem modelových zkoušek bylo posoudit charakter proudění v předpolí přelivu a ve spadišti a případně navrhnout ve spadišti liniové usměrňovače (usměrňovací křídla) nebo žebra, které by tak zajistily co možná největší uklidnění vodního proudu. Z důvodu potlačení vzniku příčných vln byly prováděny systematické zkoušky úprav proudění [6].

V prostoru spadiště bylo potvrzeno očekávatelné vybřežení proudu z koryta nad úroveň projektovaných bočních stěn. Výsledkem zkoušek bylo zjištění, že při usměrnění pomocí dnových deflektorů dochází k relativně malému snížení maxima výstupu příčných vln na skluzu. Na základě těchto poznatků tak nebyla doporučena jejich instalace na VD.

Pro eliminaci jevů pozorovaných na skluzu (výběh vlny nad stěny) bylo doporučeno jejich navýšení nebo vybavení liniovými usměrňovači [6].



Obrázek 8 - Schéma úpravy stěn skluzu pro zamezení vybřežení proudu [6]



Obrázek 9 - Nastavitelný usměrňovací prvek do prostoru dna spadiště [6]



Obrázek 10 - Usměrnění maximálního výstupu příčné vlny na stěně modelu skluzu [6]

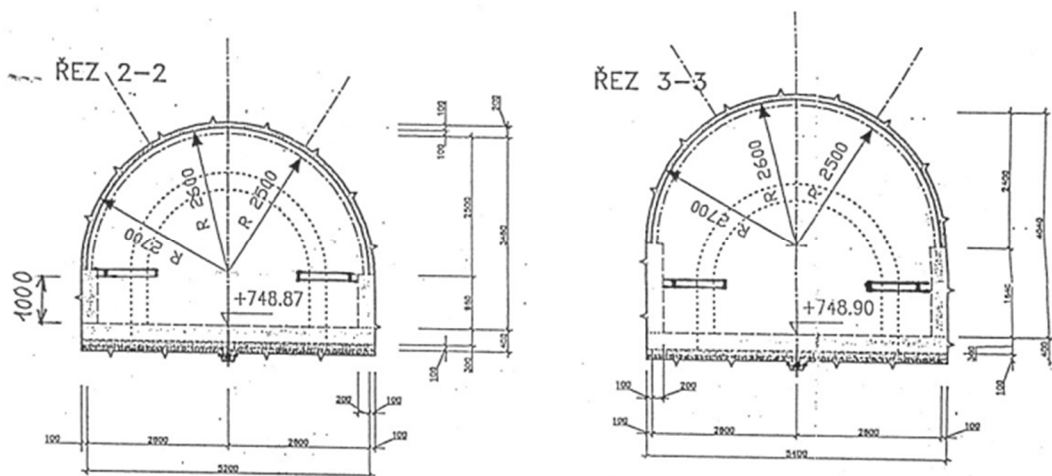
2.2.4. VD Souš

V rámci opravy a rekonstrukce vodního díla Souš na Černé Desné bylo navrženo doplnění stávajících dvou spodních výpustí segmentovými koncovými provozními regulačními uzávěry. Z kapacitního hlediska bylo potřeba prověřit nově navrhované úpravy při charakteristických polohách hladiny v nádrži a úplném otevření všech uzávěrů spodních výpustí. Za výpustmi následuje proud s vysoce nadkritickým režimem, doprovázený vznikem poproudě se po hladině šířících příčných vln. Volný povrch proudu vytékající z uzávěrů má vysokou schopnost pohlcovat vzduch vlivem příčné turbulence. Při promísení se vzduchem a při účinku příčné složky proudu vzniká vedle provzdušněného proudu i vodní tříšť.

Právě vodní tříšť u stropní části štolý může být příčinou ucpání prostoru s následným vznikem tlakových a průtokových pulzací. Bylo tedy potřebné pro všechny provozní kombinace zajistit usměrnění proudu tak, aby odtok štolou byl bezpečný a spolehlivý při využití proudění o volné hladině.

Proudové poměry v komoře uzávěrů i navazující části štolý prokázaly náchylnost zahlcení vodní tříští při vyšších průtocích, příčinou byly výstřiky proudu odraženého po dopadu paprsků od dna a svislých stěn, případně výstřiku vzájemně se střetávajících proudů ve střední části komory.

Výstup proudu a vodní tříšť byl na základě experimentu omezen či úplně odstraněn instalací usměrňovacích trámců vedených rovnoběžně se dnem štolý. Dostatečné a spolehlivé omezení bylo shledáno na modelu při použití šířky trámců 200 mm [3].



Obrázek 11 - Úprava komory usměrňovacími trámci [3]



Obrázek 12 - Funkce horizontálního deflektoru při provozu [3]



Obrázek 13 - Funkce deflektorů při provozu na díle [3]

2.2.5. VD Dalešice

Vodní dílo Dalešice je součástí hydroenergetické soustavy přečerpávací vodní elektrárny (PVE) Dalešice – Mohelno. Hydroenergetické využití reprezentované statickými a dynamickými službami této PVE představuje prioritní účel díla. Neoddělitelným účelem soustavy je jak zajištění odběru chladící vody pro jadernou elektrárnu Dukovany, tak také vodohospodářské využití systému. Vedle zajištění nalepšování průtoků pod soustavou v řece Jihlavě přichází v úvahu samozřejmě i ochrana před povodněmi.

U převádění povodňových průtoků se počítá s transformačním účinkem retenčního prostoru VD Dalešice, který se projeví na „zploštění“ povodňové vlny snížením kulminálního průtoku. Hydraulické zkoušky bezpečnostního přelivu, skluzu a vývaru byly na díle poprvé prováděny 13. 6. 1980. Ty potvrdily výraznou nesymetrii proudění na skluzu způsobenou příčnými vlnami a ojedinělé výstřiky proudu přes boční stěny skluzu. V roce 2007 byla provedena rekonstrukce dna skluzu a navýšení bočních stěn. Na místě tak bylo nutno ověřit hodnoty bezpečně převáděného průtoku skluzem provedením zkoušek na fyzikálním modelu.

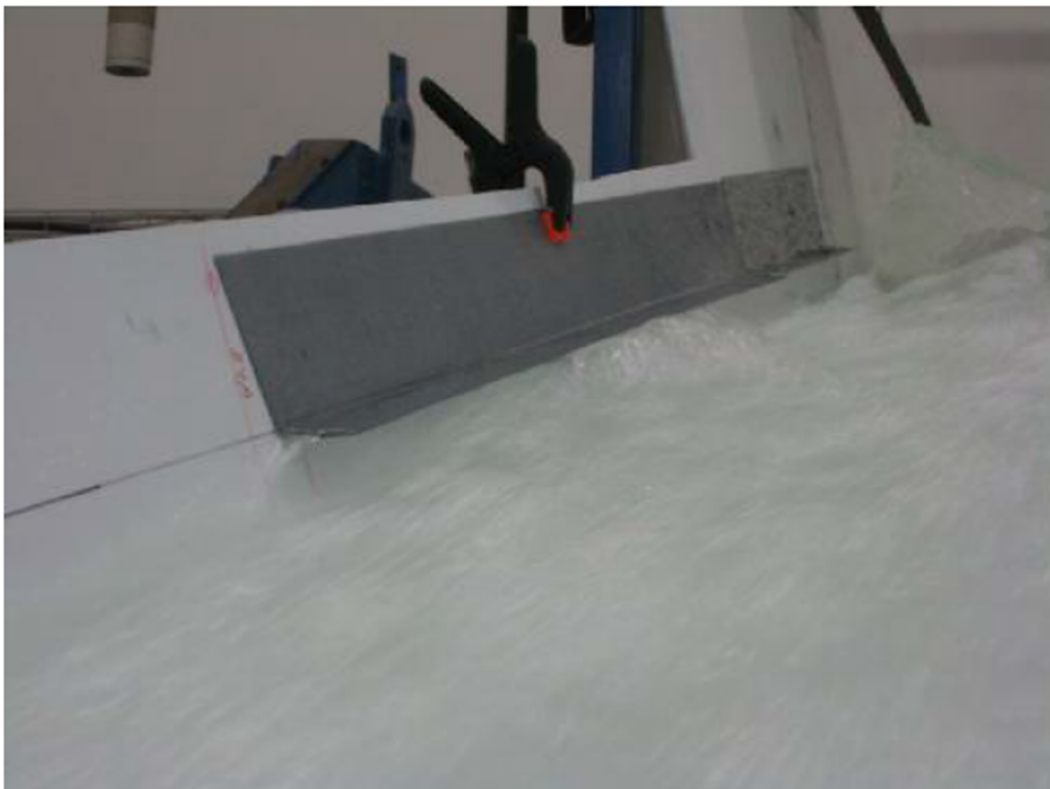
Samotný experiment na modelu měl hned několik fází, z nichž nejpodstatnější (pro tuto práci) bylo hledání vhodných tvarových úprav pomocí přídatných prvků a vyhodnocení jejich vlivu na proudové poměry. V rámci zkoušek byla testována řada usměrňovačů s různou šířkou horizontální části. Jejich délka byla přizpůsobována rozsahu výstřiků či vybřežení v závislosti na možných manipulačních kombinacích. Tyto prvky navíc umožnily zamezit ojedinělým výstřikům vodní tříště mimo prostor koryta. Pro úplnost byly ještě navíc vybaveny piezometrickým odběrem pro snímání hodnoty výstupu tlakové výšky [2].



Obrázek 14 - Výstup proudu na pravé straně spadiště [2]



Obrázek 15 - Výběh proudu při funkčních zkouškách [2]

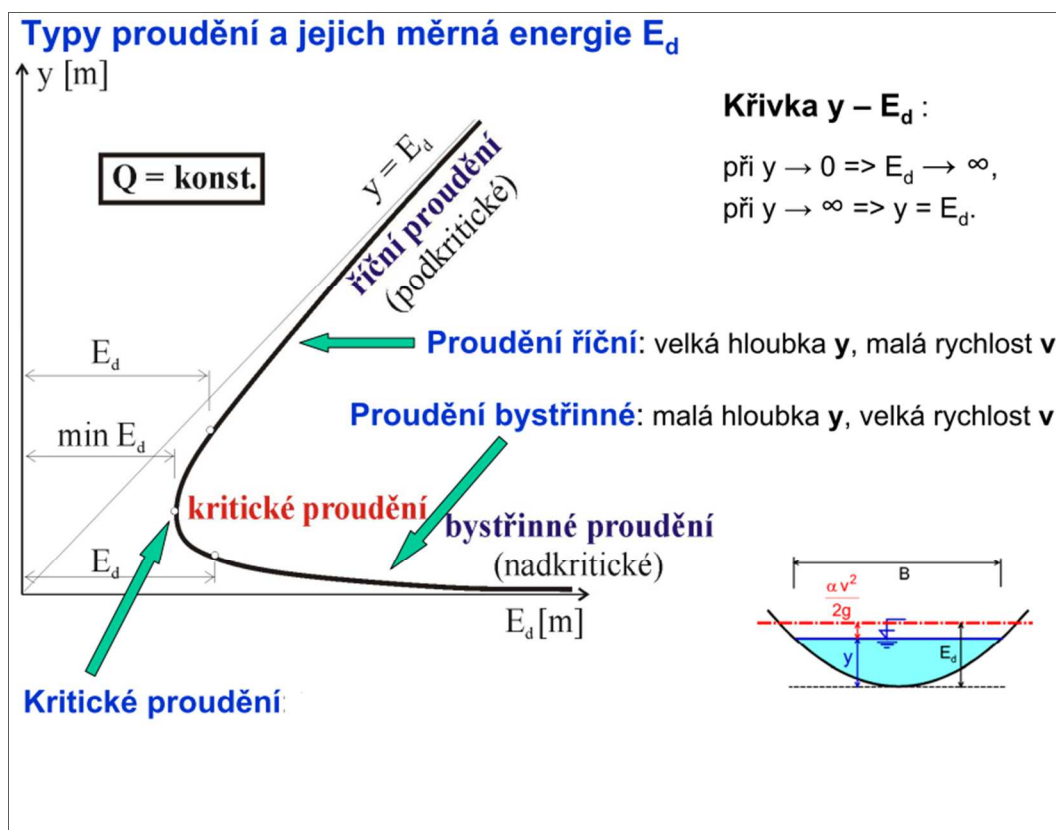


Obrázek 16 - Protirpoudní pohled na liniový usměrňovací prvek [2]

2.3. Nadkritické (bystřinné) proudění

Jak již bylo nastíněno v předchozích kapitolách, k usměrnění proudu nejčastěji dochází ve spadištích, skluzech či odpadních tunelech spodních výpustí. Tedy převážně v místech s rychle proudící vodou o malé hloubce. Pro tento velmi zjednodušující zápis je však lepší používat odborný název – nadkritické (bystřinné) proudění.

Jednotlivé druhy proudění nejlépe vystihuje následující graf:



Obrázek 17 - Energetická výška průřezu [7]

Pro naše další požadavky se budeme zabývat pouze prouděním nadkritickým. Tedy prouděním, při kterém se energetická výška průřezu (E_d) blíží nekonečnu a hloubka vody se blíží nule.

Pokud budeme uvažovat malý objem kapaliny (vody) vyňatý z proudu a na něj působící síly gravitační a setrvačné, bude pro nadkritické proudění platit, že síla setrvačná je větší než síla gravitační, neboli:

$$F_s > G \quad (1)$$

Poměr pro tyto dvě síly nejlépe vystihuje bezrozměrné Froudovo kritérium. Pokud setrvačnou sílu vyjádříme vztahem:

$$F_s = m \cdot a = m \cdot \frac{v}{t} = m \cdot \frac{v \cdot v}{L} = \frac{\rho \cdot y \cdot B \cdot L \cdot v^2}{L} \quad (2)$$

a sílu gravitační (tj. tíha objemu vody) jako:

$$G = m \cdot g = \rho \cdot y \cdot B \cdot L \cdot g, \quad (3)$$

pak poměrem těchto dvou sil se dostáváme k vyjádření Froudova čísla:

$$Fr^2 = \frac{F_s}{G} = \frac{\rho \cdot y \cdot B \cdot L \cdot v^2}{L \cdot \rho \cdot y \cdot B \cdot L \cdot g} = \frac{v^2}{g \cdot L} \quad (4)$$

Při zvolení délky proudu $L = y$ a odmocnění bude výsledná podoba rovnice (4):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (5)$$

Analogicky, pokud použijeme vztah (1) a (5), bude pro nadkritické proudění platit, že bezrozměrné Froudovo kritérium bude větší než 1 ($Fr > 1$). Tento fakt je velice důležitý pro následný experiment, při kterém Froudovo kritérium slouží jako kritérium modelové podobnosti (viz kap. 2.4.3).



Obrázek 18 - Nadkritické proudění skluzem na přehradě Kangaroo v Austrálii [8]

2.4. Podobnostní měřítko v hydraulickém modelování

V této kapitole budou uvedeny základní vztahy užívané při modelování hydraulických jevů. Uvedené výpočetní vztahy a zákony jsou uvedeny v publikaci [9]. Abychom mohli z pozorování a měření na modelu usuzovat na hydraulické jevy, které vzniknou na skutečné stavbě, musí být proudění na modelu a ve skutečnosti navzájem podobné.

Dva jevy jsou si mechanicky podobné, jsou-li splněny podmínky:

- geometrické podobnosti,
- kinematické podobnosti,
- dynamické podobnosti.

Hydraulické veličiny na zmenšeném modelu označíme indexem 1, na skutečném objektu indexem 2 [9].

2.4.1. Geometrická podobnost

Geometrická podobnost vyžaduje, aby pro libovolné dva sobě odpovídající rozměry byl zachován stálý poměr, který nazýváme délkové měřítko M_L [9]:

$$M_L = \frac{L_2}{L_1}; L_2 = M_L \cdot L_1 \quad (6)$$

Pro měřítko ploch platí:

$$M_S = \frac{S_2}{S_1}; M_S = M_L^2 \quad (7)$$

a pro měřítko objemů platí:

$$M_V = \frac{V_2}{V_1}; M_V = M_L^3 \quad (8)$$

2.4.2. Kinematická podobnost

Dráhy, které opisují sobě odpovídající částice proudu v úměrně odpovídajících si dobách, jsou navzájem podobné. K měřítku délek přistupuje měřítko času [9]:

$$M_t = \frac{t_2}{t_1}; t_2 = M_t \cdot t_1 \quad (9)$$

Odvozená měřítko jsou:

- rychlostní měřítko:

$$M_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{L_2/t_2}{L_1/t_1} = \frac{L_2/L_1}{t_2/t_1} = \frac{M_L}{M_t}; v_2 = M_v \cdot v_1 \quad (10)$$

- měřítko zrychlení:

$$M_a = \frac{a_2}{a_1} = \frac{L_2/t_2^2}{L_1/t_1^2} = \frac{L_2/L_1}{t_2^2/t_1^2} = \frac{M_L}{M_t^2} \quad (11)$$

- měřítko průtoků:

$$M_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{V_2/t_2}{V_1/t_1} = \frac{V_2/V_1}{t_2/t_1} = \frac{M_L^3}{M_t} \quad (12)$$

2.4.3. Dynamická podobnost

Dynamická podobnost vyžaduje, aby poměr sil na objektu a jeho modelu byl stálý a určen měřítkem sil [9]:

$$M_F = \frac{F_2}{F_1}; F_2 = M_F \cdot F_1 \quad (13)$$

Pro hmotnost proudící kapaliny definujeme měřítko hmotností:

$$M_m = \frac{m_2}{m_1}; m_2 = M_m \cdot m_1 \quad (14)$$

Dále se zavádí měřítko měrných hmotností:

$$M_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (15)$$

Pro aplikaci uvedených poměrů v silové rovnici $F = m \cdot a$ (16), obdržíme bezrozměrné Newtonovo kritérium, které zároveň vyjadřuje obecný zákon podobnosti [10]:

$$\frac{F}{\rho v^2 L_2} = idem. \quad (17)$$

Mají-li být dvě proudění mechanicky podobná, musí mít poměr (17) pro obě stejnou hodnotu.

Víme, že při proudění kapalin se uplatňují hlavně síly tíže, tření a povrchového napětí. Z obecného Newtonova kritéria lze odvodit další zákony za zjednodušujícího předpokladu, že působí jen jeden druh sil (nebo nad ostatními dominuje).

Při převažujícím účinku síly tíže vyplývá [9]:

$$\frac{gL}{v^2} = idem., \text{ což musí platit i pro převrácenou hodnotu} \quad (18)$$

$$\frac{v^2}{gL} = Fr = idem. \quad (19)$$

Rovnice (19) vyjadřuje **Froudovo kritérium podobnosti**. Převažují-li síly tíže, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Froudova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná. Froudovo kritérium podobnosti se aplikuje vždy při modelování proudění s volnou hladinou.

Při převažujícím účinku sil tření platí:

$$\frac{vL}{\nu} = Re = idem. \quad (20)$$

Rovnice (20) vyjadřuje **Reynoldsovo kritérium podobnosti**. Převažují-li síly tření, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Reynoldsova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná. Reynoldsovo kritérium podobnosti se zohledňuje vždy při modelování jevů neovlivněných existencí volné hladiny: tlakové proudění v potrubí, obtékání ponořených těles či částí staveb.

Při převažujícím účinku sil povrchového napětí platí:

$$\frac{\rho v^2 L}{\sigma} = We = idem. \quad (21)$$

Bezrozměrné **Weberovo kritérium** se aplikuje při převaze sil povrchového napětí, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Weberova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná [9].

Mezi další zákony patří:

- Cauchyho zákon – pro objemovou stlačitelnost,
- Strouhalův zákon – pro podobnost dvou neustálených jevů,
- Karmánův zákon – pro podobnost dvou turbulentních jevů.

2.5. Příčné vlny

Jedním z nejčastějších příznaků nadkritického (neusměrněného) proudění ve spadišti nebo na skluzu je vznik příčných hladinových vln. Ne vždy se jedná o negativní či nežádoucí jev. Nicméně průběh příčných vln může narušovat režim proudění nebo v kombinaci s jinými faktory přispívat ke vzniku kritických situací na vodním díle. Jedním z takových může být výběh vlny nad zed' skluzu či dokonce přelévání této konstrukce. Abychom takovým situacím zabránili, je na místě zabývat se možnostmi řešení – usměrnění proudu.

Faktory, které v převážné míře ovlivňují vznik příčných vln, jsou:

- geometrický tvar konstrukce,
- nesymetrické proudové poměry,
- hloubka vody,
- rychlost proudění,
- nadkritický sklon,
- manipulace s bezpečnostními objekty.



Obrázek 19 - Vznik příčných vln na hydraulickém modelu

V návaznosti na numerické modelování a teoretickou analýzu se k charakteristice příčných vln dají využít dva parametry proudění. Jedním je Froudovo kritérium (5) a tím druhým je hloubka proudu [11].

2.6. Možnosti stanovení silových účinků proudu

V případě nutnosti řešit usměrnění proudu na bezpečnostních objektech vodních děl vzniká několik důležitých otázek, které je nutno v úvodu pečlivě promyslet. Jaký prvek použít, kam jej umístit, jak jej dimenzovat, jaký použít materiál? Každá z otázek vyžaduje specifický přístup a je vhodné je řešit jako celek komplexně.

Na řešení je nutno pohlížet z více úhlů. Jsou situace, které například nepopíšeme bez zkoumání na fyzikálním modelu, jiné zase nevyřešíme bez znalosti hydraulických zákonů nebo mechanických vlastností použitých materiálů. Zjednodušeně můžeme tvrdit, že existují tři základní postupy pro řešení situací či experimentů podobných tomu, který je předmětem této práce. Jsou to:

- měření na fyzikálním modelu,
- numerické modelování,
- zjednodušené zákony hydrauliky (empirické vzorce).

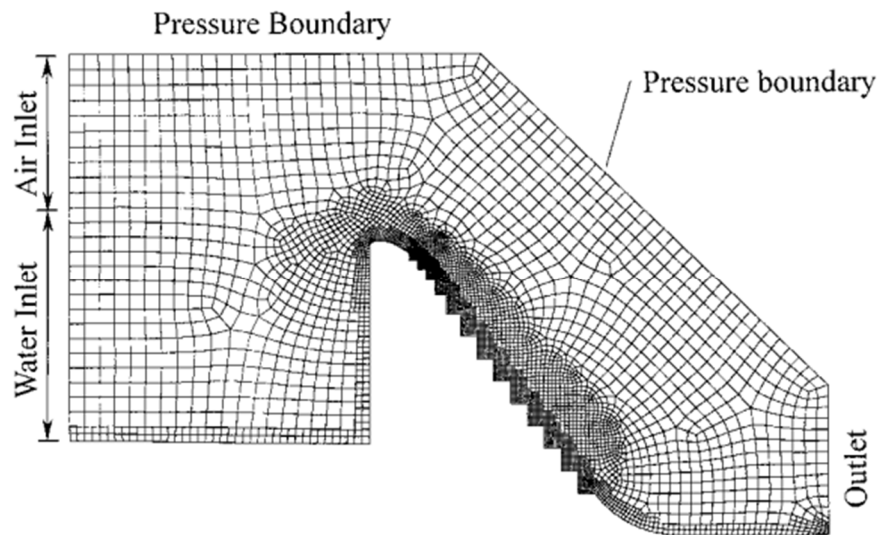
Pokud bychom se jednotlivým bodům věnovali podrobněji, lze definovat některé z výhod a nevýhod použití výše zmíněných metod.

METODA	VÝHODY	NEVÝHODY
Měření na fyzikálním modelu	<ul style="list-style-type: none">• měření přesně těch výstupů, které potřebujeme• díky měřítku podobnosti jednoznačné výsledky	<ul style="list-style-type: none">• model pouze pro konkrétní problém (experiment)• náklady na stavbu modelu• velká časová náročnost (stavba modelu i samotné měření)
Numerické modelování	<ul style="list-style-type: none">• přesné výsledky• bez větších finančních výdajů• automatizace	<ul style="list-style-type: none">• kalibrace modelu• ověření správnosti výstupů• nutnost učit se výpočetní software
Empirické vzorce	<ul style="list-style-type: none">• jednoduchost použití• rychlost	<ul style="list-style-type: none">• díky zjednodušení možnost ovlivnění výsledků• nutnost vzorce odvodit

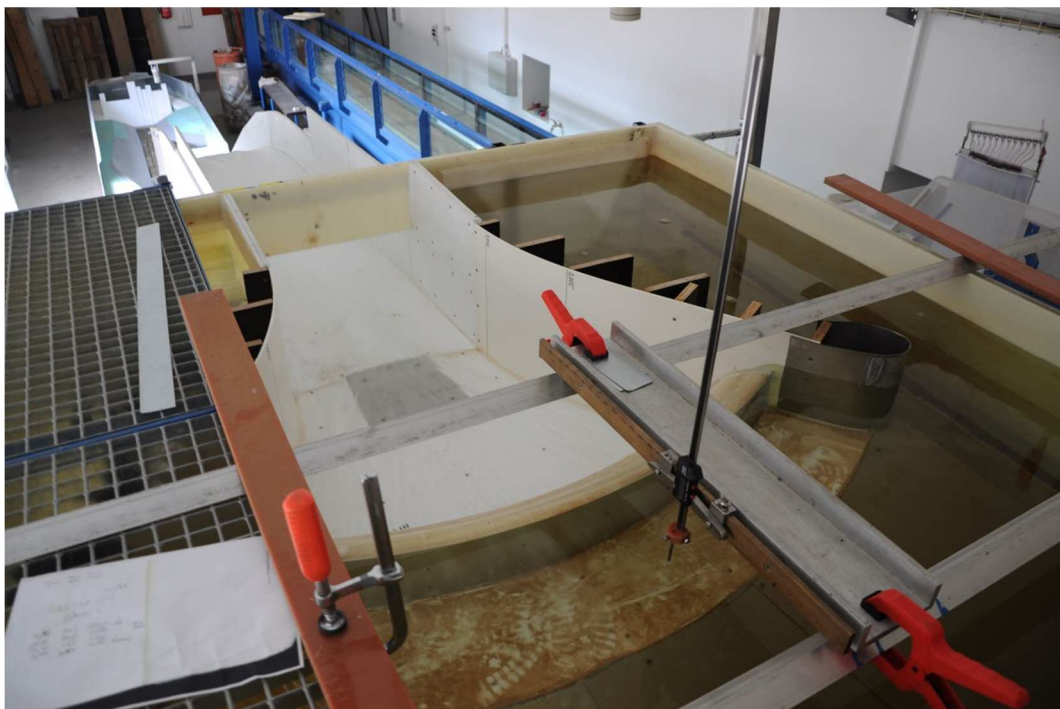
Tabulka 1 - Srovnání metod řešení

Při řešení této diplomové práce a snaze získat požadované výstupy bylo využito dvou postupů. Oba zastupovaly svou část v cestě ke stanovení výsledků potřebných pro konkretizaci cíle (návrh metodiky). V první řadě šlo o měření na fyzikálním modelu, po kterém došlo k použití empirických vzorců. Následně byly oba přístupy porovnány s cílem sestavit doporučující metodiku pro návrh usměrňovacích prvků.

Pokud jde o numerické modelování, to nebylo v experimentu využito z důvodu obtížného matematického modelování příčných vln. Nutno však podotknout, že tato metoda se k různým simulačním výpočtům používá stále častěji. Zde je možno zmínit publikace pojednávající o použití výpočetní techniky při studiu hydraulických jevů na objektech vodních děl. Jsou to publikace č. [11], [12], [13] a jiné.



Obrázek 20 - Příklad numerického modelování pomocí MKP [12]



Obrázek 21 - Fyzikální model VD Boskovice [14]

3. Informace k experimentu

3.1. Definování problému a požadavky

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, použitím usměrňovacích prvků na spadištích, skluzech a odpadních štolách, lze efektivně docílit zvýšení bezpečnosti těchto objektů. Avšak před samotnou instalací usměrňovačů je nutné stanovit jejich konstrukční vlastnosti, které vycházejí z účinků sil na ně působících. A právě zkoumání sil od účinků usměrňovaného proudu je záležitostí této diplomové práce. Cíl experimentu lze rozepsat do několika na sebe navazujících kroků:

- měření statického a dynamického zatížení prvku na hydraulickém modelu,
- zpracování měření a definování výsledné síly v závislosti na rychlosti, hloubce a změně směru proudu,
- definování výsledné síly pomocí empirických vzorců,
- porovnání výsledků,
- definování metodiky pro dimenzování usměrňovacích prvků.

3.2. Modelované stavy

Usměrnění proudu probíhalo ve dvou základních variantách, kterými byly:

- vertikální usměrnění proudu (obrázek č. 22),
- horizontální usměrnění proudu (obrázek č. 23).

Při každém z těchto stavů navíc docházelo ke změně základních vlastností proudu (rychlost, průtok, výška hladiny, odklon usměrňovaného proudu) nebo polohy samotných usměrňovačů, takže výsledkem je daleko více měřených stavů. Díky tomu mohl být zjištěn trend, jakým by se mohly měřené veličiny ubírat, pokud bychom s měřením pokračovali nad určité limitní hranice fyzikálního modelu nebo měřící techniky (kapacita modelu, apod.).

3.3. Omezující podmínky modelové podobnosti

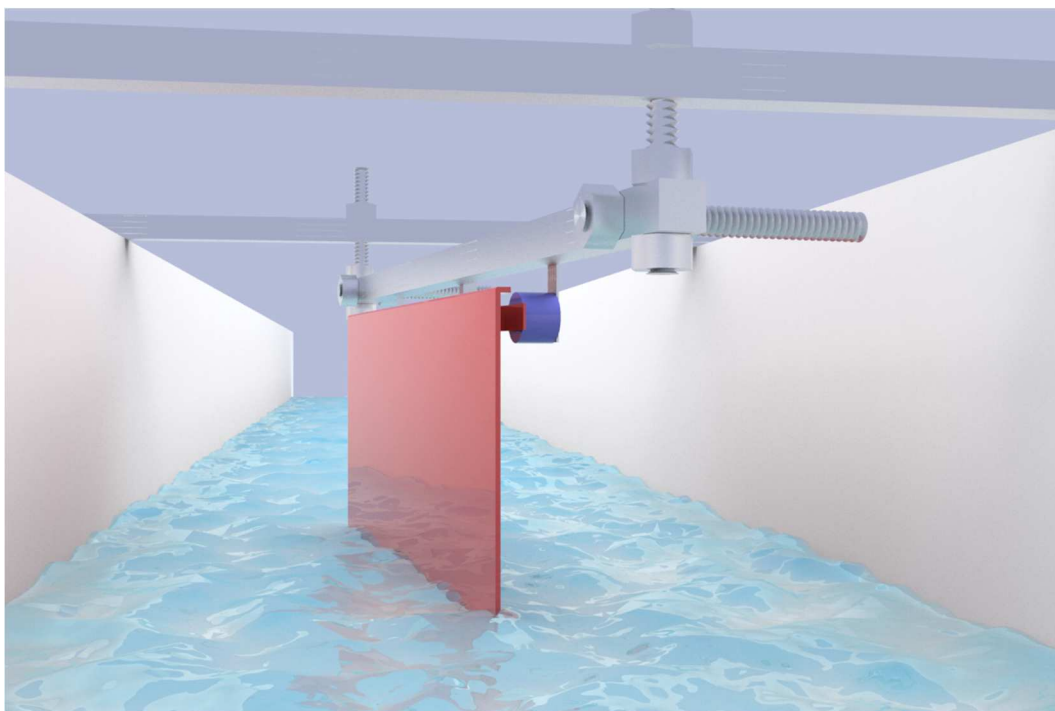
Pokud na vlastním objektu i jeho modelu ovlivňují proudění převážně síly gravitační, platí pro vzájemný přepočet jevů Froudovo kritérium modelové podobnosti (rovnice 19). Hodnota Froudova kritéria musí být pro proudový jev na modelu i díle shodná. Pro přepočet následujících veličin platí:

$$l = l_m \cdot M, \quad (22)$$

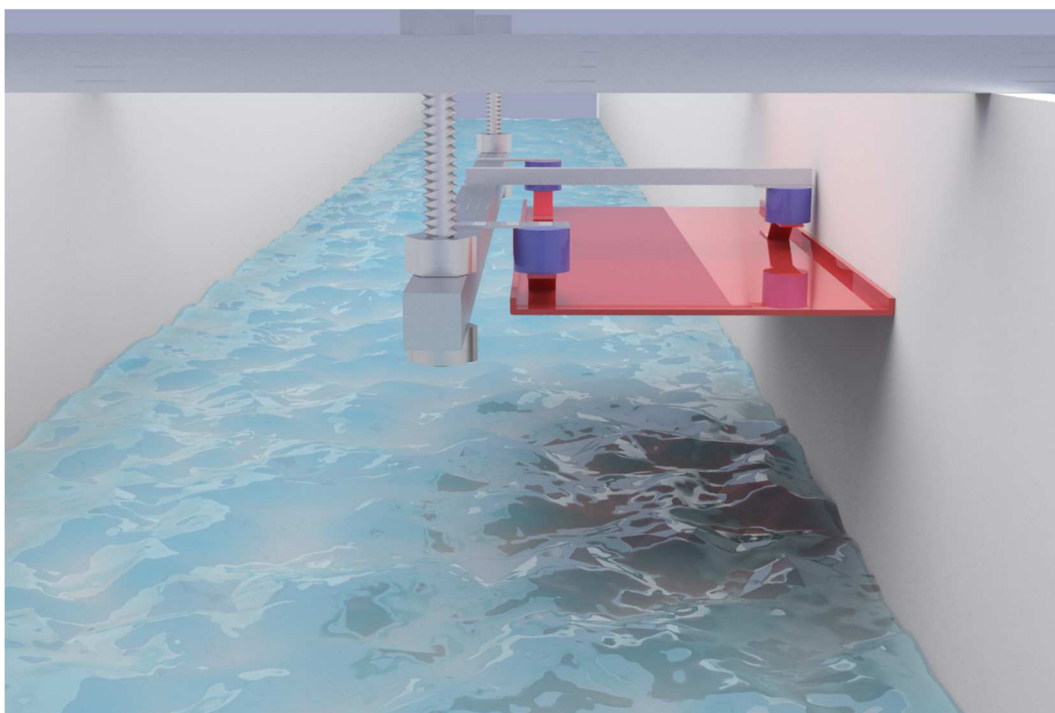
$$v = v_m \cdot M^{0,5}, \quad (23)$$

$$Q = Q_m \cdot M^{2,5}, \quad (24)$$

kde index m platí pro model, veličiny bez indexu jsou vztaženy na dílo [6].



Obrázek 22 - Vizualizace vertikálního usměrňovače [15]



Obrázek 23 - Vizualizace horizontálního usměrňovače [15]

Pokud je proudový jev ovlivněn více druhy sil (gravitační, viskozity, povrchové napětí) současně, nelze přepočít uvažující dominantní působení pouze jedné z nich korektně použít. Proto musíme brát u zmenšovaných modelovaných jevů v úvahu omezující podmínky, ohraničující zdola platnost použitého kritéria [6].

Pro Froudovo kritérium platí při modelování proudových jevů se spolupůsobením kapilárních sil vyvolávajících povrchové napětí nutnost dodržení těchto spodních mezních hodnot [6]:

- a) přepadová výška u zaobleného jezového přelivu na modelu musí být $h_{m \min} \geq 20$ mm,
- b) povrchová rychlost proudu na modelu musí být $u_m > 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aby kapilární síly nebránily tvoření povrchových vln,
- c) světlá šířka přelivného pole musí být na modelu $b_{0m} \geq 60$ mm,
- d) dle Averkijeva je nutno splnit pro automodelovost přepadového jevu na přelivu hodnotu $Re_{m \min} = \frac{q}{\nu} > 3000 \sim 5000$, kde q je specifický průtok a ν součinitel kinematické viskozity.

Podmínka a) je při zvoleném měřítku $M = 20$ při přepadu přes přeliv v požadovaném rozsahu splněna. Pro úplné dokreslení podmínek možno uvést, že uvedené mezní kritérium činí pro přeliv se zaoblenou korunou kruhovým poloměrem $h_{m \min} \sim 20$ mm.

Podmínka nutné povrchové rychlosti proudu na modelu ad b) je splněna na skluzu v celém rozsahu průtoků po celé jeho délce [6].

3.4. Zkušební hydraulický model

Pro provedení experimentu byl využit trojrozměrný hydraulický model VD Boskovic v měřítku (podobnosti) $M = 1:20$. Měřítko splňuje požadavky překročení omezujících podmínek modelové podobnosti zejména přepadového jevu přes přeliv i vzniku příčných vln na skluzu při nadkritickém proudění.

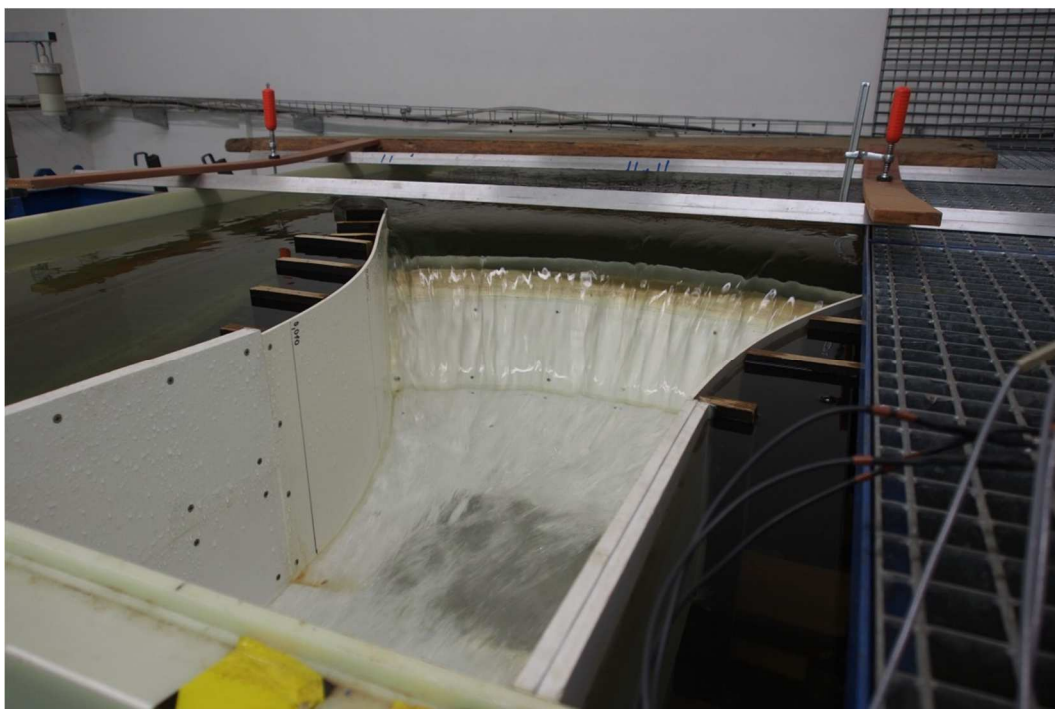
Model přelivu a spadiště je umístěn v plastové nádrži obdélníkového půdorysu uložené na nosné konstrukci s úrovní dna 1,8 m nad podlahou laboratoře.

Model skluzu je vyroben z termoplastových desek, přelivná hrana z extrudovaného polystyrenu XPS. Tloušťka termoplastových desek, která se pohybovala od 3 mm do 10 mm, umožnila realizovat potřebná zakřivení tvaru ve dně i u bočních stěn. Délka skluzu (po přepočtu na dílo) s proměnným sklonem 3 % až 55 % činila 116 m.

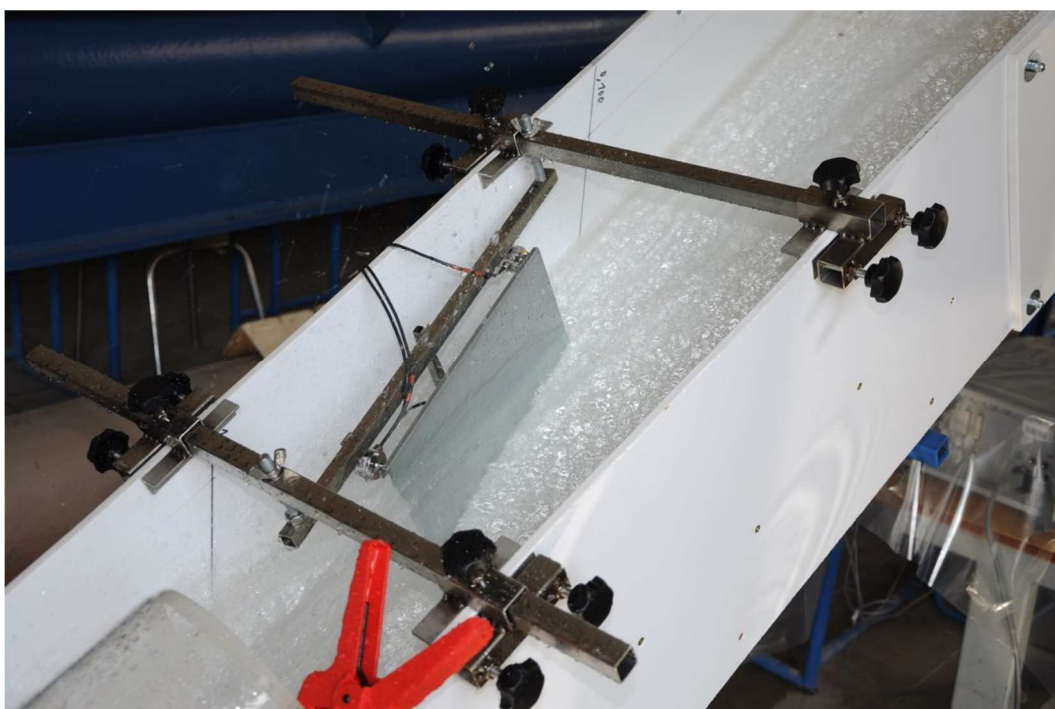
Vývar je vystaven z betonu. Dno odpadního koryta je pokryto dlažebními kostkami [6].



Obrázek 24 - Hydraulický model – protiproudění pohled [14]



Obrázek 25 - Hydraulický model přelivu [14]



Obrázek 26 - Detail skluzu hydraulického modelu VD Boskovice se zařízením pro měření silových účinků na svislý usměrňovací prvek [14]

3.5. Měrná trať

Model byl instalován v prostoru hydraulické zkušebny budovy F areálu VUT FAST v Brně. Byl připojen na hydraulický uzavřený (cirkulační) okruh napájený čerpadly ovládanými motory s měniči frekvence. Přítok z potrubí DN 250 byl realizován do uklidňovací nádrže s umístěným modelem přelivu. Na přítokovém potrubí je instalován indukční průtokoměr s platným „ověřením stanoveného měřidla průtoků“, které je současně pravidelně interně kontrolováno několika dalšími nezávislými metodami. Odtok z modelu, respektive z odpadního koryta za vývarem ve výšce 0,2 m nad podlahou laboratoře, byl realizován přes usměrňovací díl vertikálně do suterénního odpadního kanálu, čímž byla zajištěna dostatečná průtočná kapacita.

Hydraulický okruh je řízen řídicím systémem laboratoře s možností ručního nebo automatizovaného režimu. Stabilních (ustálených) poměrů bylo dosaženo prostřednictvím PID (proporcionálního-integračního-derivačního) regulátoru řídicího měniče frekvence čerpadel laboratoře v závislosti na velikosti regulační odchylky mezi požadovaným a okamžitým průtokem vykazovaným indukčním průtokoměrem. Hydraulický okruh umožnil dosáhnout trvalých stabilních průtoků v potřebném rozsahu $Q = 8 \sim 105 \text{ l.s}^{-1}$, maximální průtok $Q_{\max} = 104,3 \text{ l.s}^{-1}$ ($Q_{10\ 000} = 186,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Bezpečnost provozu byla hlídána ultrazvukovým (UZV) čidlem nad hladinou nádrže s modelem přelivu. Čidlo bylo součástí řídicího systému předmětného zkušebního okruhu. Rozlišovací schopnost použitého UZV čidla činí 0,25 mm, přičemž přesnost vykazované hloubky proudu lze uvažovat do 1 mm [6].

V některých případech musel být skluz na modelu opatřen ochrannými novodurovými deskami nebo žlaby, aby se zabránilo výstřiku vodní tříště mimo koryto skluzu. Tyto úpravy neměly žádný vliv na výsledky měření. V neposlední řadě byl model opatřen měřící „jednotkou“ spolu s dalšími prvky, které jsou následně popsány v Kapitole 3.6.



Obrázek 27 - Jednotka pro operativní změnu průtoků na modelu [14]



Obrázek 28 - Přibližný protiproudňi pohled na měřnou trať včetně měřící jednotky [14]

3.6. Měřicí technika

3.6.1. Hloubka proudu

Hloubka proudu a průběh hladiny ve skluzu byla měřena pomocí hrotového digitálního měřidla s přesností 0,1 mm. Ten byl umístěn vždy v místě, kde probíhalo měření účinků proudu.



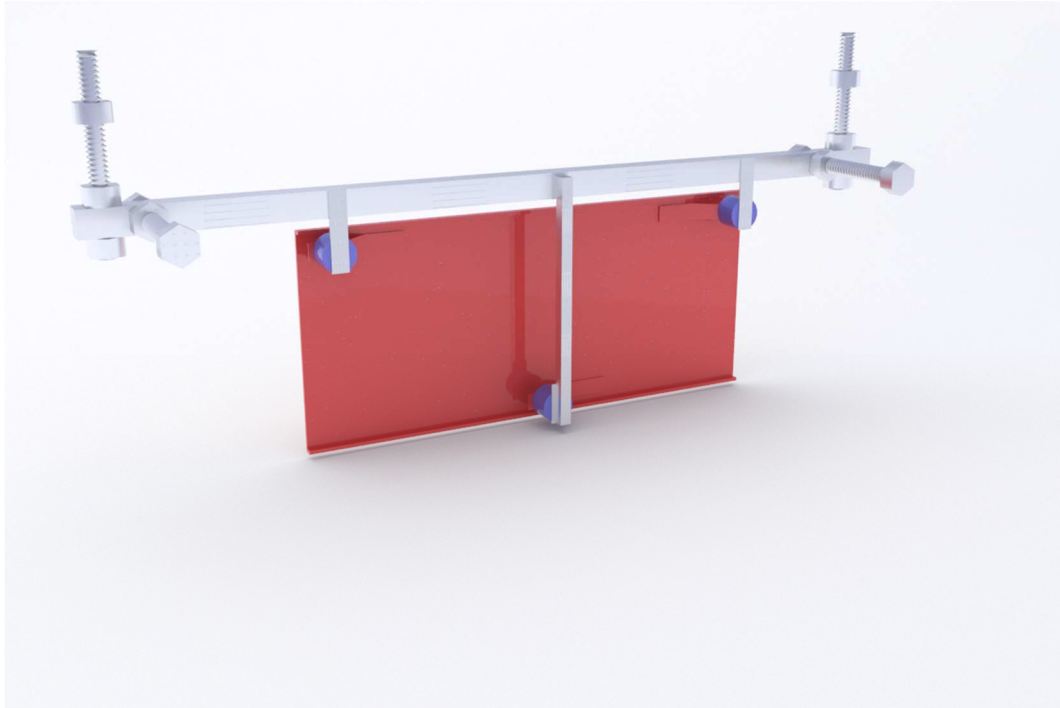
Obrázek 29 - Ukázka snímání výšky hladiny [14]

3.6.2. Účinky sil

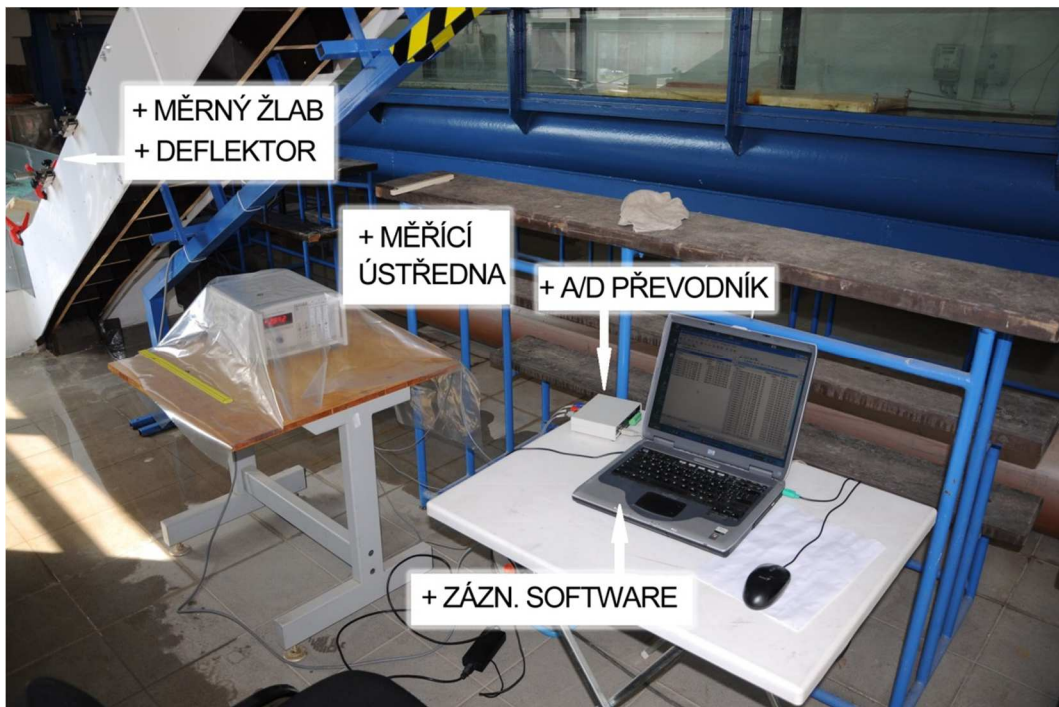
Pro měření silového zatížení působícího na deflektor byly použity 3 siloměrné snímače typu U9B/0,5 kN výrobce Hottinger Baldwin Messtechnik s přesností 0,5 %. Pomocí těchto snímačů, které jsou patrné z obrázku č. 30 (modré válečky), byl deflektor (300 mm x 130 mm x 2 mm) z pozinkovaného plechu připevněn k nosné a polohovací konstrukci. Celá tato soustava tak mohla být osazována na stěny žlabu v potřebných konfiguracích (vertikální a horizontální pozice).

Siloměrné snímače byly zapojeny do 6-kanálové měřicí ústředny MGA téhož výrobce. Za ní následoval 8-kanálový 14-bitový A/D převodník UDAQ-1408 od výrobce TEDIA, jehož výstup ústí do přenosného počítače se záznamovým softwarem. Celé schéma zapojení je na obrázku č 31.

Jiné síly než tlakové respektive tahové nebyly měřeny.



Obrázek 30 - Poloha snímačů na zadní straně deflektoru [15]



Obrázek 31 - Schéma zapojení jednotlivých komponent [14]

3.6.3. Měření průtoku

Průtok byl snímán na přítokovém potrubí pomocí indukčního průtokoměru. Hodnoty byly kontrolovány na digitální tabuli v laboratoři. Během experimentu byl záznam průtoků ověřován na řídicí jednotce (viz obrázek č. 32).

3.6.4. Měření délek

V neposlední řadě je nutno zmínit, že pro určení rozměrů žlabu (skluzu), deflektoru, vzdálenosti svislic při průběhu hladiny a jiných délkových rozměrů byla použita ocelová měřka s přesností odečtu 1 mm.



Obrázek 32 - Řídicí jednotka pro záznam měření průtoku [14]

Jednotlivé charakteristické stavy byly též fotografovány.

4. Postup experimentu

Na začátku bylo nutné experiment rozdělit do tří základních částí a pro každou z nich připravit plán postupu. Dílčí části jsou:

- kalibrace modelu,
- vertikální měření,
- horizontální měření.

V každém z těchto měření bylo prováděno několik dalších konfigurací, jejichž počet se odvíjel od náročnosti dané úlohy. To bylo umožněno nastavitelnými šrouby na měřící desce.

4.1. Kalibrace modelu

Před samotným započítím experimentu bylo nutné zkalibrovat měřící techniku tak, aby podávala správné hodnoty. Měřící deska byla osazena třemi snímači, které byly poté označeny A0, A2 a A4 dle využívaných kanálů A/D převodníku. Poloha snímačů je patrná z obrázku č. 33.

Pro každý ze snímačů bylo možno odečítat hodnotu napětí a tyto hodnoty zaznamenávat na počítač. V první řadě bylo nutné zjistit, jaká bude nastavena vzorkovací frekvence pro snímání hodnot napětí tak, aby bylo měření relevantní, ale zároveň nebylo nutno pracovat se zbytečně velkými soubory dat. Ze zkušebního měření byl vyhodnocen graf (viz Příloha č.: 1.2), který představuje časový průběh napětí na snímači a hustotu záznamu dle zvolené frekvence. Na základě tohoto grafu byla zvolena vzorkovací frekvence 300 Hz a délka záznamu 30 s což představovalo 9000 hodnot pro každý snímač.

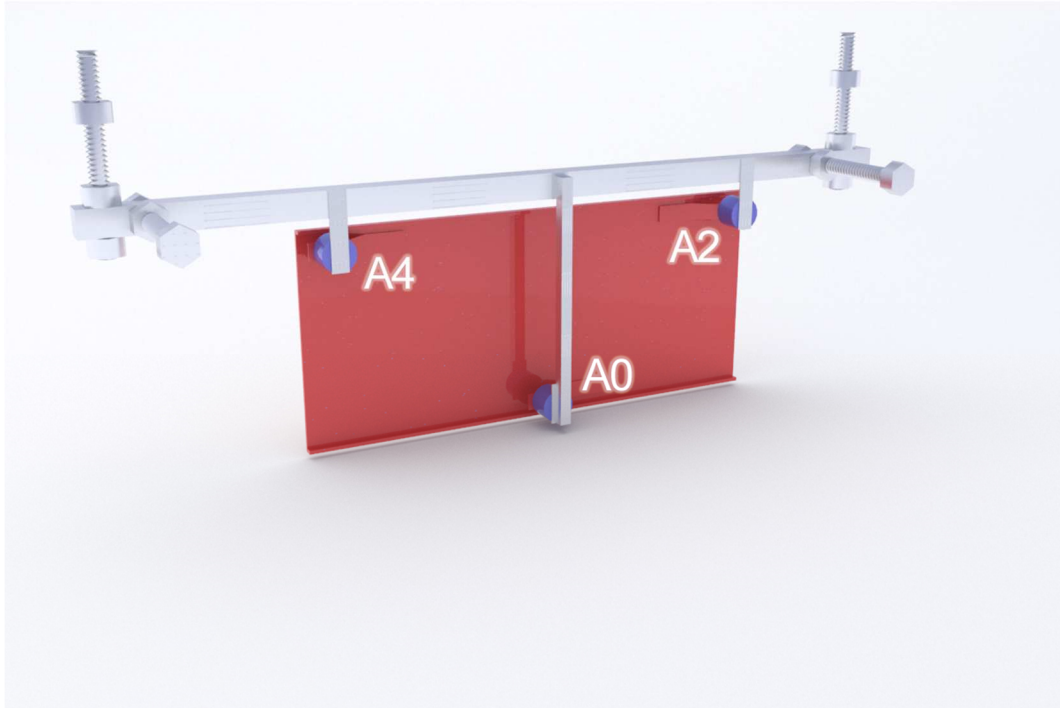
Následovalo postupné zatěžování měřící desky (v místě snímačů) závažími o předem známé hmotnosti a vyhodnocení závislosti napětí na síle, která působí na snímač. Z těchto hodnot byl vynesena graf a jeho hodnoty spojeny lineární regresní křivkou pro získání rovnice regrese (Příloha č. 1.1). S pomocí těchto tří rovnic (každá pro jeden snímač) bylo poté naměřené napětí přepočítáváno na velikost působící síly ve zbytku experimentu. Rovnice pro jednotlivé senzory (postupně A0, A2, A4):

$$\bullet \quad y = 6,2795x - 0,0181 \quad (25)$$

$$\bullet \quad y = 5,2601x - 0,0144 \quad (26)$$

$$\bullet \quad y = 5,1183x - 0,0128 \quad (27)$$

kde x je změřené napětí a y výsledná síla.



Obrázek 33 - Umístění a popis snímačů [15]



Obrázek 34 - Kalibrace pomocí závaží [14]

4.2. Vertikální a horizontální měření

Postup u obou situací byl totožný až do bodu vyhodnocení celkových sil a koeficientů na konci dílčích experimentů.

Sestával se ze tří třicetisekundových měření v každé konfiguraci. Při dvou proudila ve žlabu voda a v jednom byl žlab prázdný (opravná hodnota). Opravná hodnota byla od ostatních odečítána pro vyloučení vlastní tíhy deflektorů a získání správných hodnot napětí vzniklých působením proudící vody na deflektor. Tyto byly vkládány do šablony pro přepočítání na velikost působící síly. Příklad přepočtu napětí naměřeného na snímači A0 na sílu je uveden dále. Naměřené napětí uvažujme např. 2,285 V. Pro výpočet použijeme vzorec (25), do kterého za x dosadíme oněch 2,285 V. Výsledná síla F tedy bude rovna 14,33 N.

Měření sil působících na vertikální deflektor

$Q = 30 \text{ l/s}$ $\alpha = 20,43^\circ$

Snímač	$\bar{\varnothing} F$	σ_x	Směr	F_0
[-]	[N]	[N]	[-]	[N]
A0	13,979	0,573	TLAK	13,979
A2	0,827	0,143	TLAK	
A4	0,899	0,182	TLAK	

- α = úhel odchýlení (změny směru) proudu
- $\bar{\varnothing} F$ = průměrná síla působící na snímač
- σ_x = směrodatná odchylka měření na snímači
- F_0 = výsledná síla působící na deflektor u dna žlabu

Obrázek 35 - Šablona pro přepočítání napětí

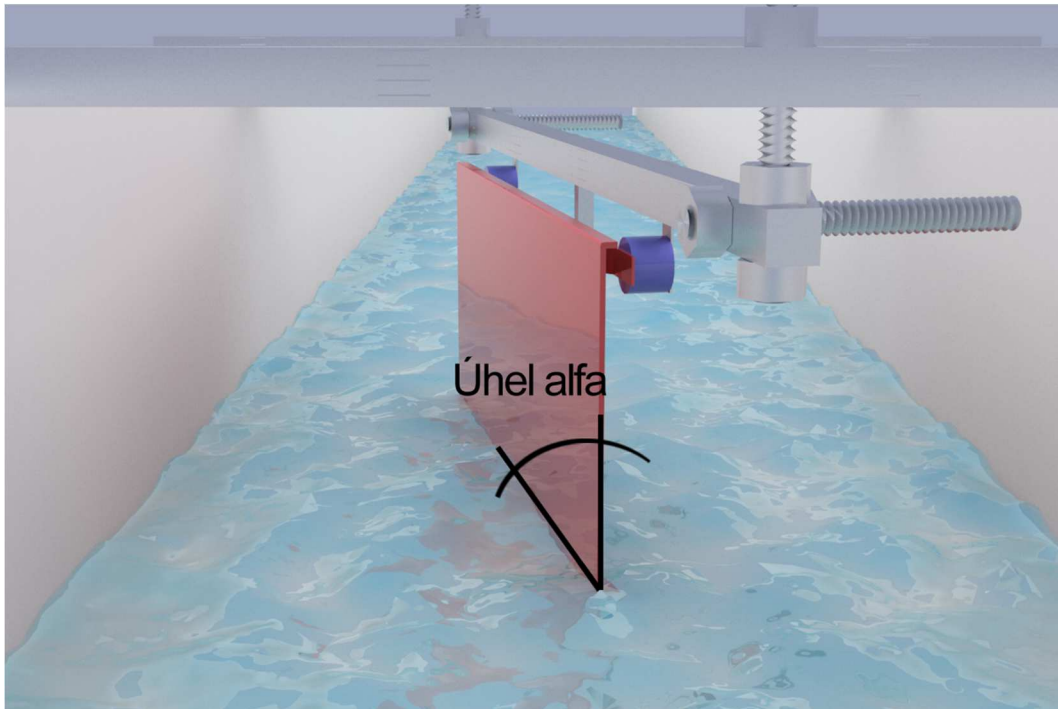
Při vyhodnocení byla počítána průměrná síla na snímač $\bar{\varnothing} F$, směrodatná odchylka měření σ_x a vyhodnocen směr síly. Vzorce použité při výpočtu:

- rovnice snímačů,
- $\bar{\varnothing} F = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$, (28)

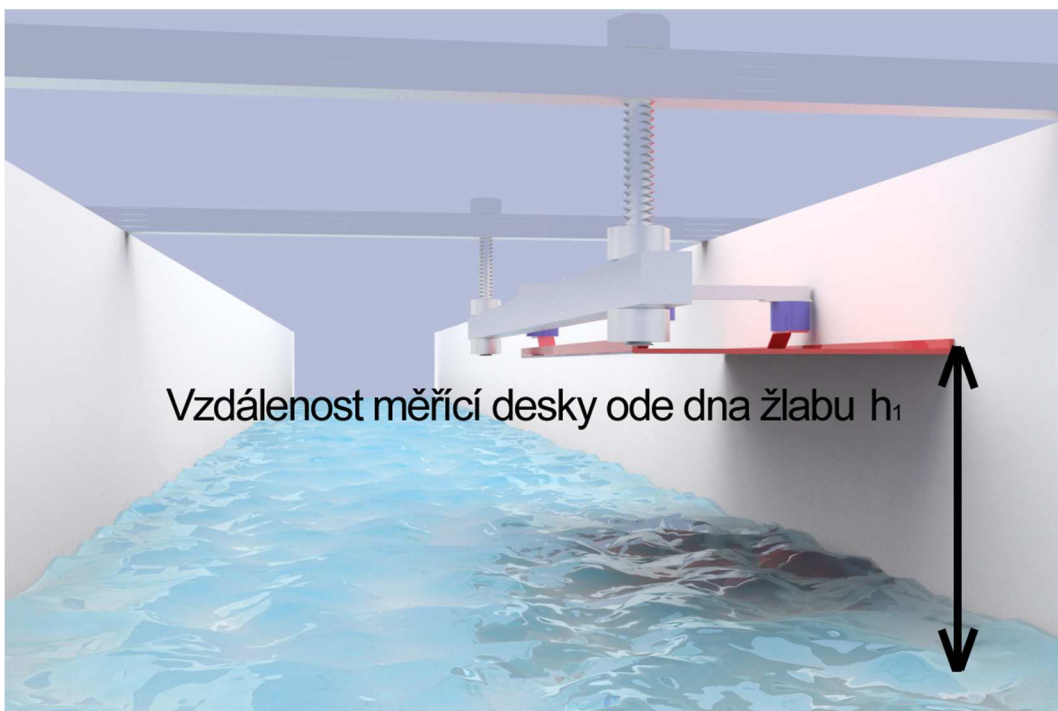
- $\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2\right) - \bar{x}^2}$, (29)

kde N je počet naměřených hodnot a x_i je již přepočtená síla.

Pro vertikální umístění deflektoru bylo vytvořeno 32 konfigurací (cca 8 změn úhlů pro každý ze 4 průtoků). Změnu úhlu umožňoval systém přichycení měřicí desky ke stěnám žlabu. Horizontální umístění vyžadovalo 24 konfigurací (8 průtoků a pro každý 3 polohy měřicí desky). Nutno zmínit, že při každé změně průtoku byl změřen také průběh hladiny ve žlabu. To probíhalo hrotovým měřidlem ve vzdálenosti jednotlivých svislic = 3 cm. Pro každou konfiguraci byl taktéž pořízen fotografický snímek.



Obrázek 36 - Úhel odklonu proudu – vertikální deflektor [15]



Obrázek 37 - Změna vzdálenosti deflektoru ode dna žlabu – horizontální deflektor [15]

5. Experimentální část

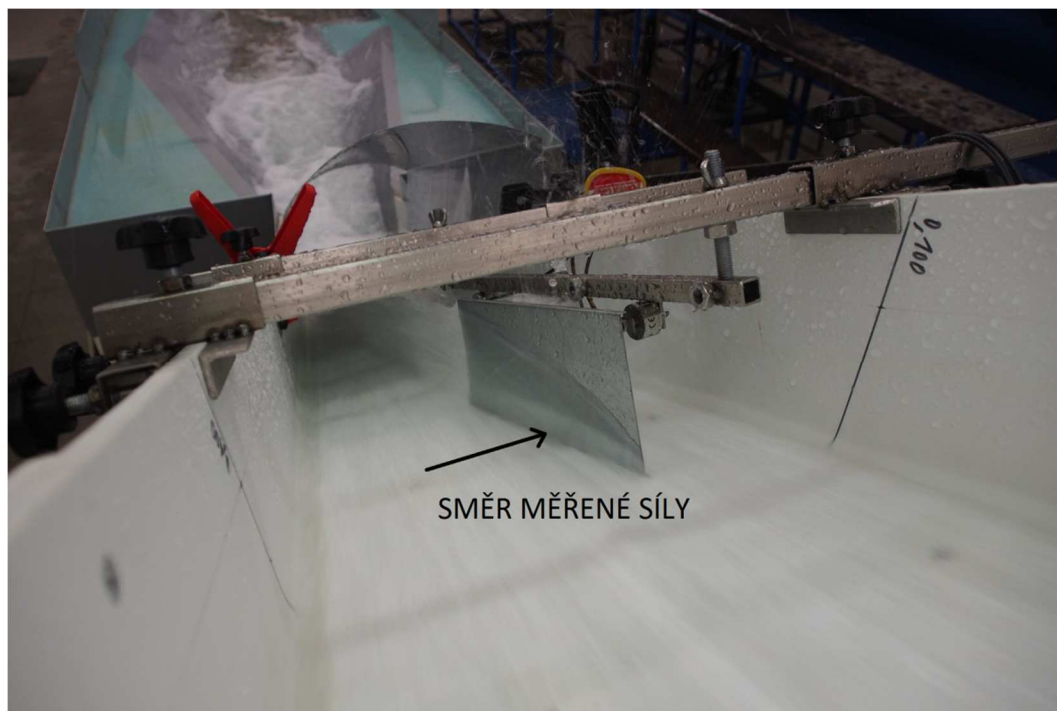
5.1. Vertikální deflektor

Měření sil působících na vertikálně umístěný deflektor probíhalo ve spodní části skluzu, do které byla osazena měřicí deska. Zároveň bylo třeba dosáhnout silně nadkritického režimu proudění, které zaručoval právě tento úsek. Ve snaze nedopustit se při měření možných chyb z důvodu nevhodných hydraulických podmínek, byla hladina ve žlabu vyrovnávána pomocí nerezového plechu v horní části modelu tak, aby nedocházelo k tvorbě příčných vln.

Uchycení měřicí desky bylo provedeno pomocí nastavitelných šroubů a celé toto zařízení umístěno do polohy umožňující snadnou obsluhu (viz obrázek č. 38). Úhel natočení deflektoru (= úhel odklonu od osy žlabu) se pohyboval v rozsahu cca 5° až 20° (Obrázek č. 15). Tyto konfigurace byly měřeny při čtyřech odlišných polohách hladiny. Ty odpovídaly průtokům $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, 35 l.s^{-1} , 45 l.s^{-1} a 60 l.s^{-1} .

Dle vzájemné polohy měřicí desky a výšky hladin při změně průtoku bylo zřejmé, že nás bude zajímat hlavně velikost síly na snímači A0, čili v místě těsně nade dnem žlabu. To i z důvodu, že odražený proud vody má směr tečny deflektorové plochy a tudíž hodnoty naměřené na ostatních snímačích vypovídají spíše o snaze konstrukce vyrovnávat působení sil v levém a pravém spodním rohu desky. Ze stejného důvodu nebylo při vyhodnocení přistoupeno ke stanovení různých typů momentů (klopivý, klonivý, zatáčivý).

Další faktor, který ovlivnil toto rozhodnutí, byl postup při výpočtu podle zákonů hydrauliky. Jenž uvažuje taktéž pouze sílu působící kolmo k deflektoru.



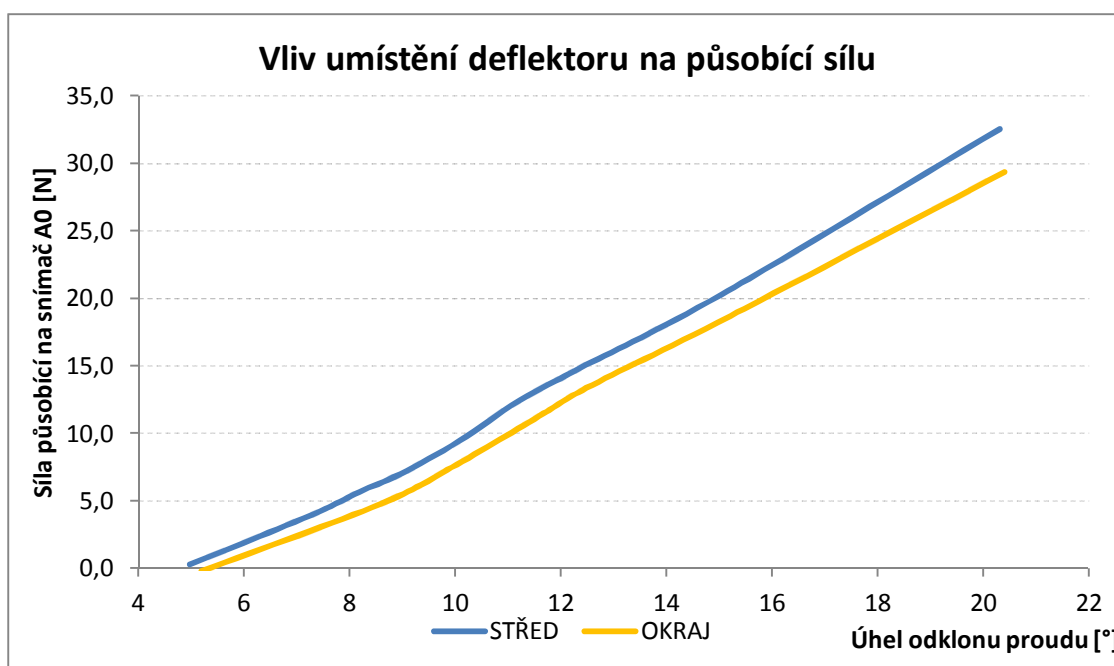
Obrázek 38 - Umístění deflektoru a směr měřené síly [14]

5.1.1. Ověření navrhnutého postupu

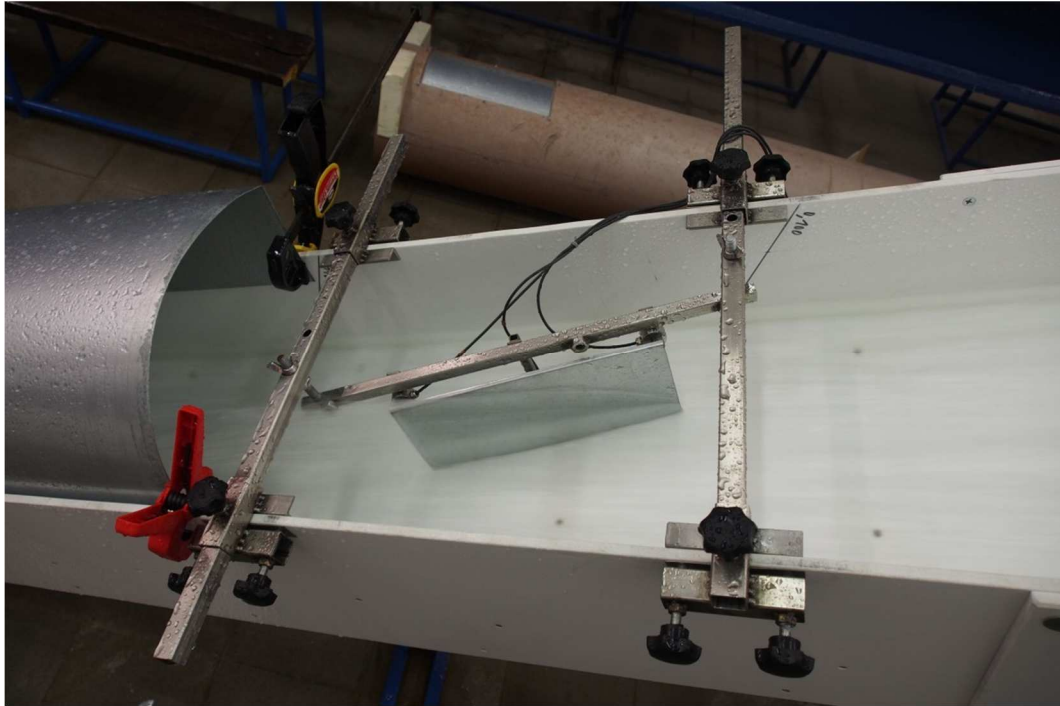
V neposlední řadě bylo nutné ověřit, jaký bude vliv umístění desky v půdorysném uspořádání žlabu na velikost sil. Bylo tedy provedeno měření sil při průtoku $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$ ve dvou konfiguracích:

- deflektor umístěn uprostřed žlabu,
- deflektor umístěn na kraji žlabu.

Z vyhodnocení průběhu sil ve stejném intervalu úhlů natočení deflektoru vyplývá, že větších silových účinků bude dosaženo při umístění *uprostřed* (Příloha č.: 2.5.8). Rozdíl ve velikosti naměřených sil činil zhruba 10 %. To mohlo být způsobeno ztíženými podmínkami obtékání tělesa desky díky působení stěny žlabu na odražený proud. Jev lze pozorovat na obrázku č. 41, kde je představován poměrně velkými výstřiky vody zpoza měřicí desky. Vzhledem k zjištěnému rozdílu byla všechna dále popisovaná měření prováděna uprostřed žlabu.



Obrázek 39 - Graf velikosti sil v závislosti na poloze deflektoru



Obrázek 40 - Umístění uprostřed žlabu [14]



Obrázek 41 - Ovlivnění proudění při umístění u stěny žlabu [14]

5.1.2. Vlastnosti působících sil při $Q = 30 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$

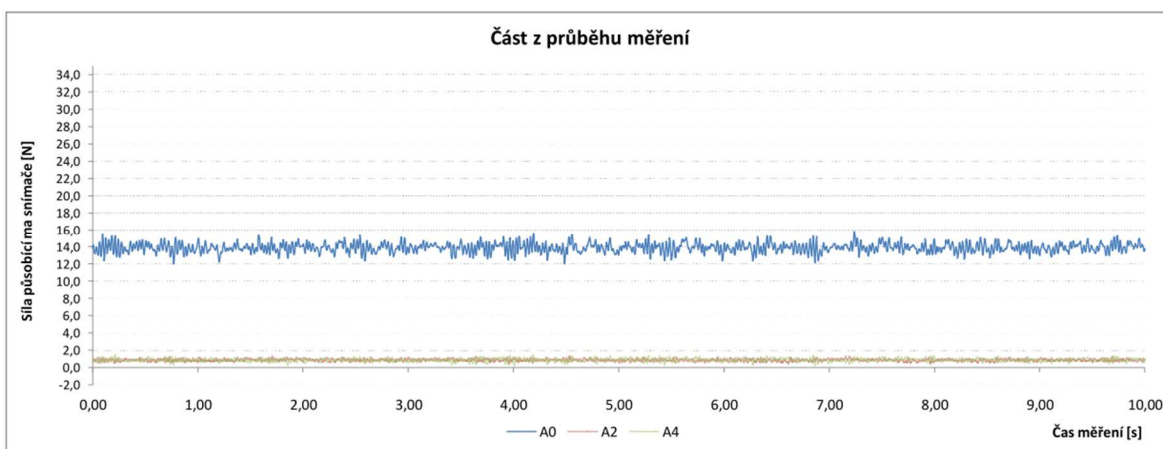
Při této velikosti průtoku bylo naměřeno 10 silových veličin, které odpovídaly stejnému počtu konfigurací. Ze známého průtoku a změřené polohy hladiny byla spočtena průřezová rychlost proudu, která zároveň posloužila jako vstup pro výpočet Froudova kritéria modelové podobnosti. Jeho velikost činila $Fr = 16,12$ dle (5).

Z obrázku č. 43 je patrné, že při úhlu $\alpha = 5,09^\circ$ proud naráží do zadní konstrukce deflektoru (v místě usazení snímače). Tím je ovlivněna výsledná hodnota síly F_o . Navíc záporné číslo poukazuje na fakt, že nebyl naměřen ani hydrostatický tlak u dna žlabu.

Grafy v Přílohách č. 2.1.1. až 2.1.10 poukazují na to, že i při zvětšující se síle na snímači A0 se síly na ostatních snímačích (A2, A4) nijak výrazně nemění a jejich maximální hodnota dosahuje velikosti max 1 N.

Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_o$
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]
30	14,1	16,12	6,00	5,09	-0,334
	14,1			6,20	0,188
	14,1			7,55	1,194
	14,1			8,09	1,565
	14,1			8,95	2,223
	14,1			10,09	3,196
	14,1			11,21	4,067
	14,1			12,53	5,371
	14,1			15,00	7,697
	14,1			20,43	13,979

Tabulka 2 - Velikost naměřených sil při $Q = 30 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 42- Graf z měření konfigurace $Q = 30 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 20,43^\circ$



Obrázek 43 - Měření při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 5,09^\circ$ [14]



Obrázek 44 - Měření při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,43^\circ$ [14]

5.1.3. Vlastnosti působících sil při $Q = 35 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$

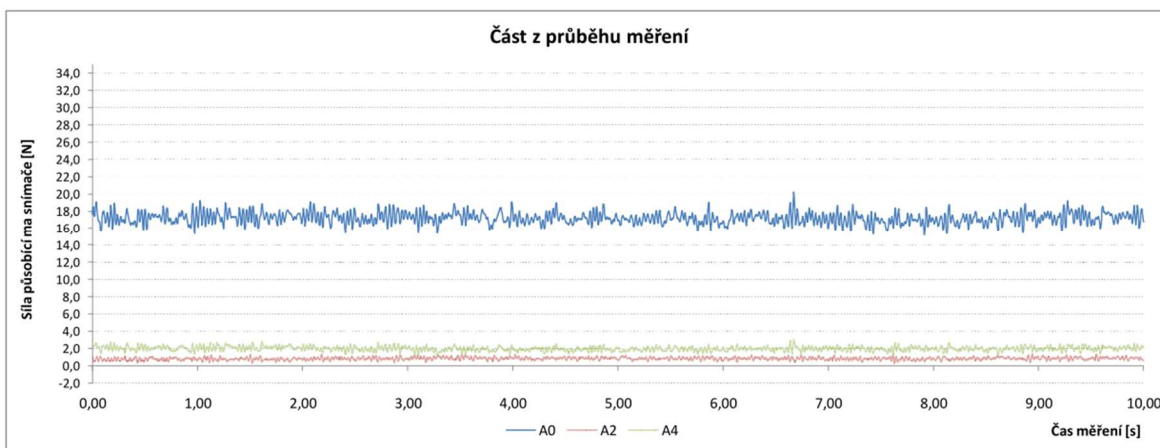
Při této velikosti průtoku bylo naměřeno 6 silových veličin, které odpovídaly stejnému počtu konfigurací. Ze známého průtoku a změřené polohy hladiny byla spočtena průřezová rychlost proudu, která zároveň posloužila jako vstup pro výpočet Froudova kritéria modelové podobnosti. Jeho velikost v tomto případě činila $Fr = 14,85$ dle (5).

Velikost naměřených sil na snímači A0 se pohybuje v rozmezí cca 0,45 N až 17,3 N. Zde již není zadní stavba deflektoru při malém úhlu natočení ovlivňována proudem a výsledné hodnoty síly vypovídají o jejím správném (tlakovém) působení na desku.

Na obrázku č. 47 lze vidět, že odkloněný objem je už natolik velký, že musí být žlab zakryt plechem, aby nedošlo k vytopení laboratoře.

Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_{\text{mod}}$
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]
35	16,5	14,85	5,98	6,20	0,448
	16,6			8,04	2,102
	16,6			10,95	5,452
	16,4			14,10	9,049
	16,4			17,58	13,485
	16,5			20,19	17,257

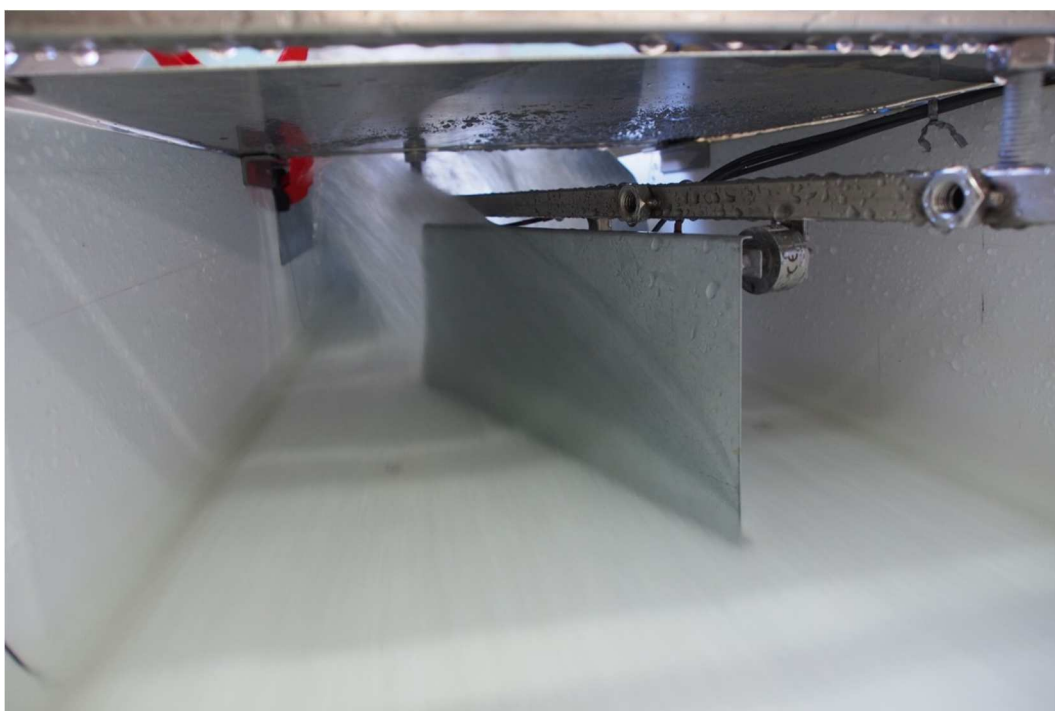
Tabulka 3 - Velikost naměřených sil při $Q = 35 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 45 - Graf z měření konfigurace $Q = 35 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 20,19^\circ$



Obrázek 46 - Měření při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 6,20^\circ$ [14]



Obrázek 47 - Měření při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,19^\circ$ [14]

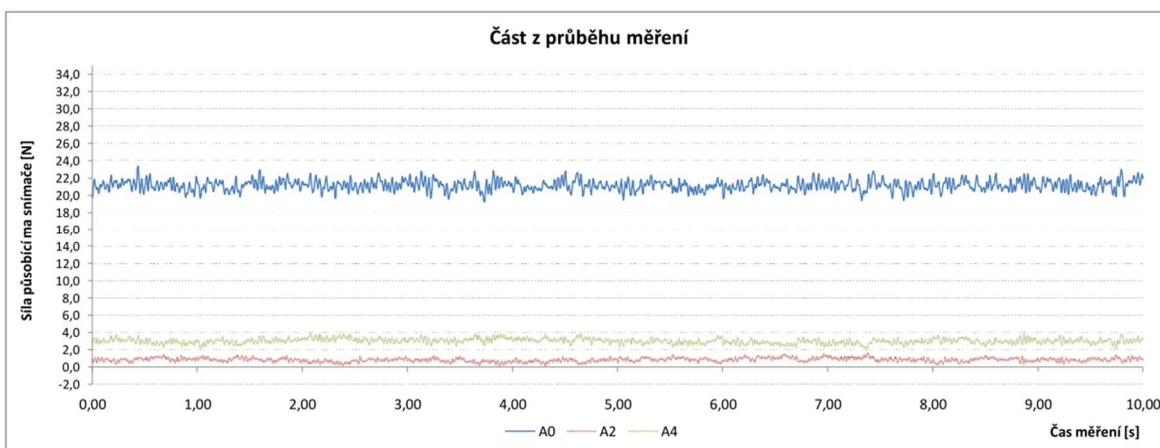
5.1.4. Vlastnosti působících sil při $Q = 45 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$

Při této velikosti průtoku bylo naměřeno 6 silových veličin, které odpovídaly stejnému počtu konfigurací. Ze známého průtoku a změřené polohy hladiny byla spočtena průřezová rychlost proudu, která zároveň posloužila jako vstup pro výpočet Froudova kritéria modelové podobnosti. Jeho velikost zde činila $Fr = 12,33$ dle (5).

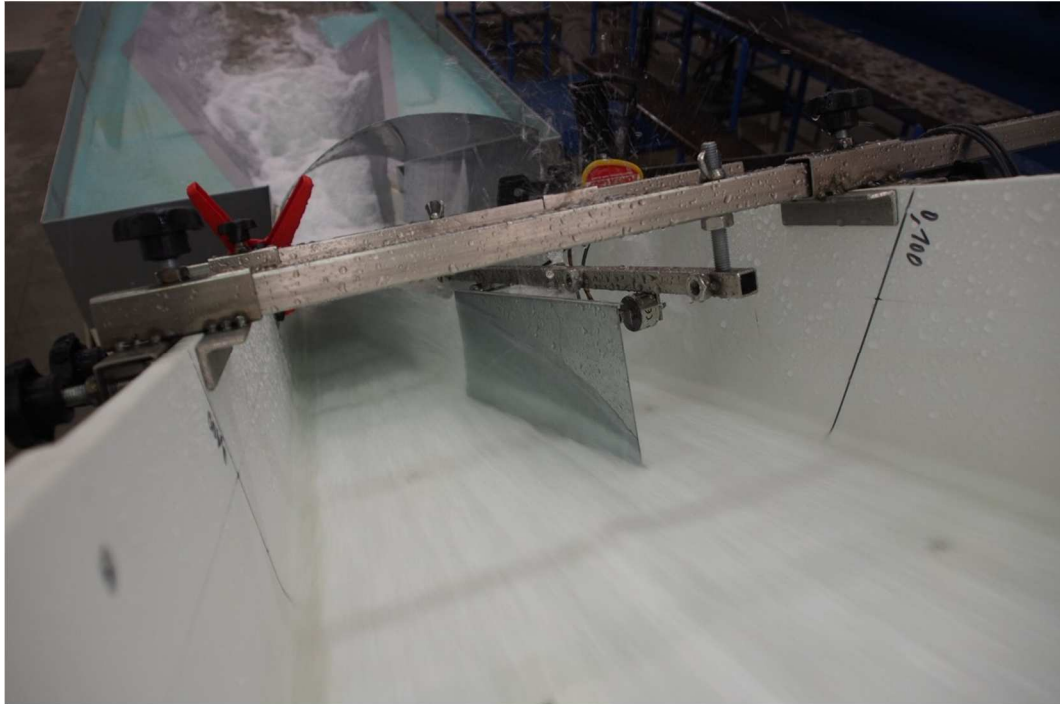
Rozsah sil na snímači A0 byl cca 1,3 N až 21,3 N. Velikost síly na snímači A2 (levý horní roh) se postupně zvětšuje (mění se směr jejího působení z tahového na tlakové). Tento jev je způsoben tím, že s rostoucím úhlem odklonu proudu roste i plocha, na níž proud působí, a tlačaná oblast se tak postupně zvětšuje. Zároveň je možno povšimnout si rostoucí síly na snímači A4 (pravý horní roh) k hodnotám okolo 3 N. Vše je přehledně znázorněno v Přílohách č.: 2.3.1 až 2.3.6.

Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_{\text{mod}}$
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]
45	22,1	12,33	5,74	6,20	1,281
	22,1			8,04	3,435
	22,0			10,95	6,653
	22,2			14,01	10,790
	22,1			17,50	16,370
	22,0			20,11	21,271

Tabulka 4 - Velikost naměřených sil při $Q = 45 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 48 - Graf z měření konfigurace $Q = 45 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 20,11^\circ$



Obrázek 49 - Měření při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 6,20^\circ$ [14]



Obrázek 50 - Měření při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,11^\circ$ [14]

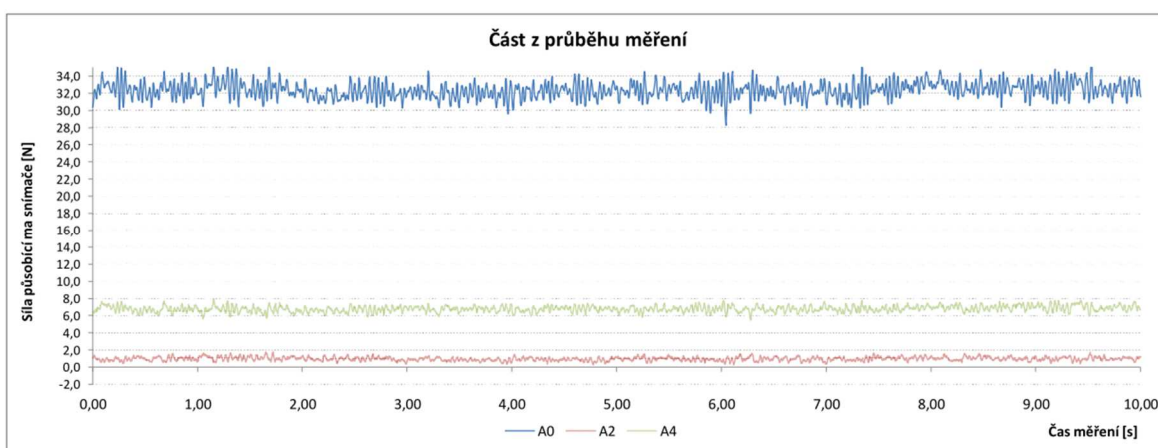
5.1.5. Vlastnosti působících sil při $Q = 60 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$

Při této velikosti průtoku bylo naměřeno opět 10 silových veličin, které odpovídaly stejnému počtu konfigurací. Ze známého průtoku a změřené polohy hladiny byla spočtena průřezová rychlost proudu, která zároveň posloužila jako vstup pro výpočet Froudova kritéria modelové podobnosti. Jeho velikost zde činila $Fr = 10,32$ dle (5).

Rozsah sil na snímači A0 byl cca 0,3 N až 32,6 N. U tohoto měření dochází ke stejnému jevu na snímači A2 jako v předchozím případě. Avšak u takto velkého průtoku a tomu odpovídající velikosti odkláněného proudu vzniká úplav za deflektorem. Snímač A0 tudíž není v tomto místě ovlivněn hydrostatickým tlakem.

Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_{\text{mod}}$
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]
60	30,4	10,32	5,61	4,97	0,291
	30,2			6,30	2,369
	30,1			7,54	4,406
	30,1			8,18	5,663
	30,0			8,95	6,979
	30,1			10,07	9,426
	30,1			11,21	12,431
	30,0			12,48	15,068
	30,1			15,03	20,266
	30,1			20,31	32,567

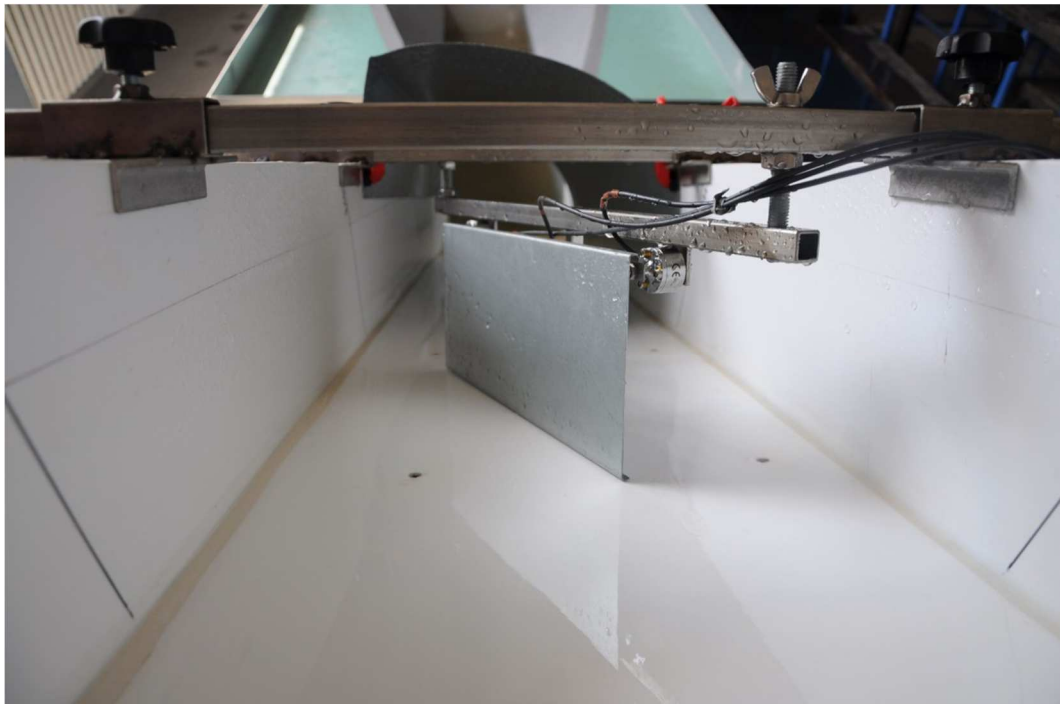
Tabulka 5 - Velikost naměřených sil při $Q = 60 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 51 - Graf z měření konfigurace $Q = 60 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 20,31^\circ$



Obrázek 52 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 4,97^\circ$ [14]



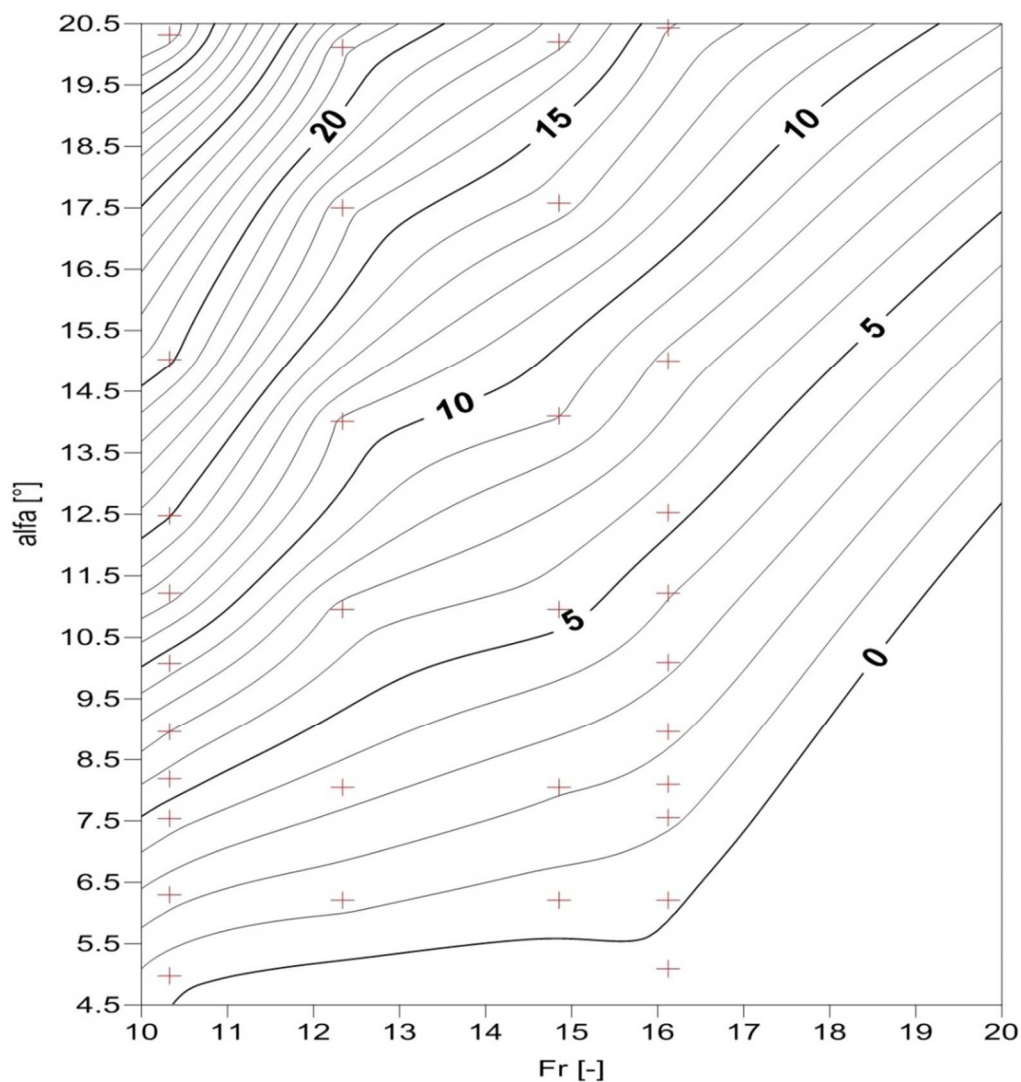
Obrázek 53 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,31^\circ$ [14]

5.1.6. Vyhodnocení

Jak je z předchozích odstavců patrné a jak dokládá výsledková tabulka (Příloha č.: 2.6.1), zvyšuje-li se natočení deflektoru α vůči ose proudu, zvyšuje se taktéž objem odkloněného proudu. Tím pádem musí nutně docházet k nárůstu síly, která na deflektor působí. Vše je dále ovlivňováno množstvím proudící vody ve žlabu nebo chceme-li velikostí Froudova kritéria, jenž poslouží mnohem lépe jako kritérium podobnosti. S klesajícím Froudovým kritériem (průtok a hloubka roste, rychlost zůstává přibližně stejná) dochází taktéž k nárůstu síly. Průběh síly v závislosti na průtoku a úhlu natočení lze vidět v Příloze č.: 2.6.3.

Díky zjištěným hodnotám mohlo dojít k extrapolaci dat mimo měřený interval Froudova kritéria. Na základě toho mohl být popsán trend, jakým se budou hodnoty vyvíjet mimo jeho meze. Extrapolace proběhla v programu Surfer. Výsledek, který lze vidět v obrázku č. 54 v podstatě vystihuje problematiku popsanou výše.

Nutno ovšem zmínit, že výsledné naměřené hodnoty mohou být ovlivněny respektive sníženy o velikost hydrostatického tlaku na zadní straně měřící desky.



Obrázek 54 - Graf závislosti síly na Froudově kritériu a úhlu odklonu proudu

Hydraulický experiment					
Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_{mod}$
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]
30	14,1	16,12	6,00	5,09	-0,334
	14,1			6,20	0,188
	14,1			7,55	1,194
	14,1			8,09	1,565
	14,1			8,95	2,223
	14,1			10,09	3,196
	14,1			11,21	4,067
	14,1			12,53	5,371
	14,1			15,00	7,697
	14,1			20,43	13,979
35	16,5	14,85	5,98	6,20	0,448
	16,6			8,04	2,102
	16,6			10,95	5,452
	16,4			14,10	9,049
	16,4			17,58	13,485
	16,5			20,19	17,257
45	22,1	12,33	5,74	6,20	1,281
	22,1			8,04	3,435
	22,0			10,95	6,653
	22,2			14,01	10,790
	22,1			17,50	16,370
	22,0			20,11	21,271
60	30,4	10,32	5,61	4,97	0,291
	30,2			6,30	2,369
	30,1			7,54	4,406
	30,1			8,18	5,663
	30,0			8,95	6,979
	30,1			10,07	9,426
	30,1			11,21	12,431
	30,0			12,48	15,068
	30,1			15,03	20,266
	30,1			20,31	32,567

Tabulka 6 - Výsledné naměřené hodnoty souhrnně

kde H je výška hladiny ve žlabu, Fr je Froudovo kritérium modelové podobnosti, $\varnothing v$ je průměrná rychlost proudění ve žlabu, α úhel natočení deflektoru a F_{mod} je síla působící na snímač A0.

5.2. Horizontální deflektor

Při experimentálním výzkumu na horizontálně umístěném deflektoru byla celá měřící soustava připevněna ke žlabu v horní části měrné tratě tj. přibližně 0,5 m za přelivem ve směru toku. V této fázi experimentu bylo zapotřebí vytvořit nadkritické proudění kvůli požadavku na tvorbu příčných vln, které byly následně usměrňovány. Toho bylo poměrně snadno dosaženo vhodným rozsahem průtoků a zvoleným místem pro umístění deflektoru.

Díky variabilnímu systému uchycení měřící desky bylo umožněno její nastavení do horizontální roviny a připevnění k pravé stěně žlabu. Půdorysná poloha deflektoru tedy zůstávala během experimentu neměnná. Manipulace probíhala ve směru osy z, tzn., že se měnila vzdálenost deflektoru ode dna žlabu. Tato vzdálenost však nebyla náhodná, nýbrž pečlivě zvolena pro každý z 8 měřených průtoků ($Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, 36 l.s^{-1} , 42 l.s^{-1} , 48 l.s^{-1} , 53 l.s^{-1} , 55 l.s^{-1} , 58 l.s^{-1} , 60 l.s^{-1}).

Jak již bylo vysvětleno v Kapitole 4, při všech průtocích byly voleny tři dílčí polohy deflektoru. Ty se odvíjely od průběhu příčné vlny, která v místě deflektoru vybíhala na stěnu žlabu tak, aby bylo možné stanovit její účinky na měřící desku. Průběh hladiny ve žlabu byl stanoven pomocí hrotového digitálního hladinoměru po svislicích, jejichž osové vzdálenosti byly 3 cm.

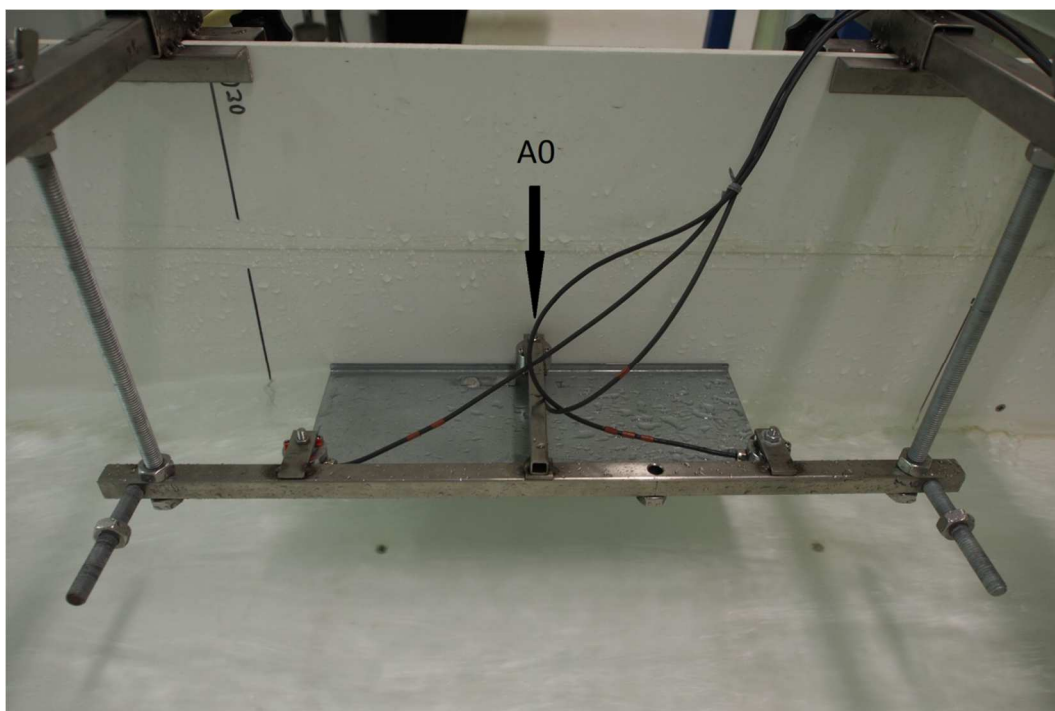
V případě takto (horizontálně) umístěného deflektoru byly směrodatné hodnoty ze všech snímačů. Nadále tedy budeme pracovat se součtem sil ze všech snímačů pro jednotlivé měřené stavy, jelikož vlna svými rozměry ve všech případech ovlivňovala celou plochu deflektoru.



Obrázek 55 - Umístění deflektoru na měrné tratí [14]

5.2.1. Průběh experimentu

Zde není příhodné popisovat každou konfiguraci zvlášť, protože v převážné většině se od sebe jejich průběh nijak významně neliší. Až na výjimky (malé průtoky) snímače vždy vykazovaly snahu vlny tlačit na celou plochu deflektoru. Dle předpokladu bylo nejvyšších silových účinků dosaženo v místě výběhu vlny po stěně skluzu, tedy tam, kde byl umístěn snímač A0.



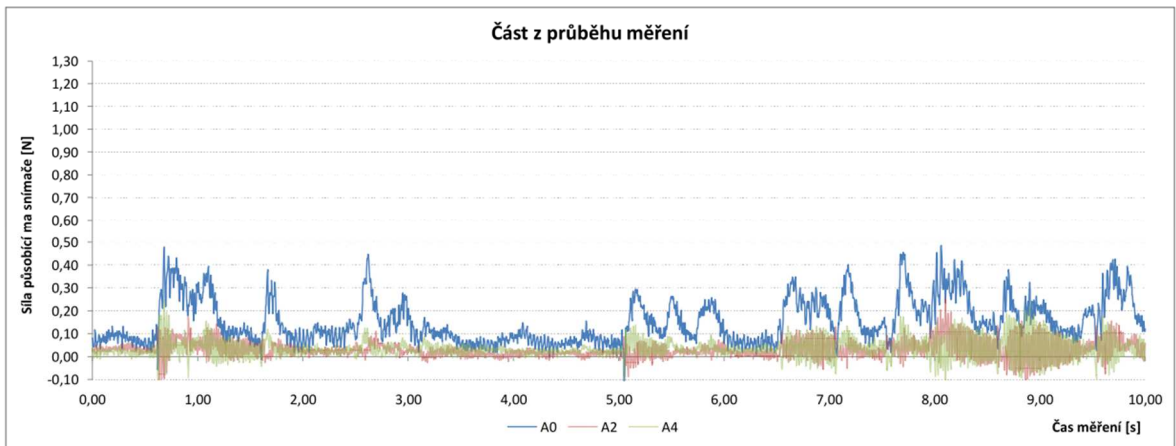
Obrázek 56 - Místo největších silových účinků [14]

Snahou bylo volit polohu deflektoru h_l (vzdálenost ode dna) v úrovních po cca 5 mm tak, aby se ovlivnění vlny zvětšovalo resp., aby se zvyšoval silový účinek vlny na deflektor. To mimo jiné znamenalo snižovat vzájemnou polohu desky a dna žlabu.

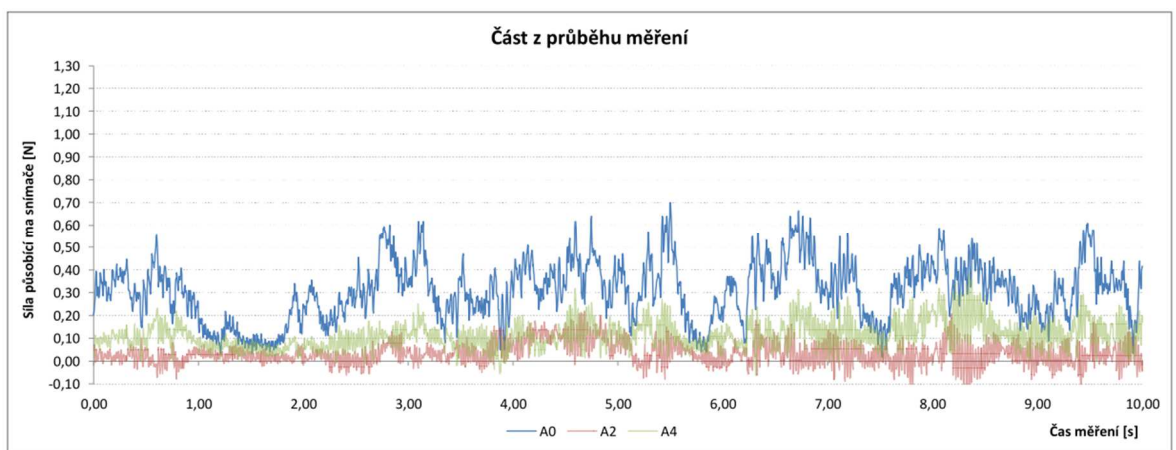
Omezujícím faktorem pro zvýšení usměrňovacích účinků deflektoru byl tvar vlny, kdy při výrazném snížení polohy docházelo k jejímu občasnému přelítí přes horní stranu desky. Se zvyšujícím se průtokem (delší výběhová vlna) muselo při některých měřeních dojít k umístění tenkého plechu před deflektor, který negativní jev eliminoval. To bylo provedeno tak, aby jeho přítomnost nijak neovlivňovala výsledky měření.

Průběh měření je zaznamenán v Přílohách č.: 3.1.1 až 3.8.3. Jasný vývoj silových účinků je demonstrován na následující straně ve třech částech z jednotlivých měření (grafy) pro průtok $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$ ($Fr = 2,207$). Z těch je taktéž patrné, že tvar vlny se mění v čase a působící síly jsou mnohem více rozkolísané než v případě vertikálního usměrňovače. Hodnota h_l v popisu grafu je vzdálenost deflektoru ode dna žlabu.

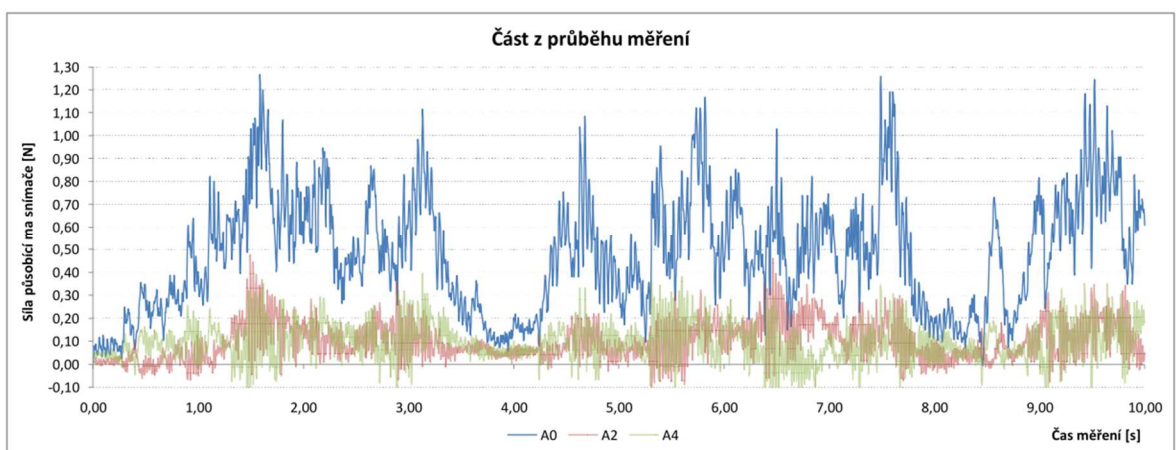
V příloze č.: 3.10 je možno vidět průběh hladiny ve žlabu při měřených stavech.



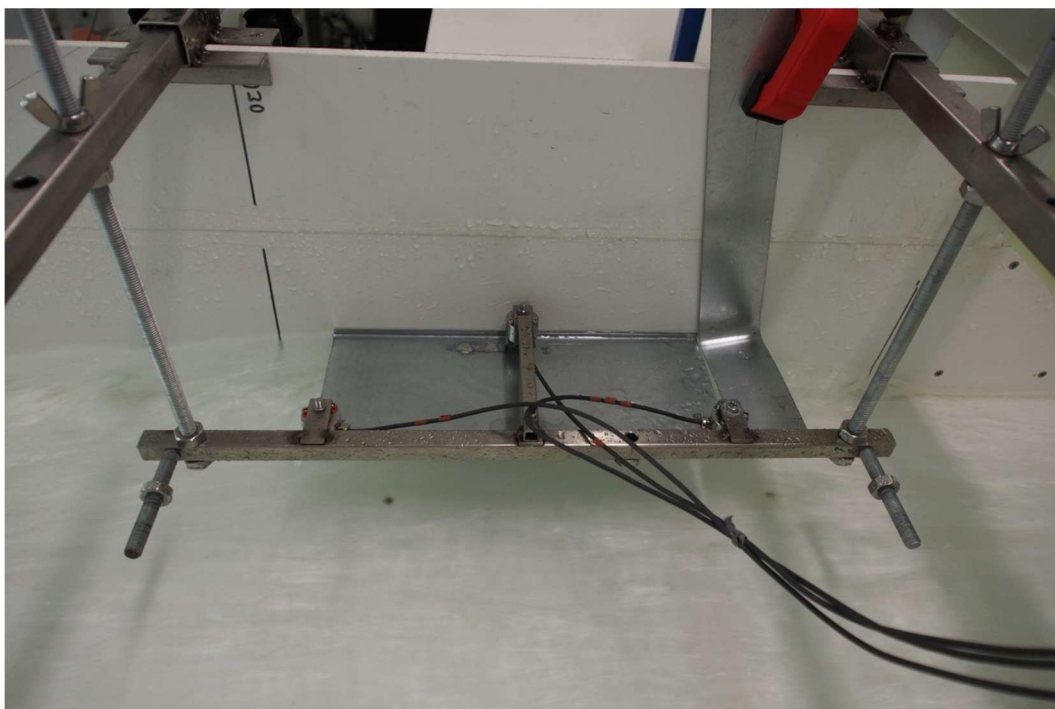
Obrázek 57 – Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 133 \text{ mm}$



Obrázek 58 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 128 \text{ mm}$



Obrázek 59 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 123 \text{ mm}$



Obrázek 60 – Umístění pomocného plechu proti přelévání desky [14]



Obrázek 61 – Usměrnění příčné vlny při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$ [14]

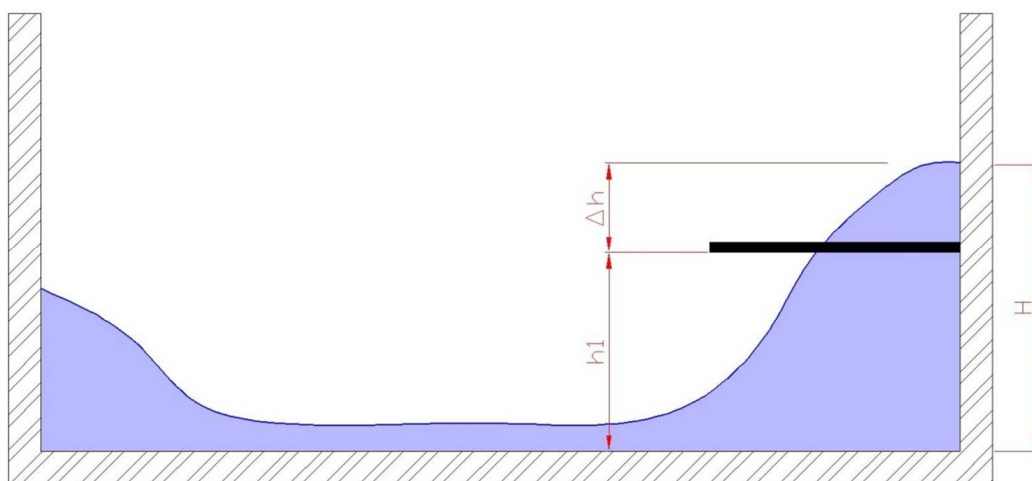
5.2.2. Vyhodnocení

V průběhu experimentu bylo dosahováno hodnot Froudova kritéria modelové podobnosti v rozmezí od 2,939 ($Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$) až po 2,207 ($Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$) dle (5). Tyto zaručovaly vznik nadkritického režimu proudění ($Fr > 1$). Se snižujícím se Froudovým kritériem rostla výška hladiny ve žlabu a zejména výška výběhu vlny po jeho stěně. Avšak tato veličina nabývala v průběhu jednotlivých měření více různých hodnot, jinými slovy výběh vlny by i v delším časovém úseku nebyl konstantní.

Vzniklou situaci dobře popisují grafy částí jednotlivých měření, kde síly naměřené na jednotlivých snímačích vykazují velkou variabilitu. To potvrzují i poměrně velké směrodatné odchylky σ_x při měření (viz Přílohy č.: 3.1.1 až 3.8.3).

Součet sil při měřených konfiguracích se pohyboval v rozmezí 0,063 N až 1,198 N. Nejvyšších hodnot bylo dosahováno při maximálním usměrnění vlny resp. při největších hodnotách Δh . Tato veličina (viz obrázek č. 62) nejlépe vystihuje míru ovlivnění proudu deflektorem a je dána rozdílem výšky výběhu vlny a vzdáleností deflektoru ode dna žlabu. **Zjednodušeně řečeno, pokud veličina Δh roste, zvětšuje se zároveň síla působící na usměrňovací prvek** (viz Tabulka 7).

Zde je nutno zmínit, že faktor nejvíce ovlivňující výsledky měření, je průběh hladiny resp. tvar příčné vlny, jenž se měnil v průběhu experimentu. Dalším poměrně velkým problémem bylo změřit výběh vlny na stěnu žlabu. Rovněž délka deflektoru (300 mm) nedovolovala při nižších průtocích zachytit celý průběh vlny či přesně odhadnout místo jejího největšího výstupu. Jistou možností by bylo použití delší měřicí desky na trati s větším podélným sklonem, kde by vlna měla stálejší tvar, a deflektor by svojí délkou umožňoval lepší zachycení jejího průběhu.



Obrázek 62 - Příčný řez žlabem

Hydraulický experiment				
Q	h_1	Δh	Fr	ΣF_{mod}
[l/s]	[mm]	[mm]	[-]	[N]
30	78	2	2,939	0,328
	73	7		0,559
	68	12		0,866
36	88	5	2,648	0,063
	83	10		0,849
	78	15		1,198
42	98	7	2,510	0,164
	93	12		0,716
	88	17		1,048
48	108	12	2,382	0,292
	103	17		0,657
	98	22		0,914
53	118	7	2,361	0,317
	113	12		0,551
	108	17		0,927
55	123	7	2,347	0,271
	118	12		0,433
	113	17		0,844
58	128	7	2,272	0,294
	123	12		0,509
	118	17		0,729
60	133	5	2,207	0,209
	128	10		0,397
	123	15		0,707

Tabulka 7- Výsledky z měření na horizontálním usměrňovači

kde h_1 je vzdálenost deflektoru ode dna žlabu, Δh je rozdíl výšky výběhu vlny a h_1 , Fr je Froudovo kritérium modelové podobnosti a F_{mod} je součet sil působících na deflektor.

6. Výpočet s využitím zákonů hydrauliky

Pro porovnání naměřených hodnot na hydraulickém modelu lze v tomto případě aplikovat zákony hydrostatiky respektive hydrodynamiky. Jedná se zejména o impulsovou větu (věta o hybnosti) pro ověření vertikálního měření a dále potom zákonitosti výpočtu tlakové síly kapaliny na vodorovné plochy pro ověření dat z horizontálního měření.

6.1. Hydraulické podklady

6.1.1. Impulsová věta

Jedná se vlastně o přizpůsobení impulsové věty z mechaniky hmotného bodu na ustálený proud kapaliny. Při jejím použití uvažujeme jen účinky na omezený výsek proudu, nemusíme přitom znát ani podrobnosti o proudění, ani ztráty, které v tomto úseku vznikají. Musíme však znát všechny síly, které na kapalinu ve výseku proudu působí.

Působí-li na hmotný bod o hmotnosti m stálá síla \mathbf{F} , mění se rychlost \mathbf{u} . Protože se jedná o vektory, jsou označeny silně. Podle Newtonova zákona platí:

$$F = m \frac{Du}{Dt} \quad (30)$$

Integrací v časovém intervalu od t_1 do t_2 , v němž se vektor rychlosti mění z \mathbf{u}_1 na \mathbf{u}_2 , dostaneme:

$$m(u_2 - u_1) = F(t_2 - t_1) \quad (31)$$

Součin hmoty a rychlosti je definován jako hybnost daného bodu, součin síly a časového intervalu jako impuls síly.

Přejdeme-li od hmotného bodu k ustálenému proudění kapalin, je účelné zvolit časový interval $t_2 - t_1$ rovný jedné sekundě. Každým průřezem proteče za tuto dobu hmota ρQ , jejíž hybnost je $\rho Q \mathbf{u}$. Poněvadž jsme přešli od bodové rychlosti k průřezové, tedy od nerovnoměrného rozdělení rychlostí v průřezu k fiktivnímu průměrnému, zavádí se při výpočtech korekční součinitel β (Boussinesqovo kritérium):

$$\beta = \frac{\int_S u^2 dS}{v^2 S}. \quad (32)$$

Boussinesqovo kritérium tedy vyjadřuje vliv nerovnoměrného rozdělení rychlostí na velikost hybnosti proudu. V pravidelných průtočných profilech se často dosazuje $\beta \approx 1$.

Vyjmeme-li z proudu kapaliny část ohraničenou pevnými stěnami (dno, břehy, atd.) a dvěma průtočnými profily „1“ a „2“, v nichž jsou vektory průřezových rychlostí \mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_2 , můžeme psát:

$$\beta\rho Q(v_2 - v_1) = \Sigma F = F_{TLAK} + F_{OBJ} + F_A \quad (33)$$

kde ΣF značí vektorový součet vnějších sil působících na uvažovaný výsek proudu kapaliny, F_{TLAK} je síla tlaková, F_{OBJ} síla objemová a F_A tlaková síla vedení působící na kapalinu [9].

6.1.2. Tlak v kapalině

Uvažujme kapalinu bez pohybu (v klidu), která působí na element plochy dS tlakovou silou dF . V kapalině nepůsobí za rovnovážného stavu – v klidu smyková napětí. Kdyby se směr výsledné síly dF odchyloval od normály, mohli bychom tuto sílu rozložit na složku normálovou (působící kolmo na dS) a smykovou (působící v rovině plochy dS). Smyková složka by způsobila pohyb, za klidu však v kapalině nepůsobí žádné tření, které by jediné mohlo působit proti smykové složce a udržovat ji tak v rovnováze.

Odtud plyne důležitý závěr:

Síly, které působí na libovolnou rovinnou plochu v kapalině za klidu, musí být na tuto plochu kolmé.

Diferenciální poměr:

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (34)$$

nazýváme tlak kapaliny v daném bodě. Na kapalinu, která je v klidu a na kterou působí jen tíže, působí ve všech bodech libovolné vodorovné roviny stejný tlak. A to proto, že každý bod takové roviny je ve stejné hloubce pod volnou hladinou. Vodorovné roviny jsou tedy plochy rovňové. Obecně je výslednice tlaku dána integrálem:

$$F = \int_S p dS, \quad p = \rho gh \quad (35)$$

kde S je velikost zatěžované plochy.

6.2. Výpočet – vertikální deflektor

Jak již bylo napsáno, při řešení účinku proudu na stěny potrubí a na plochy umístěné v proudu kapaliny se uplatní věta o hybnosti. Vlivem změny směru nebo rychlosti proudění dochází mezi proudem a deskou deflektoru k vzájemnému silovému účinku. Platí tedy impulsová věta ve tvaru (33). V tomto případě je nutno větu modifikovat pro naši konfiguraci. Neznáme Boussinesqovo kritérium, ale vzhledem k poměrně ustáleným poměrům ve žlabu jej budeme uvažovat $\beta = 1$. Předpokládáme tedy ohyb proudu o úhel α (tečně s plochou odtoku), který byl stanoven již při experimentu. Rovnice (33) nabývá nového tvaru:

$$F = \rho Q \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2} v. \quad (36)$$

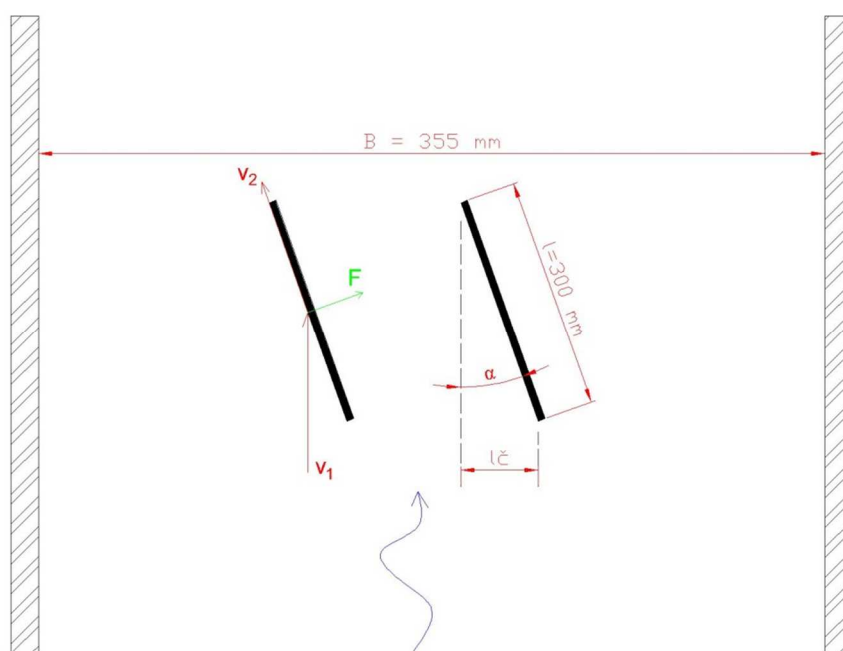
Dále uvažujme, že neohýbáme celý průtok, ale pouze jeho část ΔQ , kterou vyjádříme z průmětu plochy desky usměrňovače do směru nátoky:

$$\Delta Q = Q \cdot \frac{l_{\xi}}{B}, \quad (37)$$

$$l_{\xi} = \sin \alpha \cdot l, \quad (38)$$

kde Q je průtok žlabem, l_{ξ} je průmět délky deflektoru do směru nátoky, l je délka deflektoru (0,3 m), α je úhel ohybu proudu a B je šířka žlabu v místě měření (viz obrázek č. 63). Z úprav dostáváme výslednou rovnici použitou při výpočtu:

$$F = \rho \cdot Q \cdot \frac{\sin \alpha \cdot l}{B} \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2} v \quad (39)$$



Obrázek 63 - Půdorys žlabu s vyznačenými veličinami

Nakonec proběhla aplikace vzorce (39) na naměřené hodnoty úhlů a průtoků z experimentu a výpočet v aplikaci MS Excel. Vypočtené síly lze vidět v následující tabulce ve sloupci F_{num} (viz. Příloha č.: 2.6.1). Porovnání naměřených a vypočtených hodnot následuje v Kapitole 7.

Hydraulický experiment						Numerické řešení	
Q	H	Fr	$\varnothing v$	α	$\varnothing F_{mod}$	ΔQ	F_{num}
[l/s]	[mm]	[-]	[m/s]	[°]	[N]	[l/s]	[N]
30	14,1	16,12	6,00	5,09	-0,334	2,25	1,199
	14,1			6,20	0,188	2,74	1,777
	14,1			7,55	1,194	3,33	2,632
	14,1			8,09	1,565	3,57	3,022
	14,1			8,95	2,223	3,95	3,693
	14,1			10,09	3,196	4,44	4,687
	14,1			11,21	4,067	4,93	5,775
	14,1			12,53	5,371	5,50	7,196
	14,1			15,00	7,697	6,56	10,263
	14,1			20,43	13,979	8,85	18,812
35	16,5	14,85	5,98	6,20	0,448	3,19	2,064
	16,6			8,04	2,102	4,14	3,466
	16,6			10,95	5,452	5,62	6,402
	16,4			14,10	9,049	7,20	10,563
	16,4			17,58	13,485	8,93	16,306
	16,5			20,19	17,257	10,21	21,392
45	22,1	12,33	5,74	6,20	1,281	4,11	2,550
	22,1			8,04	3,435	5,32	4,281
	22,0			10,95	6,653	7,22	7,912
	22,2			14,01	10,790	9,21	12,890
	22,1			17,50	16,370	11,44	19,971
	22,0			20,11	21,271	13,07	26,207
60	30,4	10,32	5,61	4,97	0,291	4,39	2,137
	30,2			6,30	2,369	5,56	3,431
	30,1			7,54	4,406	6,65	4,907
	30,1			8,18	5,663	7,22	5,778
	30,0			8,95	6,979	7,89	6,912
	30,1			10,07	9,426	8,87	8,737
	30,1			11,21	12,431	9,86	10,810
	30,0			12,48	15,068	10,95	13,356
	30,1			15,03	20,266	13,15	19,292
	30,1			20,31	32,567	17,60	34,825

Tabulka 8 – Vypočtené silové účinky v porovnání s naměřenými hodnotami

6.3. Výpočet – horizontální deflektor

Pro výpočet síly od horizontálně usměrněné vlny lze v tomto případě použít rovnici (35), nicméně je třeba ji také modifikovat pro tuto situaci. Místo odrazu křížové vlny stejně tak, jako její úhel, pod kterým ke stěně žlabu „přichází“, je funkcí (5). Avšak úhel nebyl během experimentu měřen, protože ke stanovení výšky výběhu bylo použito měření hladiny pomocí hrotového hladinoměru.

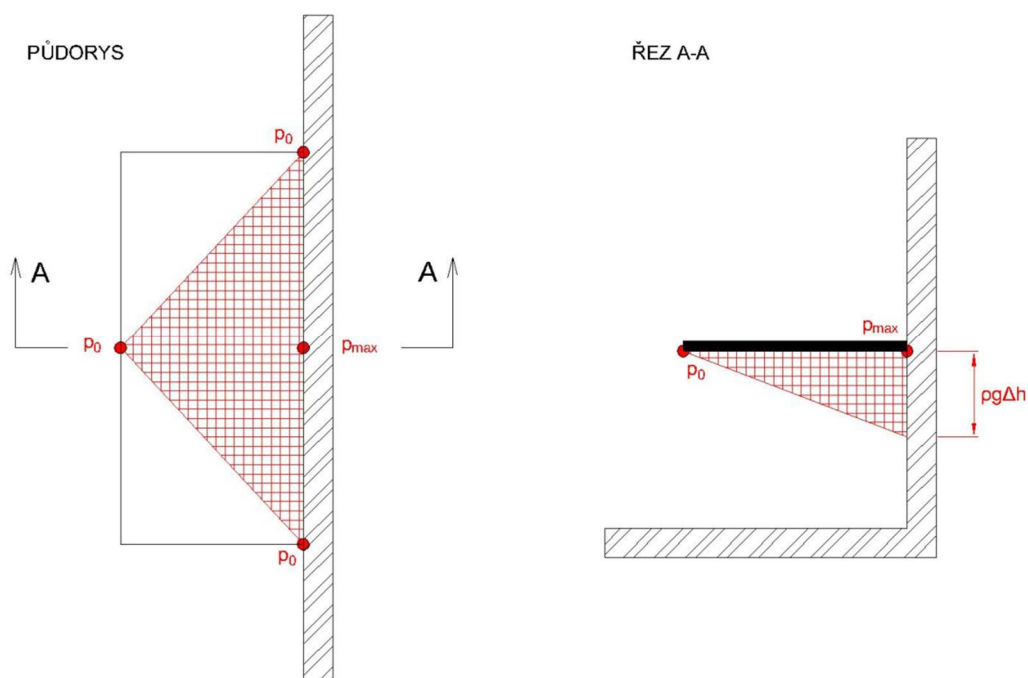
Z průběhu hladiny ve žlabu a polohy deflektoru vůči dnu byla vypočtena hodnota Δh jako prostý rozdíl výšky výběhu vlny a již zmiňované polohy deflektoru (viz obrázek č. 62). Tato veličina pak vstupovala do rovnice (35).

V té se navíc vyskytuje další neznámá, konkrétně plocha S , která vymezuje plochu dotyku vlny a deflektoru. Tlak od omezené vlny se po této ploše integruje a vzniká tak výsledná působící síla F . Nicméně plochu S nelze během experimentu žádným způsobem změřit. Je tedy na místě přijmout zjednodušující opatření pro integrál plochy.

Z experimentu víme, že největší silový účinek se nachází v místě těsně u stěny žlabu a zhruba uprostřed měřicí desky. Toto místo označíme jako p_{max} . Dále víme, že směrem k okrajům desky se tlak snižuje. Krajiní body tedy označíme p_0 a prohlásíme, že síla působící v těchto bodech je rovna 0 N. Pro takto umístěné okrajové zatěžovací podmínky vzniká zjednodušená plocha dotyku S (viz obrázek č. 64).

$$p_{max} = \rho g \Delta h, \quad (40)$$

$$p_0 = 0, \quad (41)$$



Obrázek 64 - Půdorys a řez zatěžované plochy S

Z obrázku č. 64 dále zjistíme, že ½ půdorysné plochy deflektoru je zatěžována ne-symetricky (viz Řez A-A). Po zvážení všech předpokladů lze rovnici (35) upravit takto:

$$F = \int_S p dS = p_{max} \int_S dS = p_{max} \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot S = 0,125 \cdot S \cdot p_{max}, \quad (42)$$

kde S je půdorysná plocha deflektoru (0,30 x 0,13 m) a p_{max} je maximální hydrostatický tlak vypočtený dle rovnice (40).

Stejně jako u vertikálního deflektoru i zde došlo k aplikaci vzorce (42) na naměřené hodnoty Δh v aplikaci MS Excel. Výsledky výpočtu jsou prezentovány v následující tabulce, celý výpočet včetně srovnání s naměřenými hodnotami sil jsou v Příloze č.: 3.9.

Hydraulický experiment					Empirické řešení			
Q	h_1	Δh	Fr	ΣF_{mod}	Δh	p_{max}	l_s	F_{num}
[l/s]	[mm]	[mm]	[-]	[N]	[mm]	[N]	[-]	[N]
30	78	2	2.939	0.328	2	20	0.125	0.096
	73	7		0.559	7	69	0.125	0.335
	68	12		0.866	12	118	0.125	0.574
36	88	5	2.648	0.063	5	49	0.125	0.239
	83	10		0.849	10	98	0.125	0.478
	78	15		1.198	15	147	0.125	0.717
42	98	7	2.510	0.164	7	69	0.125	0.335
	93	12		0.716	12	118	0.125	0.574
	88	17		1.048	17	167	0.125	0.813
48	108	12	2.382	0.292	12	118	0.125	0.574
	103	17		0.657	17	167	0.125	0.813
	98	22		0.914	22	216	0.125	1.052
53	118	7	2.361	0.317	7	69	0.125	0.335
	113	12		0.551	12	118	0.125	0.574
	108	17		0.927	17	167	0.125	0.813
55	123	7	2.347	0.271	7	69	0.125	0.335
	118	12		0.433	12	118	0.125	0.574
	113	17		0.844	17	167	0.125	0.813
58	128	7	2.272	0.294	7	69	0.125	0.335
	123	12		0.509	12	118	0.125	0.574
	118	17		0.729	17	167	0.125	0.813
60	133	5	2.207	0.209	5	49	0.125	0.239
	128	10		0.397	10	98	0.125	0.478
	123	15		0.707	15	147	0.125	0.717

Tabulka 9 - Vypočtené silové účinky v porovnání s naměřenými hodnotami

7. Vyhodnocení měření

Vzhledem k situaci, že ne vždy je orgánům spravujícím vodní díla umožněno, ať už z finančních nebo jiných důvodů, vyrábět fyzikální model a provádět hydraulická měření, je příhodné, pro použití horizontálních či vertikálních usměrňovacích prvků, doporučit metodiku výpočtu pomocí zjednodušených zákonitostí hydrauliky. Následující odstavce přistupují k porovnání měření na fyzikálním modelu spolu s výpočty, které vycházejí z upravených empirických vzorců.

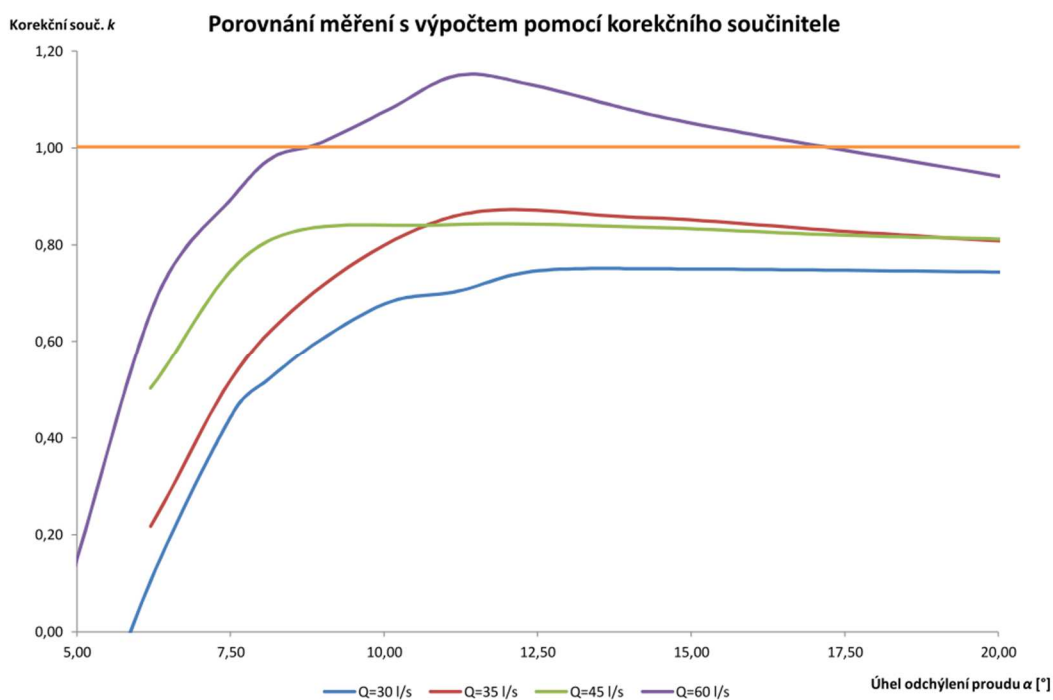
7.1. Dimenzování vertikálního usměrňovače

Pro porovnání experimentální části s výpočty nejlépe poslouží tzv. korekční součinitel, který je dán podílem obou hodnot a slouží i jako procentuální vyjádření jejich rozdílu. Součinitel k je dán jako:

$$k = \frac{F_{mod}}{F_{num}}, \quad (43)$$

kde F_{mod} jsou síly naměřené při experimentu a F_{num} jsou síly vypočtené dle impulsové věty (39). Pokud je součinitel k roven 1 znamená to, že výsledky obou metod jsou totožné.

Číselné vyjádření výsledků porovnání je v Příloze č.: 2.6.1. Pro názornost je lepší použít vyjádření grafické (viz obrázek č. 64). V grafu je vynesena průběh korekčního součinitele v závislosti na úhlu natočení deflektoru pro všechny čtyři měřené průtoky.



Obrázek 65 - Průběh korekčního součinitele

Z grafu je jasně patrné, že pro průtoky $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, 35 l.s^{-1} a 45 l.s^{-1} se součinitel ustálí přibližně kolem hodnoty $0,70 \sim 0,85$ při úhlu natočení cca 10° . Pro úhly menší než 10° korekční součinitel rapidně klesá. To je s největší pravděpodobností dáno samotnou konstrukcí měřicí desky. Na její zadní straně se totiž nacházel čtvercový železný profil, ke kterému byla deska přichycena. Do něj při experimentu narážel proud vody, který tak mohl ovlivnit hodnoty měřené na snímači A0.

Další zjištěním pro tyto průtoky je fakt, že součinitel nedosáhl hodnoty rovno 1, tedy, že měřené a vypočtené hodnoty nebyly totožné. Tento jev má poměrně jednoduché vysvětlení. Výpočet pomocí rovnice (39) totiž neuvažuje tlak, který působí na zadní stranu deflektoru a který snižuje síly naměřené na snímači.

Průtok $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$ vykazuje poměrně jiné chování korekčního součinitele. Ten při hodnotách kolem 9° natočení deflektoru přechází přes hodnotu 1. To znamená, že naměřené hodnoty jsou dokonce větší než hodnoty vypočtené. Odůvodněním může být vznik úplavové zóny za deflektorem, tedy jevem, kdy není snímač ovlivňován tlakem od proudu vody. Nicméně u takto velkého ohýbaného průtoku už měření nevykazuje takovou míru spolehlivosti výsledků jako ty předešlé.

Z výsledků porovnání je tedy možné doporučit rovnici (39) pro další použití při dimenzování vertikálních prvků. Naskýtá se možnost vypočtené hodnoty korigovat (zmenšit) korekčním součinitelem, který by se v tomto případě mohl pohybovat v rozmezí $0,85 \sim 1,00$. Nutno však podotknout, že ne vždy musí být deflektor při svém obtékání zatížen silami proudu z obou stran. V tom případě je z hlediska bezpečnosti spolehlivější použít výsledky z rovnice (39) nekorigované.

7.2. Dimenzování horizontálního usměrňovače

I v tomto případě byl použit korekční součinitel pro srovnání hodnot. Jeho výpočet byl naprosto totožný s výše uvedeným případem (43). Zde však nebylo příhodné použití grafického vyjádření, jelikož pro každý průtok jsou měřeny pouze 3 stavy polohy deflektoru, a proto bylo nakonec přistoupeno k tabulkovému porovnání (viz Tabulka 10). Úplný tabulkový zápis se nachází v Příloze č.: 3.9.

Q	h_1	Δh	ΣF_{mod}	F_{num}	k
[l/s]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[-]
30	78	2	0,328	0,096	3,43
	73	7	0,559	0,335	1,67
	68	12	0,866	0,574	1,51
36	88	5	0,063	0,239	0,26
	83	10	0,849	0,478	1,78
	78	15	1,198	0,717	1,67
42	98	7	0,164	0,335	0,49
	93	12	0,716	0,574	1,25
	88	17	1,048	0,813	1,29
48	108	12	0,292	0,574	0,51
	103	17	0,657	0,813	0,81
	98	22	0,914	1,052	0,87
53	118	7	0,317	0,335	0,95
	113	12	0,551	0,574	0,96
	108	17	0,927	0,813	1,14
55	123	7	0,271	0,335	0,81
	118	12	0,433	0,574	0,76
	113	17	0,844	0,813	1,04
58	128	7	0,294	0,335	0,88
	123	12	0,509	0,574	0,89
	118	17	0,729	0,813	0,90
60	133	5	0,209	0,239	0,87
	128	10	0,397	0,478	0,83
	123	15	0,707	0,717	0,99

Tabulka 10 – Porovnání získaných hodnot pomocí korekčního součinitele

Do průtoku $Q = 48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou hodnoty korekčního součinitele v převážné většině větší než 1 a to i s poměrně velkým rozdílem. Nastalá situace je pravděpodobně způsobena vlastnostmi vznikajících vln, konkrétně velikostí a s ní spojeným výběhem po stěně žlabu. Při nízkých průtocích jsou totiž vlny malé a je velice obtížné změřit jejich průběh.

Od zmiňovaného průtoku včetně se hodnoty součinitele začínají přibližovat číslu 1, a pokud bychom vyjádřili jejich průměrnou hodnotu, bude se pohybovat přibližně kolem

čísla 0,90. V těchto případech již byla vlna větší a tím i plocha, kterou byl tlačena měřicí deska. Čili i výsledky nabývají na věrohodnosti.

Při této poloze deflektoru je výsledek ovlivněn z obou stran. A to jak ze strany experimentální části, tak z části s využitím zákonů hydrostatiky. Na té jedné je to právě jistá kompaktnost vlny, která je usměrňována. Ta, jak už bylo zmíněno v Kapitole 5.2.2, je v průběhu měření nestálá a tím pádem jsou měřené hodnoty hodně rozkolísané. Na straně druhé to je stanovení výšky výběhu, které vstupuje do rovnice (42) a tím výsledky silně ovlivňuje.

Nastává tedy otázka, zda je pro praxi možné použít rovnici (42) a stanovit tak tlakové síly bez zdlouhavého měření na fyzikálním modelu. **S přihlédnutím k výsledkům měření je možné rovnici (42) doporučit pro dimenzování horizontálních usměrňovačů a výsledné hodnoty korigovat součinitelem v rozmezí 0,90 ~ 1,00.** Vždy by ale měla proběhnout úvaha, zda je korekce o jednu desetinu nutná právě vzhledem k bezpečnosti na vodním díle.



Obrázek 66 - Příklad úspěšně používaných usměrňovačů na VD Souš [3]

7.3. Doporučení pro další aplikace při stanovení zatížení usměrňovacích prvků

V případě, že modelový výzkum prokáže nutnost použití deflektorů na bezpečnostních objektech vodních děl, je možné prvky dimenzovat na působení sil vycházejících ze vzorců, které jsou uvedeny v Kapitole 6, aniž by bylo potřeba tyto složité měřit a vyhodnocovat. Samozřejmě, že síly od proudu vody nejsou jedinými faktory, které návrh ovlivňují, ale jsou ve své podstatě nejdůležitější.

Chceme-li v praxi dimenzovat **vertikálně umístěný deflektor**, dají se síly od usměrňovaného proudu spolehlivě určit podle vztahu (39):

$$F = \rho \cdot Q \cdot \frac{\sin \alpha \cdot l}{B} \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2} v ,$$

kde ρ značí specifickou hmotnost vody, Q průtok bezpečnostním objektem, α úhel odchýlení proudu, l půdorysnou délku deflektoru, B šířku v hladině a v průřezovou rychlost vody.

Vypočtenou sílu je navíc možno redukovat korekčním koeficientem v rozmezí 0,85 ~ 1,00 v případě, že uvažujeme i tlak vody z úplavové strany deflektoru.

Pokud výzkum doporučí **použití horizontálního deflektoru**, je výpočet sil proveditelný dle vztahů (40) a (42):

$$p_{max} = \rho g \Delta h ,$$

$$F = 0,125 \cdot S \cdot p_{max} ,$$

kde ρ je specifická hmotnost vody, g tíhové zrychlení, Δh původní výška výstupu vlny nad úrovní spodní plochy deflektoru (viz obrázek 62) a S je půdorysná plocha navrhovaného deflektoru.

Takto získané hodnoty lze korigovat korekčním koeficientem v rozsahu 0,90 ~ 1,00.

Síly vypočtené z předchozího doporučení lze s úspěchem použít při stanovení zatížení usměrňovacích prvků od proudu vody. Další druhy vznikajících sil (např. připevnění ke konstrukci bezpečnostních objektů, pnutí v materiálu, atd.) jsou již předmětem zkoumání jiných vědních oborů.

8. Závěr

Úlohou diplomové práce bylo měření silových účinků proudu na usměrňovací prvky a dále tvorba zjednodušující metodiky pro jejich dimenzování pomocí zákonů hydrauliky. Měření se uskutečnilo na hydraulickém modelu skluzu VD Boskovice, jenž je umístěn v budově F areálu FAST VUT v Brně.

Měření probíhala ve dvou konfiguracích deflektorů. V první sestavě byl deflektor umístěn do vertikální polohy, přičemž docházelo k různému natočení deflektoru vůči proudu a měření sil působících na deflektor. Z výsledků měření je patrné, že nárůst síly je téměř lineární s nárůstem úhlu, s tím je také spojen růst síly působící na usměrňovací prvek.

V druhé konfiguraci byl deflektor v poloze horizontální a usměrňovány tak byly příčné vlny vzniklé za spadištěm. Měření bylo uskutečněno opět při různých průtocích a v několika polohách deflektoru vůči vzniklé vlně. Naměřené hodnoty potvrzují tezi, že snižující se vzdálenost usměrňovače ode dna žlabu a tím vyvolané zvýšení faktoru usměrnění vlny, zvyšují silové účinky na deflektor.

Výsledky měření byly poté porovnány s výpočty dle zjednodušených zákonů hydrauliky. Konkrétně se jednalo o větu impulsovou a zákony hydrostatiky. U obou případů však bylo nutno přijmout jistá zjednodušení a úměrně modifikovat vzorce pro naše použití.

Z porovnání obou metod lze vyvodit závěr, že použité zjednodušené zákonitosti hydraulické lze použít pro dimenzování navrhovaných usměrňovacích prvků prověřených nejčastěji kvalitativně modelovými zkouškami, které jsou při modernizaci bezpečnostních objektů vodních děl velmi často součástí projektové přípravy.

9. Seznam použitých zdrojů

1. ŠULC, J. a M. ŽOUŽELA. Výzkum eliminace příčných vln na hydraulickém modelu skluzu bezpečnostního přelivu VD Těrlicko. In: *HYDRODYNAMIKA 2006*. Vodní hospodářství 10/2007, 2007, s. 345-49.
2. ŠULC, J. a M. ŽOUŽELA. *Hydraulický modelový výzkum kapacity přelivu a skluzu se zvýšenými bočními stěnami VD Dalešice*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV-FAST-VUT, 2009.
3. ŠULC, J. *Hydraulický modelový výzkum komory segmentových uzávěrů ve štole spodních výpustí VD Souš*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV-FAST-VUT, 2000.
4. ŠULC, J. *Modelový výzkum úpravy skluzu VD Těrlicko pro převádění zvýšených povodňových průtoků*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV-FAST-VUT, 2006.
5. ŠULC, J. a M. ŽOUŽELA. *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního šachtového přelivu a odpadní štolý VD Karolinka*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV-FAST-VUT, 2006.
6. ŠULC, J. a M. ŽOUŽELA. *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV-FAST-VUT, 2013.
7. MATOUŠEK, V. *Hydraulika otevřených koryt* [prezentace]. Praha: 2007.
8. *Wikipedia.en* [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/>
9. JANDORA, J. a J. ŠULC. *Hydraulika*. Studijní opora. Brno: VUT FAST v Brně, 2006.
10. JOBÁNEK, S. *Určení bezpečné hloubky ponoru vtoku MVE Vydra 2*. 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
11. JIANG, Q. a R. B. SMITH. V-waves, bow shocks, and wakes in supercritical hydrostatic flow. In: *J. Fluid Mech.* vol. 406. Cambridge University Press, 2000, s. 27-53.
12. CHEN, Q. G. DAI a H. LIU. Volume od Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation od Stepped Spillway Overflow. In: *J. Hydraul. Eng.* No.128. 2002, s. 683.
13. SONG, C. C. S. a F. ZHOU. Simulation od Free Surface Flow over Spillway. In: *Journal of Hydraulic Engineering.* vol. 125, No.9. 1999, s. 959-67.
14. HÖLL, J. *Fotodokumentace* [fotografie]. Brno: 2013.
15. HÖLL, J. *3D vizualizace* [obrázek]. Brno: 2013.

10. Seznam zkratek a symbolů

α	[°]	úhel ohýbaného proudu vertikálním deflektorem
a	[m.s ⁻²]	zrychlení
β	[-]	Boussinesquovo kritérium
B	[mm]	šířka žlabu
E_d	[m]	energie průřezu
F	[N]	síla
F_0	[N]	síla působící na snímač A0
Fr	[-]	Froudovo kritérium
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
H	[mm]	hloubka vody ve žlabu
h_1	[mm]	vzdálenost horizontálního deflektoru ode dna žlabu
Δh	[mm]	působící výška výstupu vlny nad úroveň deflektoru
k	[-]	korekční součinitel
L	[mm]	délka
l_ξ	[mm]	průmět délky deflektoru do směru toku
m	[kg]	hmotnost
MKP	[-]	metoda konečných prvků
MVE	[-]	malá vodní elektrárna
p	[Pa]	tlak
PV	[-]	povodňová vlna
PVE	[-]	přečerpávací vodní elektrárna
Q	[l.s ⁻¹]	průtok
ΔQ	[l.s ⁻¹]	průtok ohýbaný vertikálním deflektorem
ρ	[kg.m ⁻³]	specifická hmotnost vody
Re	[-]	Reynoldsovo kritérium
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
UZV	[-]	ultrazvuk
We	[-]	Weberovo kritérium
σ_x	[N]	směrodatná odchylka
y	[m]	hloubka

11. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Proudové poměry na skluzu VD Dalešice [2]	11
Obrázek 2 - Použití horizontálního deflektoru ve štole spodních výpustí VD Souš [3].....	12
Obrázek 3 - Protiproudání pohled na hladinové poměry na začátku modelu skluzu [4].....	14
Obrázek 4 - Protiproudání pohled na usměrňovací pilíř doporučeného tvaru a pozice [4] ...	14
Obrázek 5 - Jedna ze zkoušených variant úprav proudových poměrů [5]	15
Obrázek 6 - Kombinace vertikálních odchylovačů a horizontálních deflektorů [5]	16
Obrázek 7 - Hydraulický model odpadní štole VD Karolinka [5]	16
Obrázek 8 - Schéma úpravy stěn skluzu pro zamezení vybřežení proudu [6]	17
Obrázek 9 - Nastavitelný usměrňovací prvek do prostoru dna spadiště [6].....	18
Obrázek 10 - Usměrnění maximálního výstupu příčné vlny na stěně modelu skluzu [6] ...	18
Obrázek 11 - Úprava komory usměrňovacími trámcí [3]	19
Obrázek 12 - Funkce horizontálního deflektoru při provozu [3].....	20
Obrázek 13 - Funkce deflektorů při provozu na díle [3].....	20
Obrázek 14 - Výstup proudu na pravé straně spadiště [2]	21
Obrázek 15 - Výběh proudu při funkčních zkouškách [2].....	22
Obrázek 16 - Protiproudání pohled na liniový usměrňovací prvek [2]	22
Obrázek 17 - Energetická výška průřezu [7].....	23
Obrázek 18 - Nadkritické proudění skluzem na přehradě Kangaroo v Austrálii [8].....	24
Obrázek 19 - Vznik příčných vln na hydraulickém modelu	28
Obrázek 20 - Příklad numerického modelování pomocí MKP [12].....	30
Obrázek 21 - Fyzikální model VD Boskovice [14]	30
Obrázek 22 - Vizualizace vertikálního usměrňovače [15]	32
Obrázek 23 - Vizualizace horizontálního usměrňovače [15]	32
Obrázek 24 - Hydraulický model – protiproudání pohled [14].....	34
Obrázek 25 - Hydraulický model přelivu [14]	35
Obrázek 26 - Detail skluzu hydraulického modelu VD Boskovice se zařízením pro měření silových účinků na svislý usměrňovací prvek [14].....	35
Obrázek 27 - Jednotka pro operativní změnu průtoku na modelu [14]	36
Obrázek 28 - Přiblížený protiproudání pohled na měrnou trať včetně měřící jednotky [14]	37
Obrázek 29 - Ukázka snímání výšky hladiny [14]	38
Obrázek 30 - Poloha snímačů na zadní straně deflektoru [15].....	39
Obrázek 31 - Schéma zapojení jednotlivých komponent [14]	39
Obrázek 32 - Řídící jednotka pro záznam měření průtoku [14]	40
Obrázek 33 - Umístění a popis snímačů [15]	42
Obrázek 34 - Kalibrace pomocí závaží [14].....	42
Obrázek 35 - Šablona pro přepočet napětí	43
Obrázek 36 - Úhel odklonu proudu – vertikální deflektor [15].....	44
Obrázek 37 - Změna vzdálenosti deflektoru ode dna žlabu – horizontální deflektor [15] ..	44

Obrázek 38 - Umístění deflektoru a směr měřené síly [14]	45
Obrázek 39 - Graf velikosti sil v závislosti na poloze deflektoru.....	46
Obrázek 40 - Umístění uprostřed žlabu [14]	47
Obrázek 41 - Ovlivnění proudění při umístění u stěny žlabu [14]	47
Obrázek 42- Graf z měření konfigurace $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,43^\circ$	48
Obrázek 43 - Měření při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 5,09^\circ$ [14].....	49
Obrázek 44 - Měření při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,43^\circ$ [14].....	49
Obrázek 45 - Graf z měření konfigurace $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,19^\circ$	50
Obrázek 46 - Měření při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 6,20^\circ$ [14].....	51
Obrázek 47 - Měření při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,19^\circ$ [14].....	51
Obrázek 48 - Graf z měření konfigurace $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,11^\circ$	52
Obrázek 49 - Měření při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 6,20^\circ$ [14].....	53
Obrázek 50 - Měření při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,11^\circ$ [14].....	53
Obrázek 51 - Graf z měření konfigurace $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,31^\circ$	54
Obrázek 52 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 4,97^\circ$ [14].....	55
Obrázek 53 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $\alpha = 20,31^\circ$ [14].....	55
Obrázek 54 - Graf závislosti síly na Froudově kritériu a úhlu odklonu proudu.....	56
Obrázek 55 - Umístění deflektoru na měrné trati [14].....	58
Obrázek 56 - Místo největších silových účinků [14].....	59
Obrázek 57 – Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 133 \text{ mm}$	60
Obrázek 58 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 128 \text{ mm}$	60
Obrázek 59 - Měření při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$, $h_1 = 123 \text{ mm}$	60
Obrázek 60 – Umístění pomocného plechu proti přelévání desky [14].....	61
Obrázek 61 – Usměrnění příčné vlny při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$ [14]	61
Obrázek 62 - Příčný řez žlabem.....	62
Obrázek 63 - Půdorys žlabu s vyznačenými veličinami	66
Obrázek 64 - Půdorys a řez zatěžované plochy S.....	68
Obrázek 65 - Průběh korekčního součinitele	70
Obrázek 66 - Příklad úspěšně používaných usměrňovačů na VD Souš [3].....	73

12. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Srovnání metod řešení	29
Tabulka 2 - Velikost naměřených sil při $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$	48
Tabulka 3 - Velikost naměřených sil při $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$	50
Tabulka 4 - Velikost naměřených sil při $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$	52
Tabulka 5 - Velikost naměřených sil při $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$	54
Tabulka 6 - Výsledné naměřené hodnoty souhrnně.....	57
Tabulka 7- Výsledky z měření na horizontálním usměrňovači.....	63
Tabulka 8 – Vypočtené silové účinky v porovnání s naměřenými hodnotami	67
Tabulka 9 - Vypočtené silové účinky v porovnání s naměřenými hodnotami	69
Tabulka 10 – Porovnání získaných hodnot pomocí korekčního součinitele	72

13. Seznam příloh

1 KALIBRACE MODELU

- 1.1 *Kalibrace měřící techniky – stanovení rovnic*
- 1.2 *Srovnání vzorkovacích frekvencí*

2 VERTIKÁLNÍ DEFLEKTOR

- 2.1 *Měření sil působících na vertikální deflektor, $Q = 30 \text{ l.s}^{-1}$*
 - 2.1.1 Úhel odklonu proudu $\alpha = 5,09^\circ$
 - 2.1.2 Úhel odklonu proudu $\alpha = 6,20^\circ$
 - 2.1.3 Úhel odklonu proudu $\alpha = 7,55^\circ$
 - 2.1.4 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,09^\circ$
 - 2.1.5 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,95^\circ$
 - 2.1.6 Úhel odklonu proudu $\alpha = 10,09^\circ$
 - 2.1.7 Úhel odklonu proudu $\alpha = 11,21^\circ$
 - 2.1.8 Úhel odklonu proudu $\alpha = 12,53^\circ$
 - 2.1.9 Úhel odklonu proudu $\alpha = 15,00^\circ$
 - 2.1.10 Úhel odklonu proudu $\alpha = 20,43^\circ$
- 2.2 *Měření sil působících na vertikální deflektor, $Q = 35 \text{ l.s}^{-1}$*
 - 2.2.1 Úhel odklonu proudu $\alpha = 6,20^\circ$
 - 2.2.2 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,04^\circ$
 - 2.2.3 Úhel odklonu proudu $\alpha = 10,95^\circ$
 - 2.2.4 Úhel odklonu proudu $\alpha = 14,10^\circ$
 - 2.2.5 Úhel odklonu proudu $\alpha = 17,58^\circ$
 - 2.2.6 Úhel odklonu proudu $\alpha = 20,19^\circ$
- 2.3 *Měření sil působících na vertikální deflektor, $Q = 45 \text{ l.s}^{-1}$*
 - 2.3.1 Úhel odklonu proudu $\alpha = 6,20^\circ$
 - 2.3.2 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,04^\circ$
 - 2.3.3 Úhel odklonu proudu $\alpha = 10,95^\circ$
 - 2.3.4 Úhel odklonu proudu $\alpha = 14,01^\circ$
 - 2.3.5 Úhel odklonu proudu $\alpha = 17,50^\circ$
 - 2.3.6 Úhel odklonu proudu $\alpha = 20,11^\circ$
- 2.4 *Měření sil působících na vertikální deflektor, $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$*
 - 2.4.1 Úhel odklonu proudu $\alpha = 4,97^\circ$
 - 2.4.2 Úhel odklonu proudu $\alpha = 6,30^\circ$
 - 2.4.3 Úhel odklonu proudu $\alpha = 7,54^\circ$
 - 2.4.4 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,18^\circ$
 - 2.4.5 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,95^\circ$
 - 2.4.6 Úhel odklonu proudu $\alpha = 10,07^\circ$
 - 2.4.7 Úhel odklonu proudu $\alpha = 11,21^\circ$

- 2.4.8 Úhel odklonu proudu $\alpha = 12,48^\circ$
- 2.4.9 Úhel odklonu proudu $\alpha = 15,03^\circ$
- 2.4.10 Úhel odklonu proudu $\alpha = 20,31^\circ$
- 2.5 *Měření sil působících na vertikální deflektor umístěný na kraji žlabu, $Q=60\text{l.s}^{-1}$*
- 2.5.1 Úhel odklonu proudu $\alpha = 5,19^\circ$
- 2.5.2 Úhel odklonu proudu $\alpha = 8,57^\circ$
- 2.5.3 Úhel odklonu proudu $\alpha = 9,93^\circ$
- 2.5.4 Úhel odklonu proudu $\alpha = 11,67^\circ$
- 2.5.5 Úhel odklonu proudu $\alpha = 12,48^\circ$
- 2.5.6 Úhel odklonu proudu $\alpha = 15,21^\circ$
- 2.5.7 Úhel odklonu proudu $\alpha = 20,40^\circ$
- 2.5.8 Porovnání vlivu umístění deflektoru na průběh měření
- 2.6 *Vyhodnocení sil působících na vertikální deflektor*
- 2.6.1 Vyhodnocení velikosti sil a výpočet korekčního součinitele
- 2.6.2 Porovnání měření s výpočtem pomocí korekčního koeficientu
- 2.6.3 Velikost působících sil v závislosti na průtoku a úhlu odklonu proudu

3 HORIZONTÁLNÍ DEFLEKTOR

- 3.1 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 30\text{l.s}^{-1}$*
- 3.1.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 78\text{ mm}$
- 3.1.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 73\text{ mm}$
- 3.1.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 68\text{ mm}$
- 3.2 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 36\text{l.s}^{-1}$*
- 3.2.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 88\text{ mm}$
- 3.2.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 83\text{ mm}$
- 3.2.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 78\text{ mm}$
- 3.3 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 42\text{l.s}^{-1}$*
- 3.3.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 98\text{ mm}$
- 3.3.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 93\text{ mm}$
- 3.3.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 88\text{ mm}$
- 3.4 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 48\text{l.s}^{-1}$*
- 3.4.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 108\text{ mm}$
- 3.4.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 103\text{ mm}$
- 3.4.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 98\text{ mm}$
- 3.5 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 53\text{l.s}^{-1}$*
- 3.5.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 118\text{ mm}$
- 3.5.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 113\text{ mm}$
- 3.5.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 108\text{ mm}$
- 3.6 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 55\text{l.s}^{-1}$*
- 3.6.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 123\text{ mm}$

- 3.6.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 118$ mm
- 3.6.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 113$ mm
- 3.7 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 58 \text{ l.s}^{-1}$*
- 3.7.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 128$ mm
- 3.7.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 123$ mm
- 3.7.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 118$ mm
- 3.8 *Měření sil působících na horizontální deflektor, $Q = 60 \text{ l.s}^{-1}$*
- 3.8.1 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 133$ mm
- 3.8.2 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 128$ mm
- 3.8.3 Vzdálenost deflektoru ode dna žlabu $h_1 = 123$ mm
- 3.9 *Vyhodnocení velikosti sil a výpočet korekčního součinitele*
- 3.10 *Průběh hladin ve žlabu*