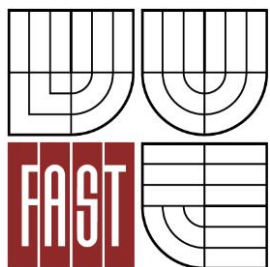




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VLIV PŮDORYSNÉHO ZAKŘIVENÍ NA KAPACITU PŘELIVU

INFLUENCE OF PLAN RADIUS ON DISCHARGING CAPACITY OF WEIR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR LUKÁŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Petr Lukášek

Název Vliv půdorysného zakřivení na kapacitu přelivu

Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2013

Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
děkan Fakulty stavební VUT v Brně

Podklady a literatura

- Kolář, V.; Patočka, C.; Bém, J.: Hydraulika. SNTL Praha, 1983
- Mäsiar, E.; Kamenský, J.: Hydraulika pre stavebných inžinierov (I). ALFA Bratislava, 1985
- Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968
- Peterka, A. J.: Performance tests on prototype and model – Morning glory spillways. American Society of Civil Engineers, vol. 121, 1956, str. 385 ÷ 404
- Bureau of Reclamation. Design of Small Dams. U. S. Department of the Interior, Denver CO, 1987
- Schröder, W. a kol.: Grundlagen des Wasserbaus. Werner Verlag, Düsseldorf, 1994
- ČSN ISO 1438/1. Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí přelivů a Venturiho žlabů, 1977

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

Provést analýzu současného stavu poznatků o vlivu půdorysného zakřivení přelivu na kapacitu.

Provést návrh třech modelově podobných ostrohranných přelivů s půdorysným zakřivením, na daných objektech změřit parametry proudu na hydraulickém žlabu.

Na základě rozboru výsledků laboratorního měření stanovit míru a meze vlivu zakřivení na kapacitu v porovnání s dokonalým přepadem přes přímý čelní přeliv.

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).



.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na půdorysně zakřivené přelivy. Součástí práce je souhrn informací o přelivech, především pak těch zakřivených. Dále je v práci vyhodnocen provedený modelový výzkum, který se zabývá stanovením vlivu půdorysného zakřivení na kapacitu těchto přelivů v porovnání s přelivem přímým. Výzkum se dotýká i vlivu uspořádání spadiště na kapacitu přelivu. Práce porovnává výsledky provedeného výzkumu s dalšími autory, kteří se zabývali zakřivenými šachtovými přelivy.

Klíčová slova

Přeliv, půdorysné zakřivení, modelový výzkum, součinitel přepadu, kapacita přelivu, uspořádání spadiště.

Abstract

This bachelor's thesis is focused on plan radius weirs. The part of this work is also summary of the information about weirs, principally about plan radius weirs. Executed model research, dealing with determination of influence of plan radius on discharging capacity of these weirs in comparison to straight weir, is evaluated in another part of this work. The research is also dealing with the effect of design of a spillway channel on capacity of the weir. This work compares the results of executed research with results of other authors, who are dealing with plan radius morning glory spillway.

Keywords

Weir, plan radius, model research, discharge coefficient, discharging capacity, spillway channel.

Bibliografická citace VŠKP

LUKÁŠEK, Petr.: *Vliv půdorysného zakřivení na kapacitu přelivu*. Brno, 2014. 69 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne 26. 5. 2014

.....
podpis autora
Petr Lukášek

Poděkování:

Děkuji touto cestou panu prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za pomoc, ochotu, trpělivost a cenné rady, které mě provázely během měření na fyzikálním modelu v laboratoři i při zpracování této bakalářské práce.

Dále děkuji vědeckým a technickým pracovníkům Laboratoře vodohospodářského výzkumu, kteří se zajímali o průběh měření a nejednou mi svými radami nebo ochotnou pomocí pomohli, případně odvedli precizní řemeslnou práci při přípravě jednotlivých modelových alternativ.

Moje poděkování patří rovněž mým rodičům, kteří mi umožnili studovat na vysoké škole a během studia a psaní bakalářské práce mi byli velkou oporou.

OBSAH:

Obsah	5
1. Úvod	7
2. Shrnutí dosavadních poznatků z hydrauliky přelivů	8
2.1 Přeliv, přepad a jejich rozdělení	8
2.2 Šikmé, zakřivené a zalomené přelivy	10
2.3 Zakřivené přelivy na přehradách	11
2.4 Stávající doporučené postupy při výpočtu zakřivených přelivů	15
2.5 Rozbor možné ovlivněnosti proudění na ostrohranném přelivu	16
2.5.1 Ovlivnění dolní vodou.....	16
2.5.2 Ovlivnění na šachtovém přelivu.....	17
2.5.3 Ovlivnění zakřivením při $\varphi \leq 180^\circ$	18
3. Modelová podobnost	19
3.1 Geometrická podobnost	19
3.2 Kinematická podobnost	20
3.3 Dynamická podobnost	21
3.3.1 Převažující účinek mají síly tíže.....	23
3.3.2 Převažující účinek mají síly tření	24
3.3.3 Převažující účinek mají síly povrchového napětí.....	24
3.4 Meze podobnosti pro ostrohranný přeliv	25
4. Tvar modelových alternativ, měrný okruh a technika	26
4.1 Měrný okruh a měřicí technika	26
4.2 Tvar modelových alternativ, schémata, fotografie	29
5. Zkoušky na hydraulickém modelu	34
5.1 Postup měření	34
5.2 Metoda zpracování výsledků	35
5.3 Přehled výsledků měření – tabulky.....	36
5.4 Přehled výsledků měření – grafické závislosti	40
5.5 Fotodokumentace z měření	43
6. Rozbor výsledků	51
6.1 Vyhodnocení výsledků	51
6.1.1 Automodelovost	51
6.1.2 Vliv zakřivení přelivu.....	51

6.1.3 Ovlivnění dolní vodou.....	52
6.2 Porovnání výsledků s jinými autory	53
6.2.1 Porovnání výsledků s hodnotami dle Wagnera	53
6.2.2 Porovnání výsledků s hodnotami dle Grundlagen des Wasserbaus	56
6.2.3 Porovnání výsledků s hodnotami dle Hydraulic design criteria.....	58
7. Závěr.....	62
8. Seznam použitých zdrojů	64
8.1 Literatura a internetové zdroje	64
8.2 Zdroje fotografií.....	64
9. Seznam použitých zkratk a symbolů	65
10. Seznam obrázků.....	68
11. Seznam tabulek.....	69
12. Seznam grafů	69

1. ÚVOD

Přelivy jsou jednou z nejpoužívanějších stavebních konstrukcí ve vodním hospodářství. Výzkum a vodohospodářská praxe přinesly do vodního hospodářství velké množství nejrůznějších typů přelivů, které se liší tvarem, materiálem a také svoji funkcí. Jedním z nich jsou půdorysně zakřivené přelivy.

U tohoto typu přelivů vzniká komplikace s určením jejich přesné kapacity, jelikož existuje předpoklad, že na rozdíl od přelivů přímých se zde jednotlivé paprsky vody ovlivňují vzájemným zhuštěním či narážením a je tak snížena hodnota přepadového součinitele m a tedy i kapacita přelivu Q . Modelový výzkum v rámci navrhované kompletní rekonstrukce bezpečnostního přelivu na VD Boskovice prokázal mírné snížení přepadového součinitele m oproti předpokládané hodnotě na Scimemiho přelivné ploše. Výzkumná zpráva [1] uvádí, že snížení součinitele m mohlo být způsobeno více důvody. Jedním z uváděných důvodů je právě vliv půdorysného zakřivení přelivu.

V praxi není vliv půdorysného upořádání do výpočtu kapacity přelivů nějak zakomponován. Výpočet kapacity na zakřivených přelivech se tedy často zjednodušeně provádí stejně jako výpočet kapacity na přelivu přímém, aniž by byl vliv zakřivení potvrzen nebo vyvrácen. Srovnání vlivu zakřivení je možné zatím provést pouze s dosaženými výsledky výzkumů na šachtových přelivech, jelikož v současné době není k dispozici literatura, která by se přímo zabývala vlivem zakřivení na kapacitu přelivu.

Cílem této práce je prokázání nebo případně vyvrácení vlivu půdorysného zakřivení na kapacitu přelivu. K prozkoumání tohoto případného vlivu byl zvolen modelový výzkum na několika modelových variantách zakřivených přelivů. Součástí práce je i určení meze počátku ovlivnění přepadového paprsku a meze automodelovosti. Práce se také okrajově zabývá vlivem uspořádání spadiště na kapacitu přelivu.

2. SHRUTÍ DOSAVADNÍCH POZNATKŮ Z HYDRAULIKY PŘELIVŮ

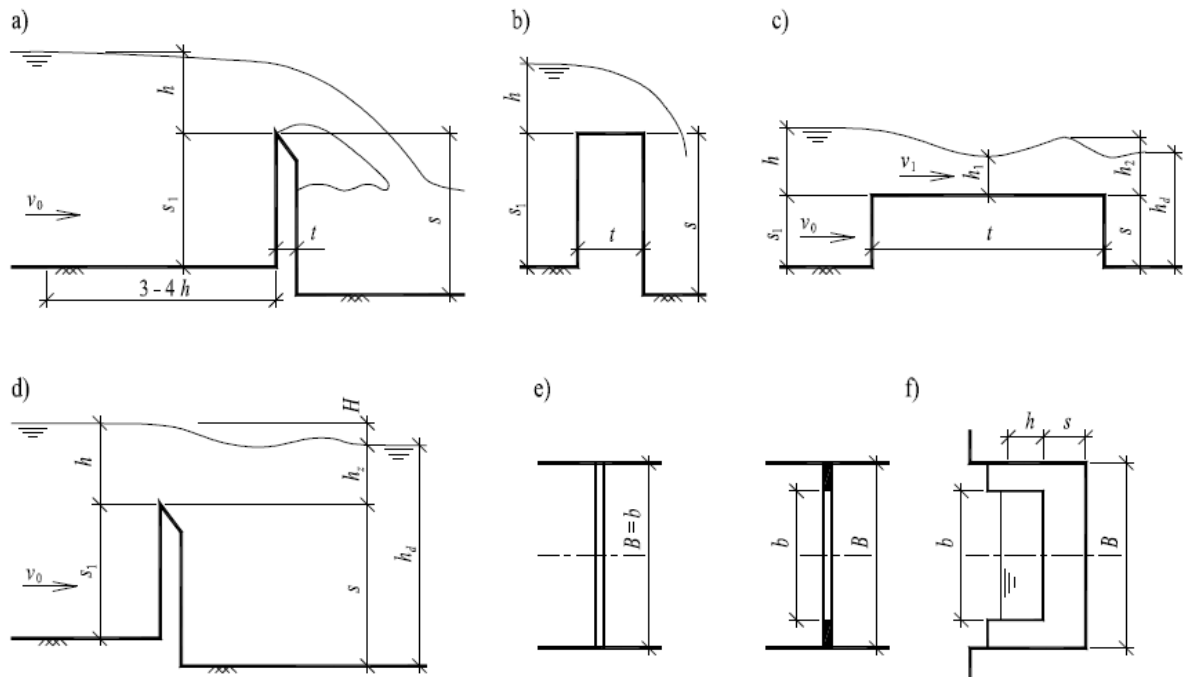
2.1 Přeliv, přepad a jejich rozdělení

Konstrukci, která vodu vzdouvá a přes kterou voda přepadá, nazýváme přeliv. Nejvyšší část přelivu je přelivná hrana neboli koruna přelivu. Přelivy mohou být pevné nebo pohyblivé. U pohyblivých přelivů je možné měnit výšku přelivné hrany – např. klapky, případně i jeho tvar – vakový jez. U pevných přelivů je výška přelivné hrany konstantní. Jev, probíhající na přelivné konstrukci, která má zjednodušeně tvar stěny, nazýváme přepad.

Přepad lze definovat jako výtok kapaliny otvorem, který je nahoře otevřený nebo otvorem v němž hladina nedosahuje k jeho hornímu obrysu. Vznikne zpravidla vložení stěny, respektive přelivné konstrukce napříč proudem vody s volnou hladinou. Přepadající proud vody se nazývá přepadový paprsek. Přepad může být dokonalý nebo nedokonalý (zatopený), záleží na ovlivnění přepadového množství výškou hladiny dolní vody h_d , tj. vody za přelivem. U dokonalého přepadu není množství přepadající vody ovlivněno výškou dolní hladiny, je-li však hladina dolní vody nad úrovní přelivné hrany, je třeba ověřit, zdali je přepadové množství hladinou dolní vody ovlivněno. Přepad vody přes přeliv může být bez bočního zúžení nebo s bočním zúžením. Bez bočního zúžení je přepad právě tehdy, pokud se šířka přelivu b rovná šířce B obdélníkového žlabu nebo koryta. Pokud je přepad pouze v části přelivné stěny nebo jestliže se žlab k přelivné stěně zužuje, tedy $b < B$, jedná se o přepad s bočním zúžením.

Přelivné stěny mají různé tvary a tloušťky, tyto charakteristiky mají podstatný vliv na proudění přes přeliv. Přelivy podle nich dělíme do čtyř základních skupin:

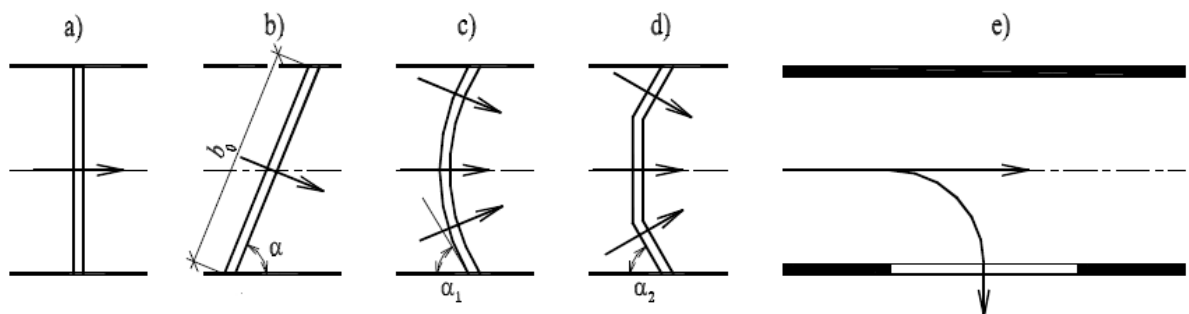
- a) **ostrohranné přelivy** – např. Bazinův, Ponceletův, Thomsonův, jsou tvarově jednoznačné a experimentálně nejlépe ověřeny, proto se využívají při měření průtoků, $t < 0,66 h$, (h je přepadová výška, t je tloušťka přelivné stěny);
- b) **jezové a přehradní přelivy** – jsou staticky vhodnější než přelivy ostrohranné, používají se proto k různým vodohospodářským účelům na vodních tocích a přehradních nádržích, $t \in (0,66; 2 \div 3) h$;
- c) **přelivy se širokou korunou** – jedná se o přepad přes široký práh, který vystupuje nad dno toku, tloušťka tohoto prahu je taková, že proud vody přilne k jeho vodorovné koruně a prochází s ní přibližně rovnoběžně, $t \geq (2 \div 3) h$;
- d) **zvláštní typy přelivů** – například přelivy šachtové nebo boční přelivy.



Obr. 2.1 Typy přelivů a přeпадů a) ostrohranný přeliv, dokonalý přeпад; b) přeliv typu jezové těleso s obdélníkovým příčným profilem; c) přeliv typu široká koruna, dokonalý přeпад; d) ostrohranný přeliv, nedokonalý přeпад; e) přeliv bez bočního zúžení, f) přeliv s bočním zúžením [2]

Rozdělením, které je především důležité pro naši problematiku, je rozdělení podle umístění přelivné hrany k nabíhajícímu proudu vody. Přelivy dělíme na přelivy (obr. 2.2):

- přelivy čelní** – přelivná hrana je umístěna kolmo k nabíhajícímu proudu;
- přelivy šikmé** – přelivná hrana je umístěna šikmo k nabíhajícímu proudu;
- přelivy zakřivené** – zakřivená přelivná hrana;
- přelivy zalomené** – zalomená přelivná hrana;
- boční (postranní) přelivy** – přelivná hrana je rovnoběžná s osou proudu nebo je od ní odkloněná, ale tak, aby nepřehradila vodní tok.



Obr. 2.2 Typy přelivů podle půdorysného uspořádání a) přeliv čelní; b) přeliv šikmý; c) přeliv zakřivený; d) přeliv zalomený; e) boční (postranní) přeliv [2]

Důvodem budování přelivů šikmých, křivočarých a zalomených je především prodloužení přelivné hrany L , díky kterému se zvýší při dané přepadové výšce kapacita přelivu Q – viz obecný tvar přepadové rovnice:

$$Q = m \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}, \quad (2.1)$$

kde Q ... kapacita přelivu,
 m ... přepadový součinitel,
 L ... délka přelivné hrany,
 g ... tíhové zrychlení,
 h ... přepadová výška.

Přepadovým součinitelem m jsou v rovnici zastoupeny ztráty a kontrakce na přepadu. Dalším důvodem budování těchto přelivů je také snížení rozkvyvu horní hladiny při změnách průtoků, což se projeví u vyšších jezových staveb. U jezových staveb se těchto variant přelivů využívá také k lepšímu usměrnění vody k odběrným zařízením a náhonům, popř. ke zvýšení ochrany břehů koryta pod jezem. Obecné informace o přelivech a přepadech byly převzaty z publikací [2] a [3].

2.2 Šikmé, zakřivené a zalomené přelivy

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, tak prodloužení přelivné hrany přelivu se používá pro zvýšení jeho kapacity. U vodohospodářských přelivných konstrukcí, jedná se často o jezy, tak snížíme přepadovou výšku h během povodňových průtoků. Při těchto půdorysných uspořádáních přelivů mění proudnice svůj původní směr. Z toho vyplývá, že kapacita přelivu Q na jednotku délky je na těchto přelivech menší než u přelivů kolmých na směr proudu vody, kde proudnice nejsou nuceny svůj směr měnit.

U šikmých jezů (obr. 2.2b) uvažujeme při výpočtu přepadového množství součinitel přepadu m odpovídající tvaru jezu, stejně jako u přelivů a jezů čelních (obr. 2.2a). Tento součinitel však redukuje součinitelem šikmosti jezu σ_s , který závisí na úhlu odklonu přelivné hrany od břehové čáry, tedy úhlu α (viz obr. 2.2b). Istomina pro něj udává tabulku (tab. 2.1). Rovnici pro výpočet přepadového množství je možné redukovat ještě součinitelem zatopení σ_z . Pro přepad dokonalý platí, že $\sigma_z = 1$, pro nedokonalý přepad je $\sigma_z < 1$. Dostáváme pak přepadovou rovnici pro jezová tělesa:

$$Q = \sigma_s \cdot \sigma_z \cdot m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{3/2}, \quad (2.2)$$

kde Q ... kapacita přelivu,
 σ_s ... součinitel šikmosti,
 σ_z ... součinitel zatopení,
 m ... přepadový součinitel,
 b_0 ... účinná šířka přelivu,
 g ... tíhové zrychlení,
 h_0 ... energetická přepadová výška.

Tab. 2.1 Součinitel šikmosti jezu σ_s podle Istominy, h/s je poměrná přepadová výška [4]

h/s	0,4	0,3	0,2	0,1
$\alpha = 45^\circ$	0,847	0,878	0,907	0,936
$\alpha = 60^\circ$	0,942	0,958	0,970	0,987
$\alpha = 75^\circ$	0,987	0,994	0,998	1,00

U jezových těles se v přepadové rovnici používá účinná šířka přelivu b_0 , která je oproti skutečné šířce přelivu b , respektive délce přelivné hrany L , snížena o boční kontrakce přepadového paprsku. Ty jsou vyvolané břehovými nebo středními pilíři, které zasahují do průtočného profilu. Přepadová výška h je pak v rovnici rozšířena o vliv přítokové rychlostní výšky k , dostáváme pak energetickou přepadovou výšku h_0 , která je použita v rovnici (2.2).

Zalomené jezy (obr. 2.2d) řešíme rozložením jezu na části, které řešíme podle předchozího způsobu. Obloukové jezy mají přibližně stejnou kapacitu jako jezy šikmé, za odchylku α je u nich považován úhel α_1 , který udává odklon tečny, umístěné na počátku přelivné hrany, od břehové čáry. Informace v této podkapitole jsou převzaty z publikací [2] a [4].

2.3 Zakřivené přelivy na přehradách

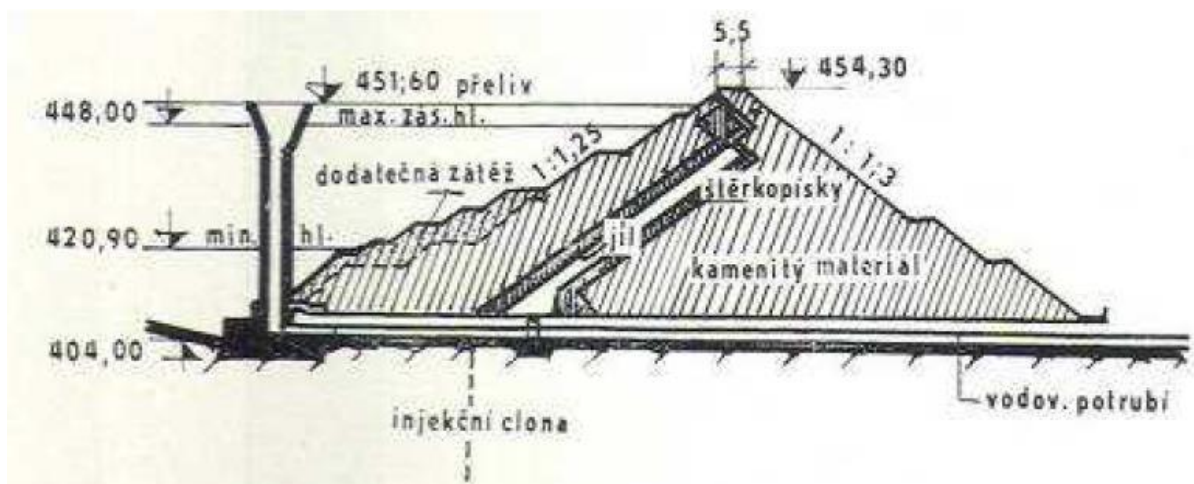
Na každé umělé vodní nádrži, do níž voda přitéká z určitého povodí (přímo nebo přivaděčem z jiného toku nebo nádrže), musí být vybudován přeliv k převádění povodňových průtoků do toku pod přehradou. Tyto bezpečnostní přelivy mohou být přímo součástí tělesa hráze, například přelivy korunové, nebo mohou tvořit samostatný objekt umístěný mimo přehradní těleso, například přelivy boční (postranní). Bezpečnostní přelivy mohou být hrazené nebo nehrazené. Podobně jako u základního rozdělení přelivů dělíme tyto přelivy podle jejich půdorysného uspořádání. Rozlišujeme přelivy přímé, zakřivené a složené. Přímý přeliv nalezneme například na VD Slapy, VD Brno, atd. Přelivy zakřivené a složené dělíme podle typu zakřivení na přelivy:

- a) **přelivy šachtového typu** – tzv. „šachtáky“, například VD Jirkov (obr. 2.3, 2.4), VD Nová Říše, VD Hracholusky (společně s přelivem korunovým přímým);
- b) **přelivy typu kachní zobák** – například VD Pilská (obr. 2.5);
- c) **půdorysně zakřivené nízké** – poloměr zakřivení přelivné hrany R je konstantní, například VD Bystřička (obr. 2.6), VD Boskovice;
- d) **složené** – například VD Opatovice (obr. 2.7), VD Morávka a VD Šance.

Typ přelivu a jeho kapacita se volí na základě dispozičního a vodohospodářského řešení vodního díla, podle potřeb řízení odtoku. Důležité je posoudit provozní podmínky, jako jsou například nebezpečí ucpání plovoucími předměty a zimní provoz. Komplikace vznikají především u přelivů šachtových, u nichž hrozí při překročení návrhového přelivu zahlcení. Musí být tedy navrženy tak, aby buď převedly bez zahlcení i průtok odpovídající dvojnásobku jejich kapacity při maximální hladině, nebo aby nedošlo k jejich zahlcení ani při hladině v úrovni koruny přehrady. Použití šachtového přelivu a vhodnost jeho použití musí být prokázána z několika hledisek, jako jsou spolehlivost hydrologických údajů, charakter povodí – nebezpečí plovoucích předmětů za povodní, zimní režim – nebezpečí ucpání krami, nasunutí ledové celiny na přeliv, tvoření námrazy při proudění studeného vzduchu šachtou atd. Dále je třeba se zabývat způsobem dozoru a obsluhy VD – trvalá přítomnost obsluhy. Též je nutné se zabývat chvěním konstrukce. Užití šachtových přelivů je tedy z několika hledisek poměrně problematické. Touto problematikou se krom jiného zabývá publikace [5], z které byly převzaty informace využité v této podkapitole.



Obr. 2.3 Pohled na VD Jirkov s šachtovým přelivem [12]



Obr. 2.4 Příčný řez přehradním tělesem a šachtovým přelivem na VD Jirkov [5]



Obr. 2.5 Přeliv typu kachní zobák, VD Pilská [13]



Obr. 2.6 Přeliv půdorysně zakřivený nízký na VD Bystřička [13]



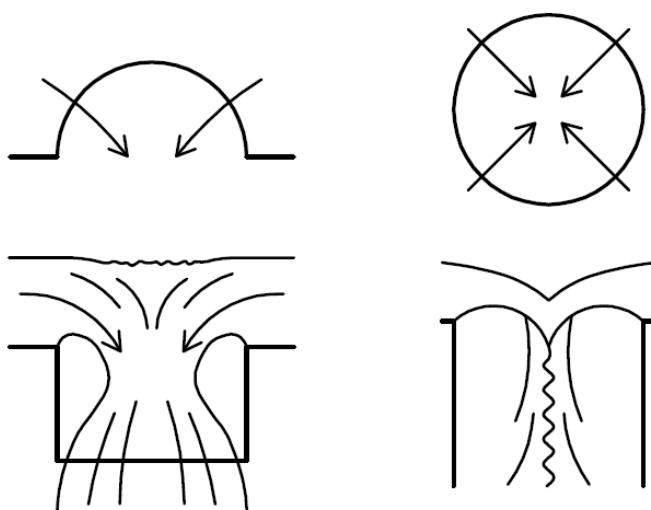
Obr. 2.7 Přeliv složený, VD Opatovice [14]

2.4 Stávající doporučené postupy při výpočtu zakřivených přelivů

Dosud prováděné výpočty půdorysně zakřiveného přelivu využívají ke stanovení jeho kapacity dříve uvedenou rovnici (2.1), respektive rovnici (2.2), které jsou původně odvozeny pro přímý čelní přeliv. Rovnici (2.2) lze použít rovněž pro výpočet přelivu půdorysně šikmého. Dále je ovšem z těchto rovnic patrné, že lze šířku přímého přelivu b zobecnit na obecnou délku přelivné hrany či koruny L . Tímto způsobem lze tedy provádět výpočet průtoku na zakřivených přelivech, kdy je délka přelivné hrany L větší než délka přelivné hrany přímého přelivu bez zakřivení, která je v obecném případě bez pilířů rovna jeho šířce b . Je však pravděpodobné, že při snižujícím se poloměru zakřivení R bude docházet k ovlivnění množství přepadající vody od vlivu „zhušťování“ proudnic. Při určité míře zakřivení vyjádřené poměrem L/R , tedy relativní délkou přelivné hrany, se tento jev projeví snížením přepadového součinitele m . Při určitých středových úhlech přelivu φ dochází k ovlivnění přepadového paprsku. Tento jev lze názorně dokumentovat střetnutím protilehlých přepadových paprsků půdorysně kruhově zakřivených přelivů se středovým úhlem 180° nebo v rovině symetrie šachtového přelivu (viz obr. 2.8). Na ovlivnění přepadu se kromě středového úhlu φ podílí dále relativní výška paprsku daná poměrem h/R a také

poloha dolní vody v korytě nebo ve spadišti. Určit meze počátku ovlivnění bylo jedním z úkolů této práce.

Některé postupy výpočtu kapacity půdorysně zakřiveného přelivu jsou odvozeny od postupu používaného pro šachtový přeliv. Ale vzhledem k rozdílu v ovlivněnosti dílčího proudu, respektive přepadového paprsku (viz obr. 2.8), nelze tyto výpočty aplikovat na obecný případ zakřiveného přelivu korektně. Poznatky některých autorů, které se týkají šachtových přelivů, jsou zde v závěrečných kapitolách porovnány s výsledky modelového výzkumu, který byl v rámci této práce proveden a jehož potřeba vyplývá z nedostatečného rozboru vlivu poloměru zakřivení R na hodnotu přepadového součinitele m .



Obr. 2.8 Schéma ovlivnění přepadových paprsků na zakřiveném přelivu o středovém úhlu $\varphi=180^\circ$ (vlevo) a na šachtovém přelivu (vpravo)

2.5 Rozbor možné ovlivněnosti proudění na ostrohranném přelivu

Jak již bylo zmíněno v předchozích podkapitolách, přepadový paprsek mohou ovlivňovat různé vlivy. V této podkapitole je přehled možných případů ovlivnění.

2.5.1 Ovlivnění dolní vodou

V podkapitole 2.1 už byl vysvětlen rozdíl mezi přepadem dokonalým a nedokonalým, kdy dochází k ovlivnění úrovní hladiny dolní vody, viz rovnice:

$$Q = f(h, h_d), \quad (2.3)$$

kde Q ... kapacita přelivu,
 h ... přepadová výška,
 h_d ... výška hladiny dolní vody.

Kapacita na nedokonalém přepadu bývá též vyjadřována pomocí součinitele zatopení σ_z , kterým redukuje množství přes přeliv, zjednodušeně v rovnici:

$$Q = Q_{\text{dokonalý}} \cdot \sigma_z, \quad (2.4)$$

kde Q ... kapacita přelivu,
 $Q_{\text{dokonalý}}$... kapacita přelivu při dokonalém přepadu,
 σ_z ... součinitel zatopení.

Pokud je na ostrohranném přelivu úroveň hladiny dolní vody nad úrovní přelivné hrany, tak se ověření, ovlivnění hladinou dolní vody, provádí posouzením relativní odlehlosti hladin v nadjezí a podjezí H/s , respektive výšky přepadového paprsku ku výšce koruny přelivu nad dolním dnem, tedy h/s . Přibližně bylo zjištěno, že vzdutý vodní skok u vzdouvacího objektu, tím i nedokonalý přepad, vzniká při poměru $H/s < 0,70$. Podrobněji Pavlovskij zjistil, že přepad bude nedokonalý, pokud poměr H/s bude menší než mezní poměr $(H/s)^*$ (tab. 2.2), tedy pokud platí $H/s < (H/s)^*$ a zároveň $h_d > s$. Dokonalost přepadu se obdobně řeší i u přelivů jezového typu. Nedokonalý přepad je prozkoumán méně než přepad dokonalý, vyžaduje složitější zařízení pro změření úrovně horní nebo dolní hladiny, proto se k měření průtoků nedoporučuje. Ty poznatky byly převzaty z publikace [2].

Tab. 2.2 Mezní hodnoty pro nedokonalý přepad přes ostrou hranu [2]

h/s	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	3,00
$(H/s)^*$	1,00	0,90	0,83	0,78	0,75	0,73	0,68	0,67	0,67	0,71	0,85

2.5.2 Ovlivnění na šachtovém přelivu

Na šachtovém přelivu může být ovlivnění dvojití, přepadový jev může být ovlivněn dolní vodou, kdy dochází k zahlcení odpadní štoly (viz obr. 2.9 vlevo), ale také setkáním a následným omezením, sousedních paprsků vody v šachtě přelivu (viz obr. 2.9 vpravo – dokonalý přepad). Při velkých průtocích může být vtok šachty zahlcen (viz obr. 2.9 vpravo – zahlcený přepad). Tehdy už se kapacita přelivu nepočítá pomocí dříve uvedené přepadové rovnice (2.1), ale jakmile dojde k zahlcení, kapacitu určuje rovnice výtoku otvorem:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH}, \quad (2.5)$$

kde Q ... kapacita přelivu při zahlčení,

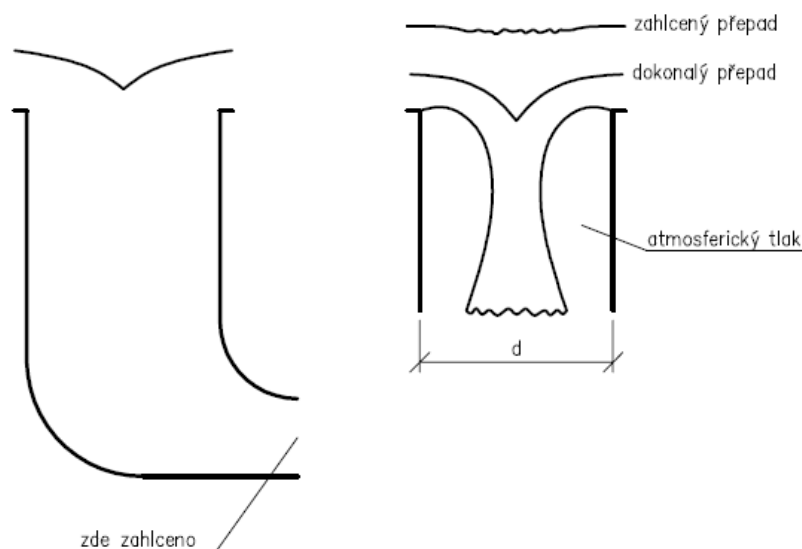
μ ... součinitel výtoku otvorem,

S ... velikost plochy výtokového otvoru,

g ... tíhové zrychlení,

H ... rozdíl úrovní horní a dolní hladiny, případně těžiště výtokového otvoru.

Dle Wagnera přepad zůstává dokonalým do hodnoty $h/d \leq 0,225$, kde h je výška přepadového paprsku a d je průměr šachty přelivu. V mezích $0,225 < h/d < 0,5$ je přepad částečně zahlčený, tedy je již ovlivněn. Při $h/d > 0,5$ je hladina vody nad přelivem prakticky vodorovná a přepad je úplně zahlčený. Pro hodnoty $h/d > 0,345$ se může vytvořit svislý vtokový vír vyplněný vzduchem, který kapacitu přelivu výrazně sníží [4], [6].



Obr. 2.9 Schéma zahlčení odpadní štolý (vlevo) a schéma dokonalého a zahlčeného šachtového přelivu (vpravo)

2.5.3 Ovlivnění zakřivením při $\varphi \leq 180^\circ$

Ovlivnění zakřivením je rozebráno již v podkapitole 2.4. Jak bylo zmíněno, jev je ovlivňován poloměrem zakřivení přelivné hrany R , poměry L/R a h/R a středovým úhlem přelivu φ . Je však jasné, že i u tohoto typu přelivu může být přepadový jev ovlivněn dolní vodou, ale to nejen úrovní její hladiny, respektive úrovní dna spadiště, ale i zúžením odpadního koryta poproudě za přelivem. V obou případech dochází k ovlivnění přepadu vlivem vzduť odtékajícího proudu.

3. MODELOVÁ PODOBNOST

Aby bylo možné z pozorování a měření na modelu usuzovat na hydraulické jevy, které vzniknou i na skutečné stavbě, musí být proudění na modelu a ve skutečnosti navzájem podobné. Dva jevy jsou si mechanicky podobné, jsou-li splněny podmínky:

- a) **geometrické podobnosti;**
- b) **kinematické podobnosti;**
- c) **dynamické podobnosti.**

Veličiny na zmenšeném modelu uvažujeme v následujících odstavcích s indexem „1“, veličiny ve skutečnosti s indexem „2“. V této kapitole jsou uvedeny základní vztahy, zákony a kritéria modelové podobnosti. Podrobné odvození vztahů a zákonů platných při fyzikálním modelování i s příslušnými komentáři je uvedeno v publikaci [2], obdobné shrnutí jako zde, lze nalézt i ve zdroji [7].

3.1 Geometrická podobnost

Aby platila geometrická podobnost, je nutné, aby byl pro libovolné dva sobě odpovídající délkové rozměry zachován stálý poměr, který nazýváme **délkové měřítko** M_l , viz rovnice:

$$M_l = \frac{l_2}{l_1}; l_2 = M_l l_1, \quad (3.1)$$

kde M_l ... délkové měřítko,

l_2 ... obecná délka ve skutečnosti,

l_1 ... obecná délka na modelu.

Pro **měřítka ploch** M_S platí rovnice:

$$M_S = \frac{S_2}{S_1}; M_S = M_l^2, \quad (3.2)$$

kde M_S ... měřítko ploch,

S_2 ... velikost obecné plochy ve skutečnosti,

S_1 ... velikost obecné plochy na modelu,

M_l ... délkové měřítko.

Pro měřítka objemů M_V platí rovnice:

$$M_V = \frac{V_2}{V_1}; M_V = M_l^3, \quad (3.3)$$

kde M_V ... měřítko objemů,

V_2 ... velikost obecného objemu ve skutečnosti,

V_1 ... velikost obecného objemu na modelu,

M_l ... délkové měřítko.

3.2 Kinematická podobnost

Kinematická podobnost platí, pokud dráhy, které opisují sobě si odpovídající částice proudu v úměrně odpovídajících si dobách, jsou navzájem podobné. K měřítku délek přibývá měřítko času M_t , viz rovnice:

$$M_t = \frac{t_2}{t_1}; t_2 = M_t t_1, \quad (3.4)$$

kde M_t ... měřítko času,

t_2 ... obecný čas ve skutečnosti,

t_1 ... obecný čas na modelu.

Odvozená měřítka jsou:

a) rychlostní měřítko M_v – rovnice:

$$M_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{l_2/t_2}{l_1/t_1} = \frac{l_2/l_1}{t_2/t_1} = \frac{M_l}{M_t}; v_2 = M_v v_1, \quad (3.5)$$

kde M_v ... rychlostní měřítko,

v_2 ... obecná rychlost ve skutečnosti,

v_1 ... obecná rychlost na modelu,

l_2 ... obecná délka ve skutečnosti,

t_2 ... obecný čas ve skutečnosti,

l_1 ... obecná délka na modelu,

t_1 ... obecný čas na modelu,

M_l ... délkové měřítko,

M_t ... měřítko času;

b) měřítko zrychlení M_a – rovnice:

$$M_a = \frac{a_2}{a_1} = \frac{l_2/t_2^2}{l_1/t_1^2} = \frac{l_2/l_1}{t_2^2/t_1^2} = \frac{M_l}{M_t^2}, \quad (3.6)$$

kde M_a ... měřítko zrychlení,

a_2 ... obecné zrychlení ve skutečnosti,

a_1 ... obecné zrychlení na modelu,

l_2 ... obecná délka ve skutečnosti,

t_2 ... obecný čas ve skutečnosti,

l_1 ... obecná délka na modelu,

t_1 ... obecný čas na modelu,

M_l ... délkové měřítko,

M_t ... měřítko času;

c) měřítko průtoků M_Q – rovnice:

$$M_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{V_2/t_2}{V_1/t_1} = \frac{V_2/V_1}{t_2/t_1} = \frac{M_l^3}{M_t}, \quad (3.7)$$

kde M_Q ... měřítko zrychlení,

Q_2 ... velikost obecného průtoku ve skutečnosti,

Q_1 ... velikost obecného průtoku na modelu,

V_2 ... velikost obecného objemu ve skutečnosti,

t_2 ... obecný čas ve skutečnosti,

V_1 ... velikost obecného objemu na modelu,

t_1 ... obecný čas na modelu,

M_l ... délkové měřítko,

M_t ... měřítko času.

3.3 Dynamická podobnost

Dynamická podobnost vyžaduje, aby poměr sil byl stálý, je určen **měřítkem sil** M_F , viz rovnice:

$$M_F = \frac{F_2}{F_1}; F_2 = M_F F_1, \quad (3.8)$$

kde M_F ... měřítko sil,

F_2 ... velikost obecné síly ve skutečnosti,

F_1 ... velikost obecné síly na modelu.

Pro hmotnosti proudící kapaliny definujeme **měřítka hmotnosti** M_m , viz rovnice:

$$M_m = \frac{m_2}{m_1}; m_2 = M_m m_1, \quad (3.9)$$

kde M_m ... měřítko hmotnosti,

m_2 ... obecná hmotnost ve skutečnosti,

m_1 ... obecná hmotnost na modelu.

Dále zavádíme **měřítka měrných hmotností** M_ρ , viz rovnice:

$$M_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (3.10)$$

kde M_ρ ... měřítko měrné hmotnosti,

ρ_2 ... obecná měrná hmotnost ve skutečnosti,

ρ_1 ... obecná měrná hmotnost na modelu.

Po aplikaci uvedených poměrů v silové rovnici:

$$F = m \cdot a, \quad (3.11)$$

kde F ... velikost obecné síly,

m ... obecná hmotnost,

a ... obecné zrychlení,

obdržíme bezrozměrné Newtonovo kritérium:

$$\frac{F}{\rho v^2 l^2} = \text{idem}, \quad (3.12)$$

kde F ... velikost obecné síly,

ρ ... obecná měrná hmotnost,

v ... obecná rychlost,

l ... obecná délka.

Rovnice (3.12) zároveň vyjadřuje obecný zákon podobnosti. Mají-li být dvě proudění mechanicky podobná, musí mít zlomek v (3.12) stejnou hodnotu jak pro proudění na modelu, tak pro proudění na skutečné stavbě.

Při proudění kapalin se uplatňují především síly tíže, tření a povrchového napětí. Z obecného Newtonova zákona lze odvodit další zákony při uvažování zjednodušujícího předpokladu, že působí jen jeden druh sil nebo nad ostatními silami dominuje.

3.3.1 Převažující účinek mají síly tíže

Do obecného Newtonova zákona (3.12) dosadíme převažující sílu, kterou je zde tíha. Platí tedy, že $F = G = m \cdot g$, po úpravě dostaneme rovnici:

$$\frac{gl}{v^2} = \text{idem}, \quad (3.13)$$

kde g ... tíhové zrychlení,

l ... obecná délka,

v ... obecná rychlost.

Tato rovnice musí platit i v převráceném tvaru:

$$\frac{v^2}{gl} = Fr = \text{idem}, \quad (3.14)$$

kde v ... obecná rychlost,

g ... tíhové zrychlení,

l ... obecná délka,

Fr ... Froudeovo kritérium modelové podobnosti.

Rovnice (3.14) vyjadřuje **Froudeovův zákon podobnosti**. Převažují-li síly tíže, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Froudeova kritéria pro model a pro skutečnost byla shodná. Froudeovův zákon podobnosti užíváme vždy při modelování proudění s volnou hladinou. Tedy na vodních stavbách jako jsou přelivy a jezy, dále při proudění v řekách, ale i při proudění vodními turbínami a čerpadly, při účincích vln apod.

3.3.2 Převažující účinek mají síly tření

Při převažujícím účinku sil tření využíváme pro modelování **Reynoldsov zákon podobnosti**, který vyjadřuje rovnice:

$$\frac{vl}{\nu} = Re = \text{idem}, \quad (3.15)$$

kde v ... obecná rychlost,

l ... obecná délka,

ν ... kinematická viskozita,

Re ... Reynoldsovo kritérium modelové podobnosti.

Tato rovnice je opět odvozena s pomocí rovnice (3.12). Převažují-li síly tření, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Reynoldsova kritéria pro model a pro skutečnost byla shodná. Reynoldsov zákon podobnosti je třeba zohlednit vždy při modelování jevů neovlivněných existencí volné hladiny. Například tlakové proudění v potrubí, obtékání ponořených těles či části staveb apod.

3.3.3 Převažující účinek mají síly povrchového napětí

Pokud nám při proudění kapaliny převažuje účinek sil od povrchového napětí, tak při modelování využíváme **Weberův zákon podobnosti**, ten vyjadřuje rovnice (3.16):

$$\frac{\rho v^2 l}{\sigma} = We = \text{idem}, \quad (3.16)$$

kde ρ ... obecná měrná hmotnost,

v ... obecná rychlost,

l ... obecná délka,

σ ... povrchové napětí,

We ... Weberovo kritérium modelové podobnosti.

Tato rovnice také vychází z rovnice (3.12). Převažují-li síly povrchového napětí, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota Weberova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná.

Mezi další zákony v modelové podobnosti patří:

- a) **Cauchyho zákon** – pro objemovou stlačitelnost;
- b) **Strouhalův zákon** – pro podobnost dvou neustálených jevů;
- c) **Karmánův zákon** – pro podobnost dvou turbulentních jevů.

Při fyzikálním modelování je třeba zohlednit převažující síly, které se v hydrodynamickém jevu uplatňují a měřítko podobnosti vztáhnout k odpovídající podobnosti.

3.4 Meze podobnosti pro ostrohranný přeliv

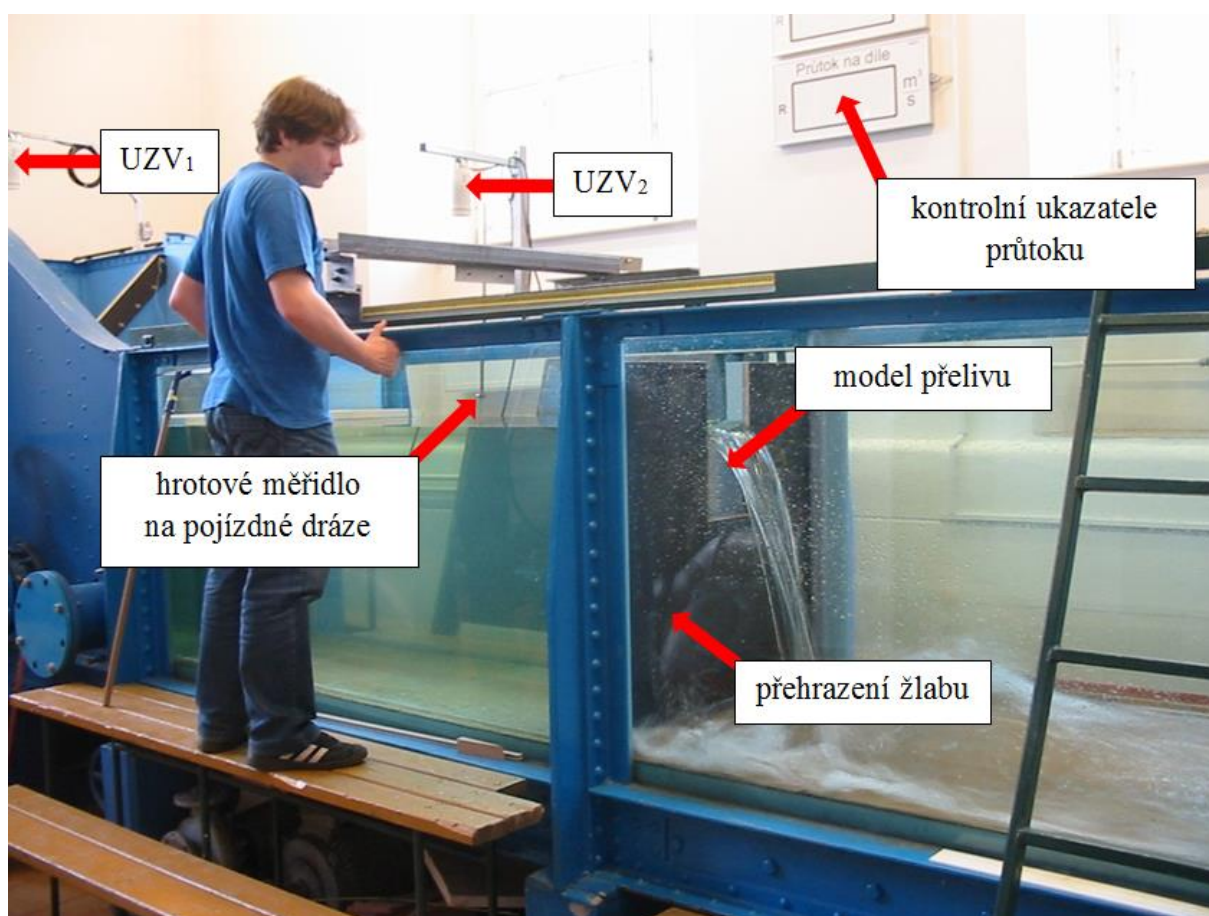
Při využití modelu se musíme zabývat také mezními podmínkami mechanické podobnosti. Tyto mezní podmínky vymezují oblasti a měřítka, v nichž lze určitý hydrodynamický jev modelovat s využitím některého z dříve uvedených zákonů mechanické podobnosti, odvozeného pro určitý druh síly, která při daném jevu převažuje. Vymezení je zvoleno tak, aby chyba vzniklá spolupůsobením i ostatních sil neovlivnila výsledky modelového výzkumu.

V našem případě modelujeme podle Froudeho kritéria. Zde je pro nás především důležitá výška přepadového paprsku h . Ta by na modelu přelivu s přímou ostrou hranou neměla klesnout pod 60 mm, aby se naměřený tvar paprsku dal extrapolovat (transformovat na větší rozměr objektu). Mělo by tedy platit $h \gtrsim 60$ mm, při $h \lesssim 20$ mm přechází totiž parabolický tvar přepadajícího paprsku vlivem kapilárních sil, které působí na obou jeho stranách, téměř do přímky. Informace převzaty z publikace [8].

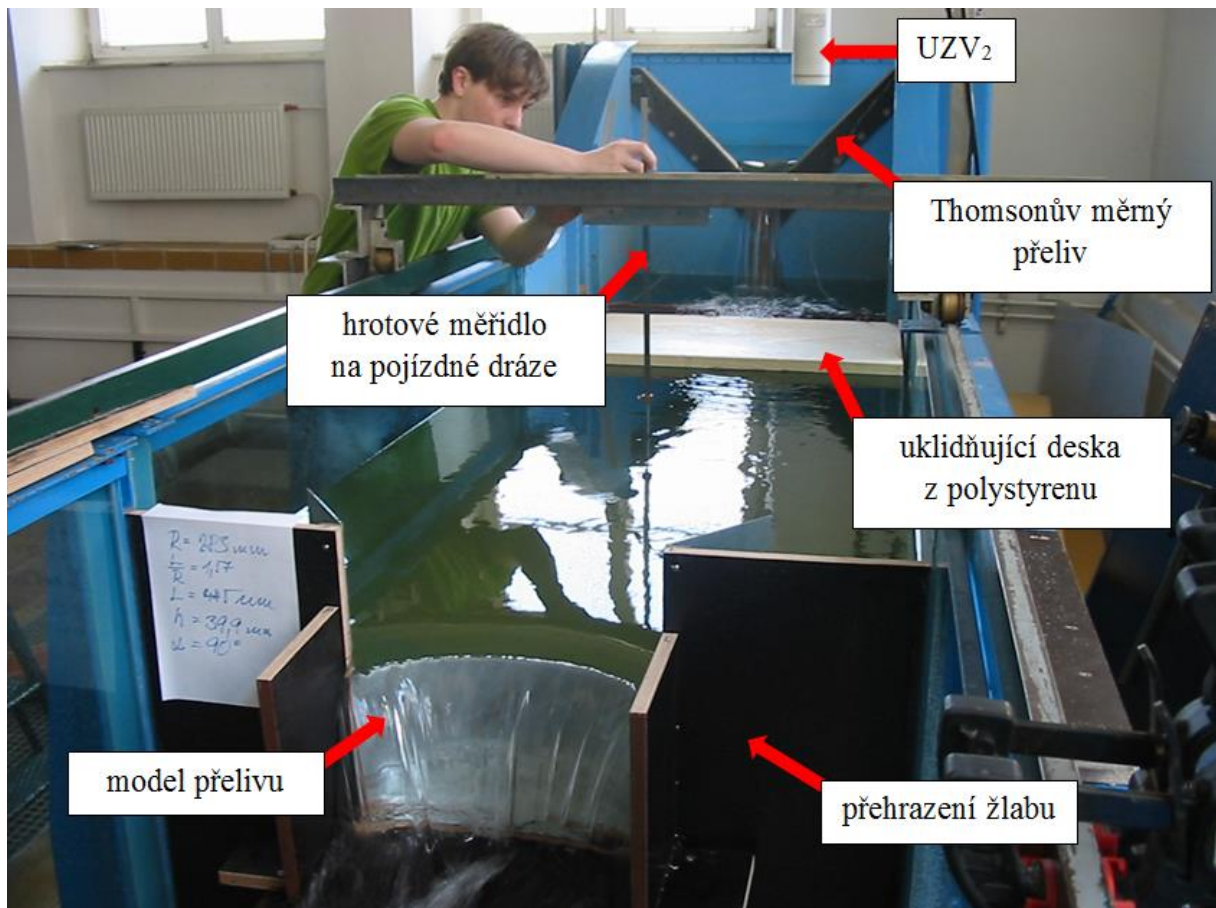
4. TVAR MODELOVÝCH ALTERNATIV, MĚRNÝ OKRUH A TECHNIKA

4.1 Měrný okruh a měřicí technika

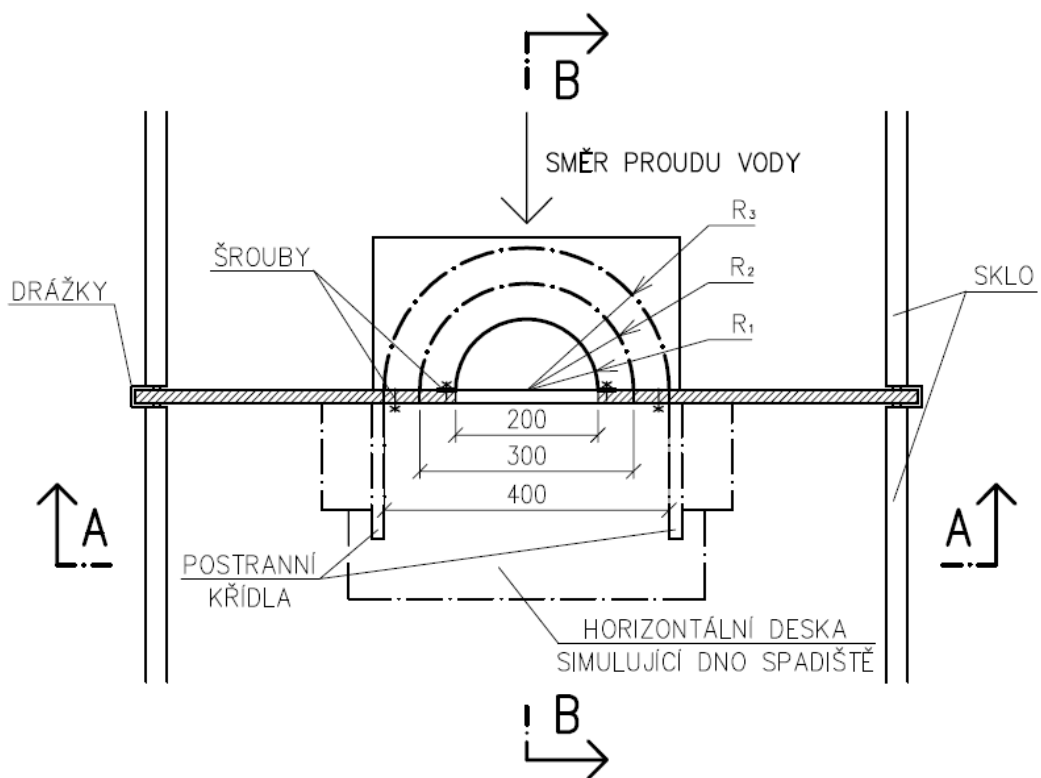
Použitý měrný okruh se nachází v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu v budově B na FAST VUT v Brně. Voda je čerpána z podzemních nádrží pomocí ponorných čerpadel, ovládaných z řídicí jednotky. Do proskleného zkušebního žlabu (obr. 4.1, 4.2), který je 4 m dlouhý, 1 m vysoký a 1 m široký, přitéká voda přes Thomsonův měrný přeliv, který je opatřen ultrazvukovým (UZV) snímačem, konkrétně UZV₁. Tento snímač udává výšku přepadového paprsku, z níž se stanovuje aktuální průtok. Na konci žlabu je umístěn odtok s bezpečnostním kašnovým přelivem, přes který odtéká voda zpět do podzemních nádrží, koloběh vody je tak uzavřen. Horní hrana zkušebního žlabu je opatřena pojízdným hrotovým měřidlem a dalším ultrazvukovým snímačem (UZV₂) pro měření výšky hladiny. Žlab byl při měření přehrazen jednou ze tří vodovzdorných překližek, v nichž byly vyřezány otvory široké 200, 300 nebo 400 mm v závislosti na upevnění jednotlivých modelových alternativ o poloměru zakřivení R_1 , R_2 , R_3 (viz obr. 4.3).



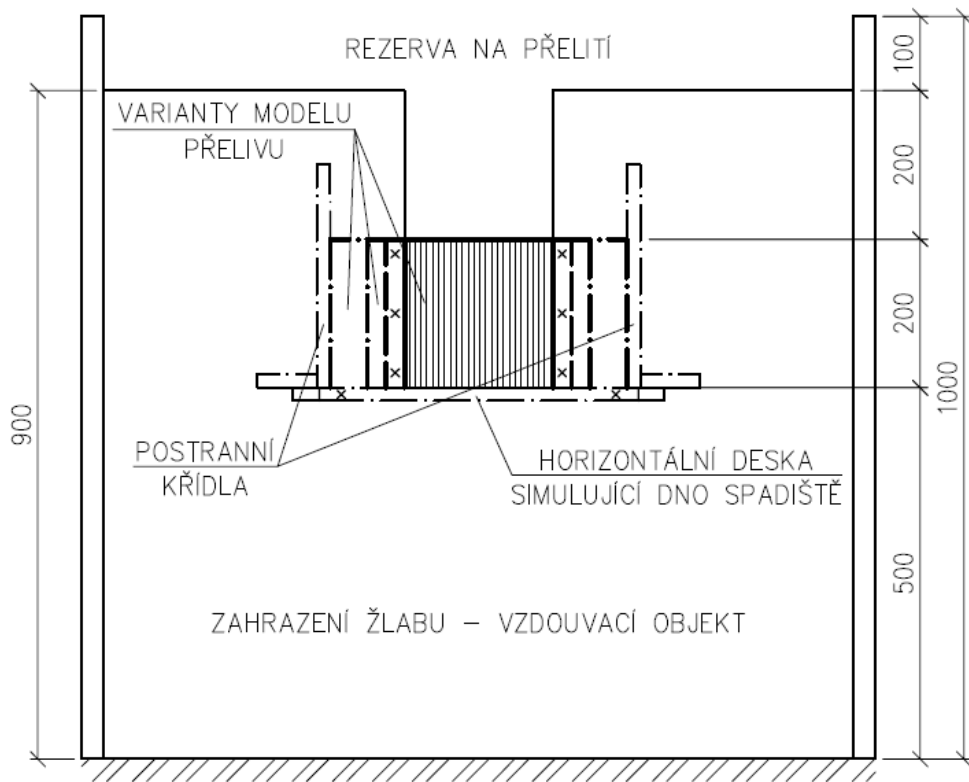
Obr. 4.1 Boční pohled na zkušební žlab



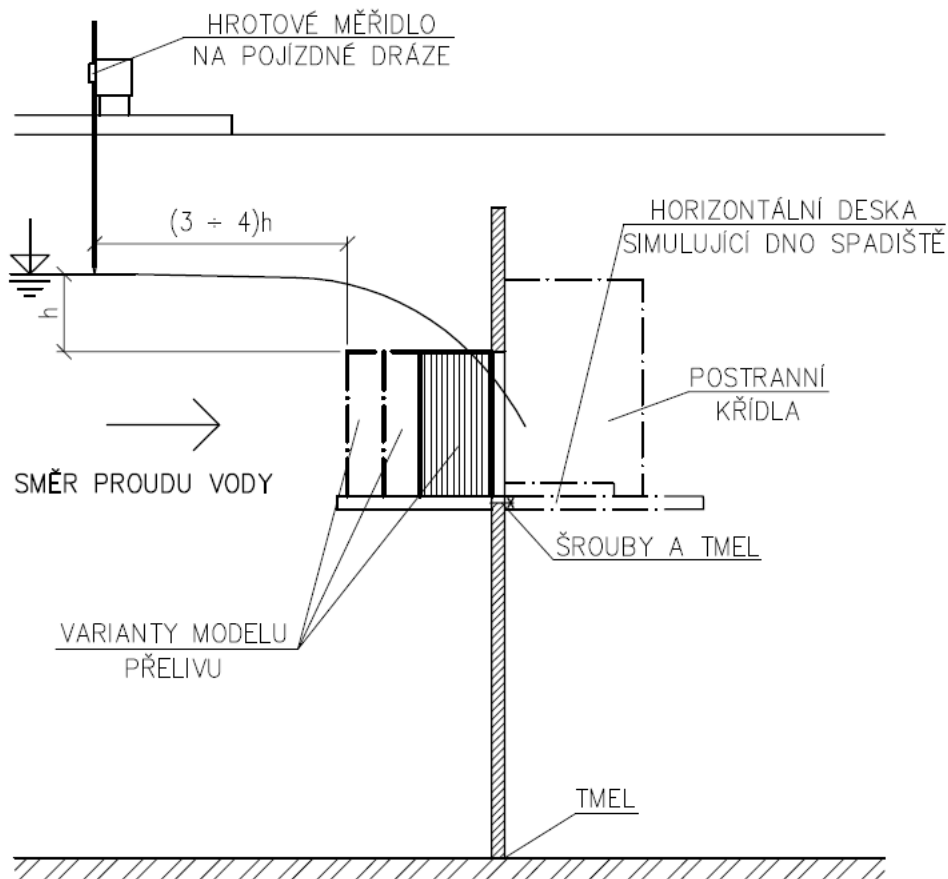
Obr. 4.2 Horní pohled na zkušební žlab



Obr. 4.3 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (půdorys)



Obr. 4.4 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (řez AA)



Obr. 4.5 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (řez BB)

Na obr. 4.5 je schematicky naznačeno správné umístění hrotového měřidla, které je v této poloze připraveno pro měření. Při menší vzdálenosti hrotového měřidla od přelivné hrany než $(3 \div 4)h$ by vznikly v odečítání výšky hladiny nepřesnosti, které by byly způsobené jejím snížením v blízkosti přelivu. Použité hrotové měřidlo bylo digitální s přesností odečtu výšky hladiny 0,01 mm, přesnost odečtu při použití ultrazvukového (UZV) čidla je 1 mm. Pro zpracování této podkapitoly byla využita publikace [2] a [7].

4.2 Tvar modelových alternativ, schémata, fotografie

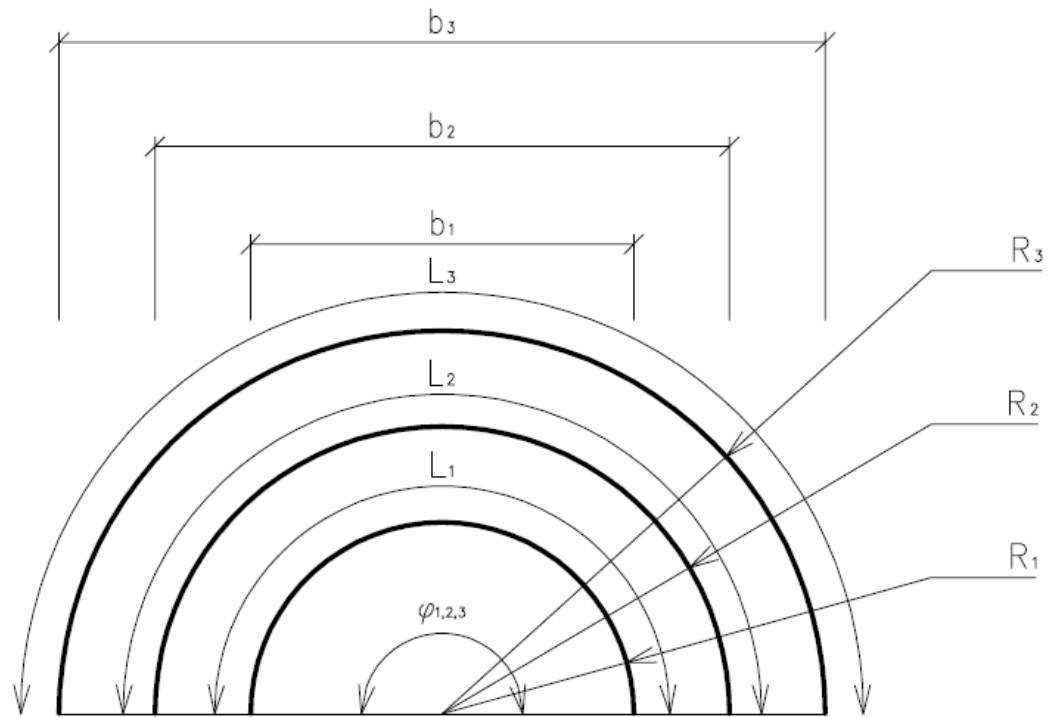
Při modelových zkouškách bylo použito několik modelových alternativ zakřivených přelivů. Ty je možné rozlišit hned z několika hledisek, výpis všech modelových alternativ je v následující tabulce (tab. 4.1). Jako etalon k porovnání výsledků byl zvolen ostrohranný přeliv se zavzdušněným prostorem.

Tab. 4.1 Přehled všech modelových alternativ přelivů (viz obr. 4.6 - 4.9)

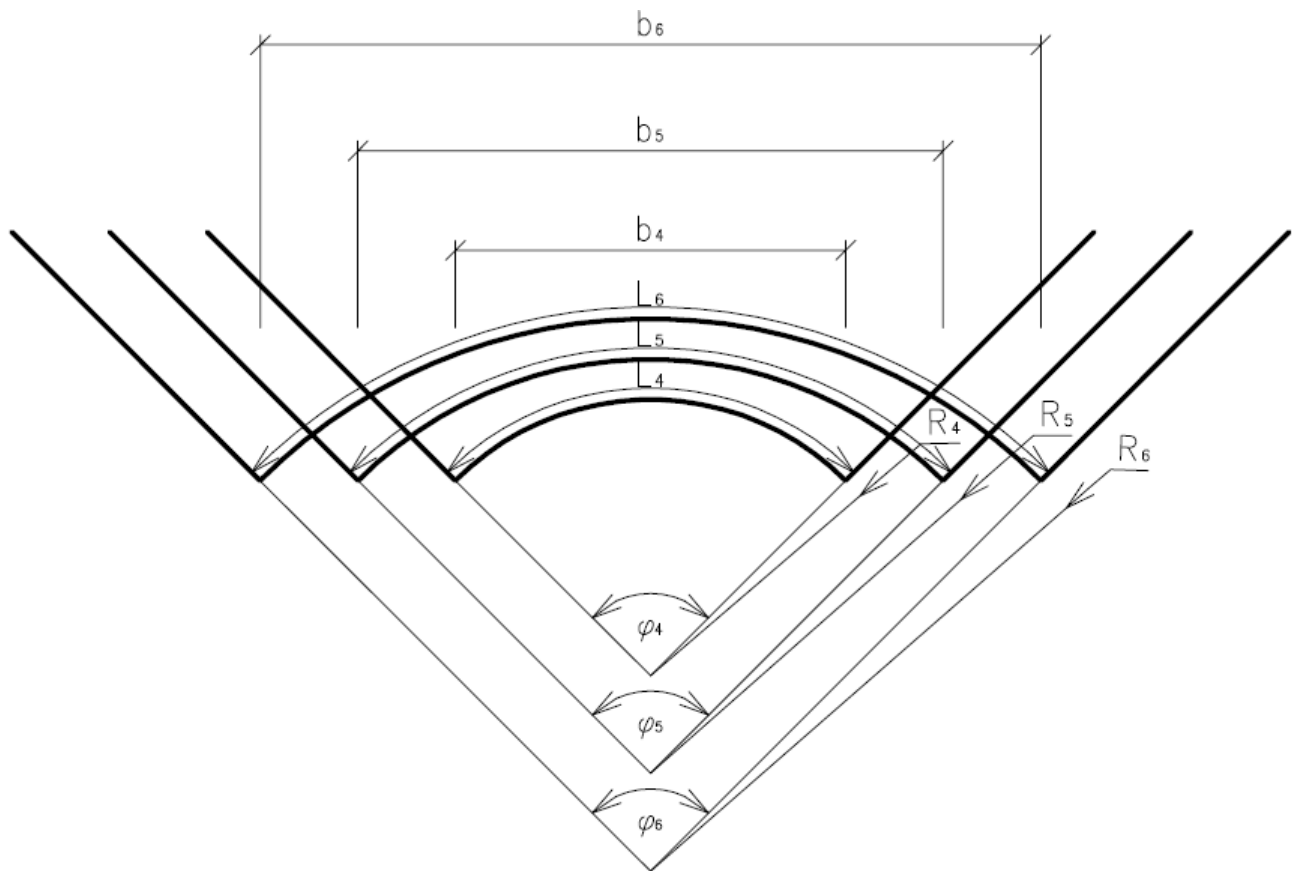
varianta	středový úhel přelivu	poloměr zakřivení přelivné hrany	délka přelivné hrany	poměr L/R	světlá šířka přelivu	šířka mezi usměrňovacími pilíři	umístění horizontální desky simulující dno spadiště
	φ [°]	R [mm]	L [mm]	L/R [-]	b [mm]	\check{s} [mm]	ano/ne
1	180	100	314	3,14	200	-	ne
2	180	150	471	3,14	300	-	ne
3	180	200	628	3,14	400	-	ano
4	90	141,5	222	1,57	200	-	ne
4.1	90	141,5	222	1,57	200	150	ne
4.2	90	141,5	222	1,57	200	100	ne
5	90	212	333	1,57	300	-	ano
6	90	283	444.5	1,57	400	-	ano
7	0	∞	400	0	400	-	ano

Modely zakřivených přelivů můžeme dělit podle jejich středového úhlu a poměru L/R do dvou skupin (obr. 4.6, 4.7). Při rozdělení podle šířky přelivu (tj. zároveň i šířka otvoru ve vodovzdorné překližce) získáme tři skupiny (obr. 4.8). Zde si vždy odpovídají dva přelivy, z nichž každý patří do jedné z předchozích dvou skupin s odlišným středovým úhlem a poměrem L/R . Délku přelivné hrany a poloměr zakřivení má každá modelová varianta svoji specifickou. U přelivů se středovým úhlem $\varphi = 180^\circ$ jsou pro potřebné nasměrování a rozdělení proudu přepadající vody na přelivné hraně využity usměrňovací pilíře, které jsou umístěny na nátoku na přeliv kolmo na přelivnou hranu (viz obr. 4.7). Usměrňovací pilíře zajišťují, aby proudnice přepadající vody procházely přes přeliv rovněž v kolmém směru

vzhledem k přelivné hraně, a to zejména i na jejích bočních částech, kde by přepadový jev mohl ovlivňovat proud přiléhající na návodní stranu ve směru roviny vodovzdorné překližky. Zvláštní skupinu pak tvoří dva modelové přelivy s usměrňovacími pilíři, které jsou prodlouženy až za přelivnou hranu (var. 4.1, 4.2, obr. 4.9), tyto modelové prvky představují boční usměrňovací pilíře (stěny) na zúženém (konfuzorovém) skutečném spadišti, které je na mnoha vodních dílech použito. Pomocí těchto dvou modelů lze zjistit, zda tyto usměrňovací prvky mají nebo nemají nějaký zásadní vliv na přepadový jev. U některých modelových variant byla ke vzdouvacímu objektu, tvořenému vodovzdornou překližkou, přimontována horizontální deska s upevňujícími postranními křídly k simulaci vlivu dna spadiště. Odlehlost hrany přelivu od horizontální desky činila 200 mm, boční svislé stěny byly orientovány ve směru proudu při vzájemné odlehlosti shodné se šířkou otvoru přelivu $b = 300$ mm a $b = 400$ mm. Příímý přeliv (var. 7, obr. 4.10) jako etalon tvoří svoji samostatnou skupinu pro pozorování uvedených vlivů.



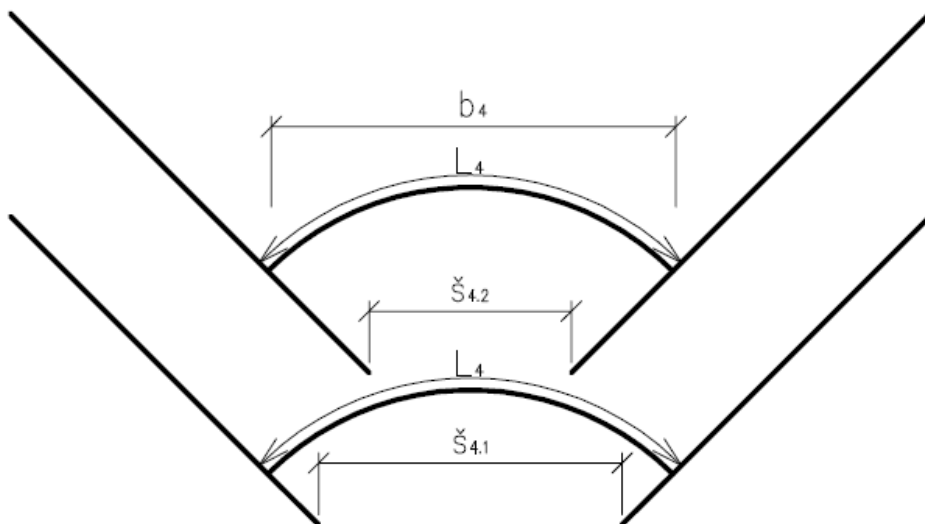
Obr. 4.6 Půdorysné schéma modelových variant 1, 2, 3, $\varphi = 180^\circ$



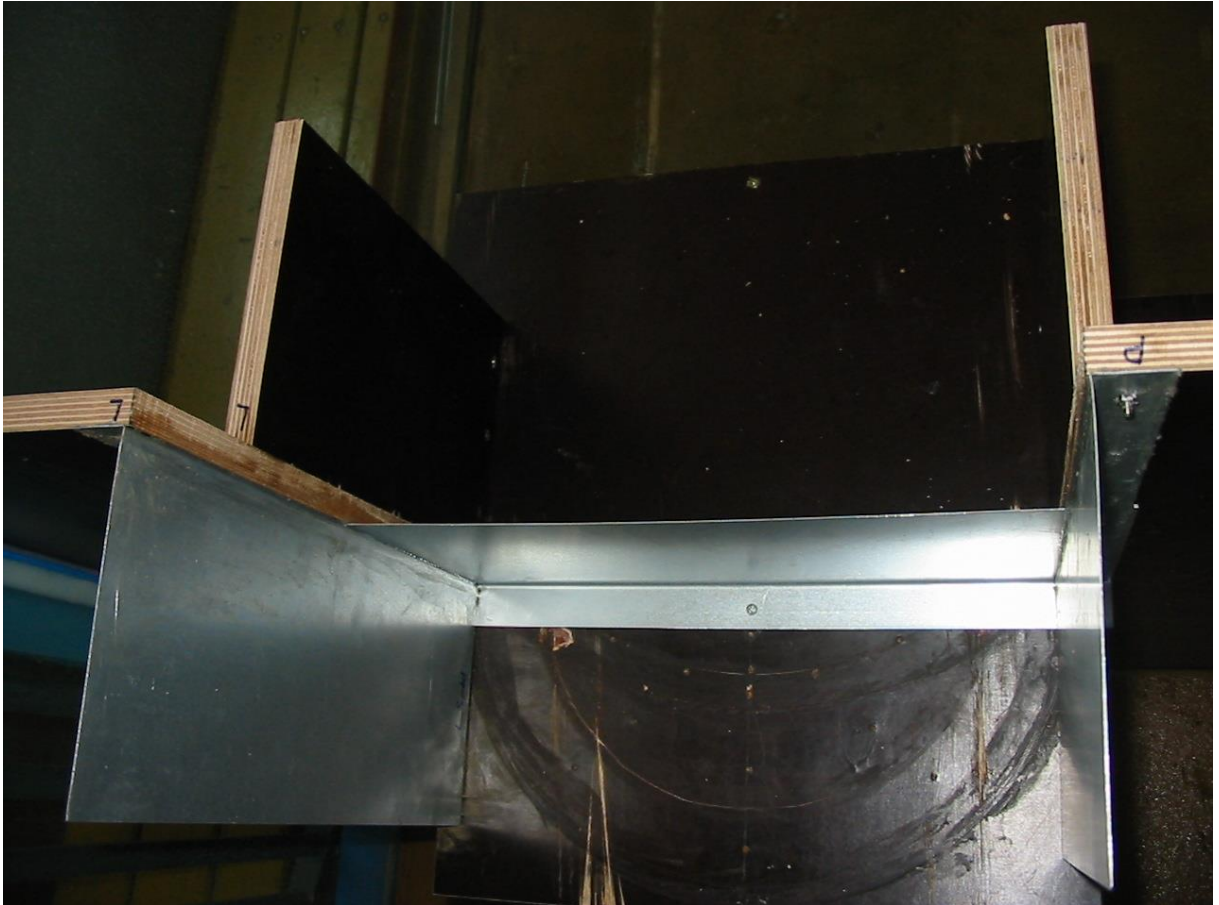
Obr. 4.7 Půdorysné schéma modelových variant 4, 5, 6, $\varphi = 180^\circ$



Obr. 4.8 Varianty modelů zakřiveného přelivu (pohled ve směru ode dna spadiště)



Obr. 4.9 Půdorysné schéma modelových variant 4.1, 4.2 s usměrňovacími pilíři za přelivnou hranou, $\varphi = 180^\circ$



Obr. 4.10 Model přímého přelivu – modelová varianta 7, $L/R = 0$, $R = \infty$ mm, pohled shora

5. ZKOUŠKY NA HYDRAULICKÉM MODELU

5.1 Postup měření

Měření na jednotlivých modelových alternativách umístěných ve zkušebním žlabu probíhalo vždy při dokonalém přepadu, přepadové množství tedy nebylo ovlivněno hladinou dolní vody. Vzhledem k nízké hodnotě přítokové rychlosti je její velikost považována za nulovou, tedy $v_0 \doteq 0$. Pro popis přepadu tedy budeme uvažovat obecnou přepadovou rovnici, v této kapitole rovnice (5.1):

$$Q = m \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}, \quad (5.1)$$

kde Q ... kapacita přelivu,
 m ... přepadový součinitel,
 L ... délka přelivné hrany,
 g ... tíhové zrychlení,
 h ... přepadová výška.

Měření na každé modelové alternativě probíhalo vždy pro zvolenou řadu průtoků. Každý jednotlivý průtok byl nejprve zadán na ovládacím panelu řídicí jednotky hydraulického okruhu laboratoře. Po zadání průtoky bylo nutné vyčkat na ustálení přítoku do zkušebního žlabu a na stabilizaci přepadového jevu, tak aby skutečný průtok ve žlabu dosáhl zadané hodnoty a úroveň hladiny se ustálila. Poté byla změřena přepadová výška h . Hodnota průtoky byla kontrolována na ovládacím panelu, zde byla pro kontrolu sledována i přepadová výška horní hladiny vody h' , měřená UZV₂. Úroveň horní hladiny však byla měřena posuvným hrotovým měřidlem, které umožňuje přesnější odečtení její odlehlosti od přelivné hrany. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak z digitálního displeje na hrotovém měřidle bylo možné odečítat hodnoty přepadové výšky h s přesností na 0,01 mm. Reálná přesnost hrotového měřidla je však zhruba 0,1 mm, případně 1 mm během vyšších modelových průtoků, což je způsobeno vlněním hladiny při vyšších průtocích. Hrotové měřidlo bylo umístěno v požadované vzdálenosti od přelivné hrany, tedy ve vzdálenosti větší než $(3 \div 4)h$. Závislost jednotlivých přepadových výšek a příslušných průtoků tvoří tzv. $Q - h$ měrnou křivku přepadu. Během měření byla provedena fotodokumentace každé modelové alternativy.

5.2 Metoda zpracování výsledků

Ke zpracování výsledků měření byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel. Jednotlivé hodnoty měrné křivky byly uspořádány do přehledných tabulek, kde je kromě naměřené přepadové výšky h uváděné v mm s přesností na 0,1 mm umístěna i přepadová výška h' uváděná v mm s přesností na 1 mm naměřená UZV₂. Přepadové množství Q je uváděno v l.s⁻¹. Dále je v tabulkách uveden poměr h/R pro zanesení vlivu zakřivení k přepadové výšce. Další hodnotou v tabulce je přepadový součinitel m , ten byl získán vyjádřením z obecné přepadové rovnice (5.1) pro konkrétní hodnoty Q a h měrné křivky. K vzájemnému porovnání a následnému vyhodnocení vlivu zakřivení byly použity další hodnoty přepadových součinitelů vyjádřené z funkčních závislostí, a to $m_{\text{přímý}}$ podle výsledků bakalářské práce [9] pro přímý přeliv, dle rovnice:

$$m_{\text{přímý}} = 0,1414 \cdot h + 0,4205, \quad (5.2)$$

kde $m_{\text{přímý}}$... přepadový součinitel pro přímý přeliv dle [9],

h ... přepadová výška [m].

A m_{Rehbock} podle Rehbocka, jehož vztah je převzat ze zdroje [9], rovněž pro přímý přeliv, dle rovnice:

$$m_{\text{Rehbock}} = \frac{2}{3} \cdot \left(0,602 + 0,0803 \cdot \frac{h}{p} \right), \quad (5.3)$$

kde m_{Rehbock} ... přepadový součinitel dle Rehbocka viz [9],

h ... přepadová výška,

p ... výška koruny přelivu nade dnem.

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty Q a h rovněž v základních jednotkách, jelikož v těch bylo dosazováno do rovnic (5.1), (5.2) a (5.3) pro výpočet různých přepadových součinitelů m . Zejména do rovnice (5.2) je třeba dosazovat hodnotu přepadové výšky h v metrech, jelikož se jedná o empirický vztah, kde by dosazení v jiných jednotkách dávalo nesmyslné výsledky. Do rovnic (5.1) a (5.3) je třeba dosazovat v jednotkách, které si vzájemně odpovídají, nejjednodušeji tedy opět v základních jednotkách. Pro názorné zobrazení výsledků měření a různých dalších závislostí bylo použito několik grafů, konkrétně grafy s $Q - h$ křivkami, $h - m$ závislostmi a $h/R - m$ závislostmi. Všechny tyto grafy byly vyneseny v programu Microsoft Excel nejprve bodově a zejména kvůli dalšímu zpracování byly následně proloženy funkční křivkou, pro kterou program Excel vyjádřil

příslušnou náhradní funkci. U $Q - h$ závislostí byla použita mocninná funkce, u $h - m$ závislostí a $h/R - m$ závislostí polynom druhého řádu.

5.3 Přehled výsledků měření – tabulky

Tab. 5.1 Modelová varianta 1, $\varphi = 180^\circ$, $R = 100 \text{ mm}$, $L = 314 \text{ mm}$, $L/R = 3,14$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[-]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	[m]	[-]	[-]	[-]
4,5	36,8	37	0,3680	0,0045	0,0368	0,458	0,426	0,411
8,5	58,5	59	0,5850	0,0085	0,0585	0,432	0,429	0,417
12,5	78,7	79	0,7870	0,0125	0,0787	0,407	0,432	0,422
16,5	98,6	99	0,9860	0,0165	0,0986	0,383	0,434	0,428
20,5	117,4	117	1,1740	0,0205	0,1174	0,366	0,437	0,433
24,5	136,3	136	1,3630	0,0245	0,1363	0,350	0,440	0,438
28,5	154,6	154	1,5460	0,0285	0,1546	0,337	0,442	0,443
32,5	171,4	172	1,7140	0,0325	0,1714	0,329	0,445	0,447
36,5	188,1	189	1,8810	0,0365	0,1881	0,322	0,447	0,452
38,0	194,6	195	1,9460	0,0380	0,1946	0,318	0,448	0,453

Tab. 5.2 Modelová varianta 4, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5 \text{ mm}$, $L = 222 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[-]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	[m]	[-]	[-]	[-]
4,5	45,7	46	0,3230	0,0045	0,0457	0,468	0,427	0,414
7,0	62,2	62	0,4396	0,0070	0,0622	0,459	0,429	0,418
10,0	81,4	81	0,5753	0,0100	0,0814	0,438	0,432	0,423
12,0	91,5	91	0,6466	0,0120	0,0915	0,441	0,433	0,426
16,0	111,9	112	0,7908	0,0160	0,1119	0,435	0,436	0,431
20,0	131,0	131	0,9258	0,0200	0,1310	0,429	0,439	0,436
24,0	146,4	147	1,0346	0,0240	0,1464	0,436	0,441	0,441
28,0	162,7	163	1,1498	0,0280	0,1627	0,434	0,444	0,445
32,0	178,6	179	1,2622	0,0320	0,1786	0,431	0,446	0,449
34,0	185,7	186	1,3124	0,0340	0,1857	0,432	0,447	0,451

Tab. 5.3 Modelová varianta 4.1, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5 \text{ mm}$, $L = 222 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $\delta = 150 \text{ mm}$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[-]$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
4,5	47,3	47	0,3343	0,0045	0,0473	0,445	0,427	0,414
7,0	64,7	65	0,4572	0,0070	0,0647	0,433	0,430	0,419
10,0	84,7	85	0,5986	0,0100	0,0847	0,413	0,432	0,424
12,0	96,5	97	0,6820	0,0120	0,0965	0,407	0,434	0,427
16,0	120,6	121	0,8523	0,0160	0,1206	0,389	0,438	0,434
20,0	142,6	143	1,0078	0,0200	0,1426	0,378	0,441	0,440
24,0	161,5	162	1,1413	0,0240	0,1615	0,376	0,443	0,445

Tab. 5.4 Modelová varianta 4.2, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5 \text{ mm}$, $L = 222 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $\delta = 100 \text{ mm}$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[-]$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
4,5	47,1	47	0,3329	0,0045	0,0471	0,448	0,427	0,414
7,0	66,1	67	0,4671	0,0070	0,0661	0,419	0,430	0,419
10,0	85,2	85	0,6021	0,0100	0,0852	0,409	0,433	0,424
12,0	98,3	99	0,6947	0,0120	0,0983	0,396	0,434	0,428
16,0	124,2	125	0,8777	0,0160	0,1242	0,372	0,438	0,435
20,0	148,9	151	1,0523	0,0200	0,1489	0,354	0,442	0,441
24,0	172,3	174	1,2177	0,0240	0,1723	0,341	0,445	0,447

Tab. 5.5 Modelová varianta 2, $\varphi = 180^\circ$, $R = 150 \text{ mm}$, $L = 471 \text{ mm}$, $L/R = 3,14$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[-]$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
4,5	27,1	27	0,1807	0,0045	0,0271	0,483	0,424	0,409
8,5	43,3	43	0,2887	0,0085	0,0433	0,452	0,427	0,413
12,5	56,8	57	0,3787	0,0125	0,0568	0,443	0,429	0,417
16,5	69,4	70	0,4627	0,0165	0,0694	0,433	0,430	0,420
20,5	80,7	81	0,5380	0,0205	0,0807	0,429	0,432	0,423
24,5	92,2	92	0,6147	0,0245	0,0922	0,419	0,434	0,426
28,5	103,2	103	0,6880	0,0285	0,1032	0,412	0,435	0,429
32,5	114,6	115	0,7640	0,0325	0,1146	0,402	0,437	0,432
36,5	125,3	125	0,8353	0,0365	0,1253	0,394	0,438	0,435
40,5	135,9	137	0,9060	0,0405	0,1359	0,387	0,440	0,438
44,5	147,4	148	0,9827	0,0445	0,1474	0,377	0,441	0,441
48,5	158,4	159	1,0560	0,0485	0,1584	0,369	0,443	0,444
52,5	168,7	169	1,1247	0,0525	0,1687	0,363	0,444	0,446
56,5	179,0	180	1,1933	0,0565	0,1790	0,358	0,446	0,449
60,5	189,9	190	1,2660	0,0605	0,1899	0,350	0,447	0,452

Tab. 5.6 Modelová varianta 5, $\varphi = 90^\circ$, $R = 212 \text{ mm}$, $L = 333 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[-]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	[m]	[-]	[-]	[-]
4,5	34,8	35	0,1642	0,0045	0,0348	0,470	0,425	0,411
7,0	47,6	47	0,2245	0,0070	0,0476	0,457	0,427	0,414
10,0	62,2	62	0,2934	0,0100	0,0622	0,437	0,429	0,418
12,0	70,2	70	0,3311	0,0120	0,0702	0,437	0,430	0,420
16,0	85,9	86	0,4052	0,0160	0,0859	0,431	0,433	0,424
20,0	99,4	99	0,4689	0,0200	0,0994	0,433	0,435	0,428
24,0	112,5	112	0,5307	0,0240	0,1125	0,431	0,436	0,431
28,0	125,5	125	0,5920	0,0280	0,1255	0,427	0,438	0,435
32,0	138,4	138	0,6528	0,0320	0,1384	0,421	0,440	0,438
36,0	150,3	151	0,7090	0,0360	0,1503	0,419	0,442	0,442
40,0	161,2	161	0,7604	0,04	0,1612	0,419	0,443	0,444
44,0	171,2	171	0,8075	0,044	0,1712	0,421	0,445	0,447
48,0	181,0	181	0,8538	0,048	0,1810	0,423	0,446	0,450
50,0	187,3	188	0,8835	0,05	0,1873	0,418	0,447	0,451

Tab. 5.7 Modelová varianta 3, $\varphi = 180^\circ$, $R = 200 \text{ mm}$, $L = 628 \text{ mm}$, $L/R = 3,14$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[mm]	[mm]	[-]	[$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	[m]	[-]	[-]	[-]
4,5	22,5	22	0,1125	0,0045	0,0225	0,479	0,424	0,407
8,5	35,4	35	0,1770	0,0085	0,0354	0,459	0,426	0,411
12,5	47,1	47	0,2355	0,0125	0,0471	0,440	0,427	0,414
16,5	57,0	57	0,2850	0,0165	0,0570	0,436	0,429	0,417
20,5	66,1	66	0,3305	0,0205	0,0661	0,434	0,430	0,419
24,5	74,6	74	0,3730	0,0245	0,0746	0,432	0,431	0,421
28,5	82,8	82	0,4140	0,0285	0,0828	0,430	0,432	0,423
32,5	90,5	90	0,4525	0,0325	0,0905	0,429	0,433	0,426
36,5	98,2	98	0,4910	0,0365	0,0982	0,426	0,434	0,428
40,5	105,6	105	0,5280	0,0405	0,1056	0,424	0,435	0,430
44,5	113,7	113	0,5685	0,0445	0,1137	0,417	0,437	0,432
48,5	122,0	122	0,6100	0,0485	0,1220	0,409	0,438	0,434
52,5	131,7	132	0,6585	0,0525	0,1317	0,395	0,439	0,437
56,5	139,2	139	0,6960	0,0565	0,1392	0,391	0,440	0,439
60,5	147,5	147	0,7375	0,0605	0,1475	0,384	0,441	0,441
64,5	156,9	156	0,7845	0,0645	0,1569	0,373	0,443	0,443
68,5	165,9	166	0,8295	0,0685	0,1659	0,364	0,444	0,446
72,5	174,8	175	0,8740	0,0725	0,1748	0,357	0,445	0,448
76,5	183,3	184	0,9165	0,0765	0,1833	0,350	0,446	0,450
80,5	192,2	193	0,9610	0,0805	0,1922	0,343	0,448	0,453

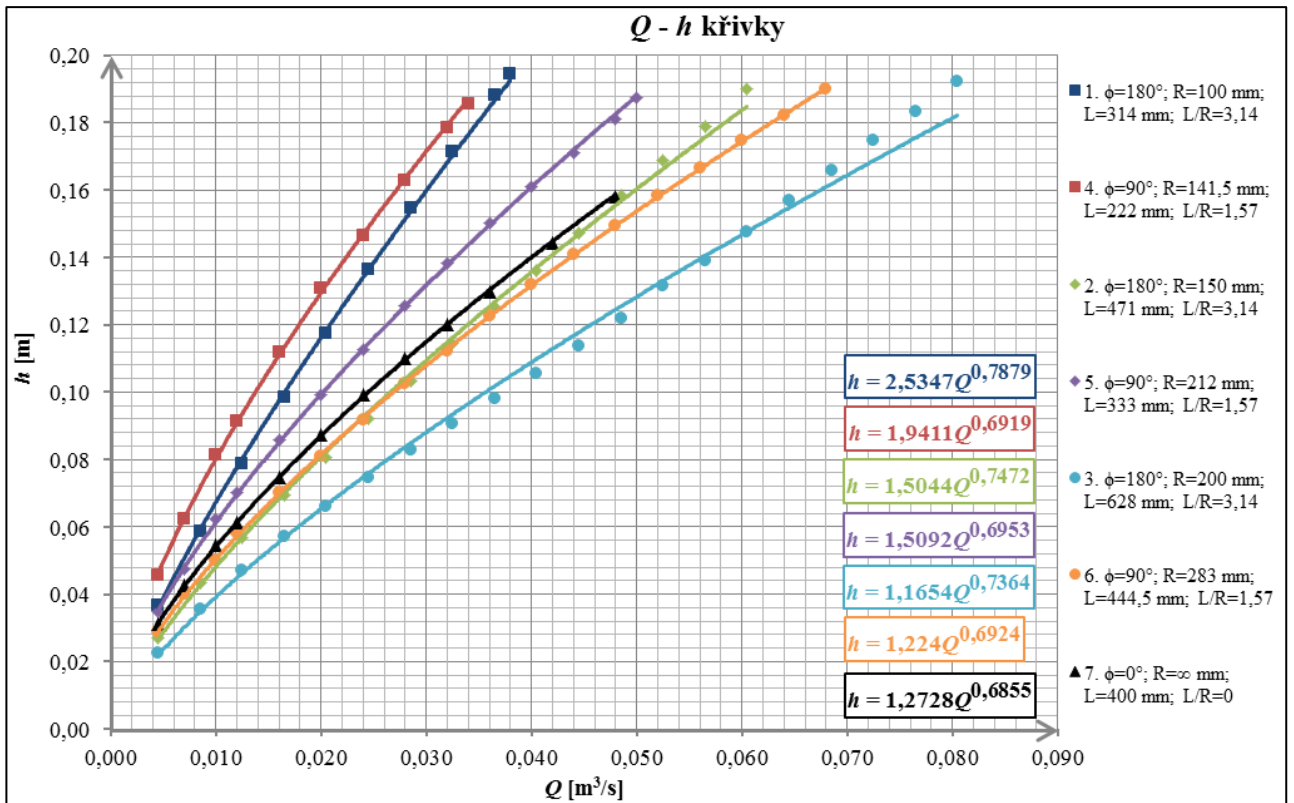
Tab. 5.8 Modelová varianta 6, $\varphi = 90^\circ$, $R = 283 \text{ mm}$, $L = 444,5 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
$[\text{l.s}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[-]$	$[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
4,5	28,7	28	0,1014	0,0045	0,0287	0,470	0,425	0,409
7,0	39,9	40	0,1410	0,0070	0,0399	0,446	0,426	0,412
10,0	50,2	50	0,1774	0,0100	0,0502	0,452	0,428	0,415
12,0	58,1	59	0,2053	0,0120	0,0581	0,435	0,429	0,417
16,0	70,2	70	0,2481	0,0160	0,0702	0,437	0,430	0,420
20,0	81,1	81	0,2866	0,0200	0,0811	0,440	0,432	0,423
24,0	91,7	92	0,3240	0,0240	0,0917	0,439	0,433	0,426
28,0	102,4	102	0,3618	0,0280	0,1024	0,434	0,435	0,429
32,0	112,3	112	0,3968	0,0320	0,1123	0,432	0,436	0,431
36,0	122,6	123	0,4332	0,0360	0,1226	0,426	0,438	0,434
40,0	131,8	132	0,4657	0,0400	0,1318	0,425	0,439	0,437
44,0	140,9	141	0,4979	0,0440	0,1409	0,423	0,440	0,439
48,0	149,6	150	0,5286	0,0480	0,1496	0,421	0,442	0,441
52,0	158,5	159	0,5601	0,0520	0,1585	0,419	0,443	0,444
56,0	166,7	167	0,5890	0,0560	0,1667	0,418	0,444	0,446
60,0	174,7	175	0,6173	0,0600	0,1747	0,417	0,445	0,448
64,0	182,4	183	0,6445	0,0640	0,1824	0,417	0,446	0,450
68,0	190,0	191	0,6714	0,0680	0,1900	0,417	0,447	0,452

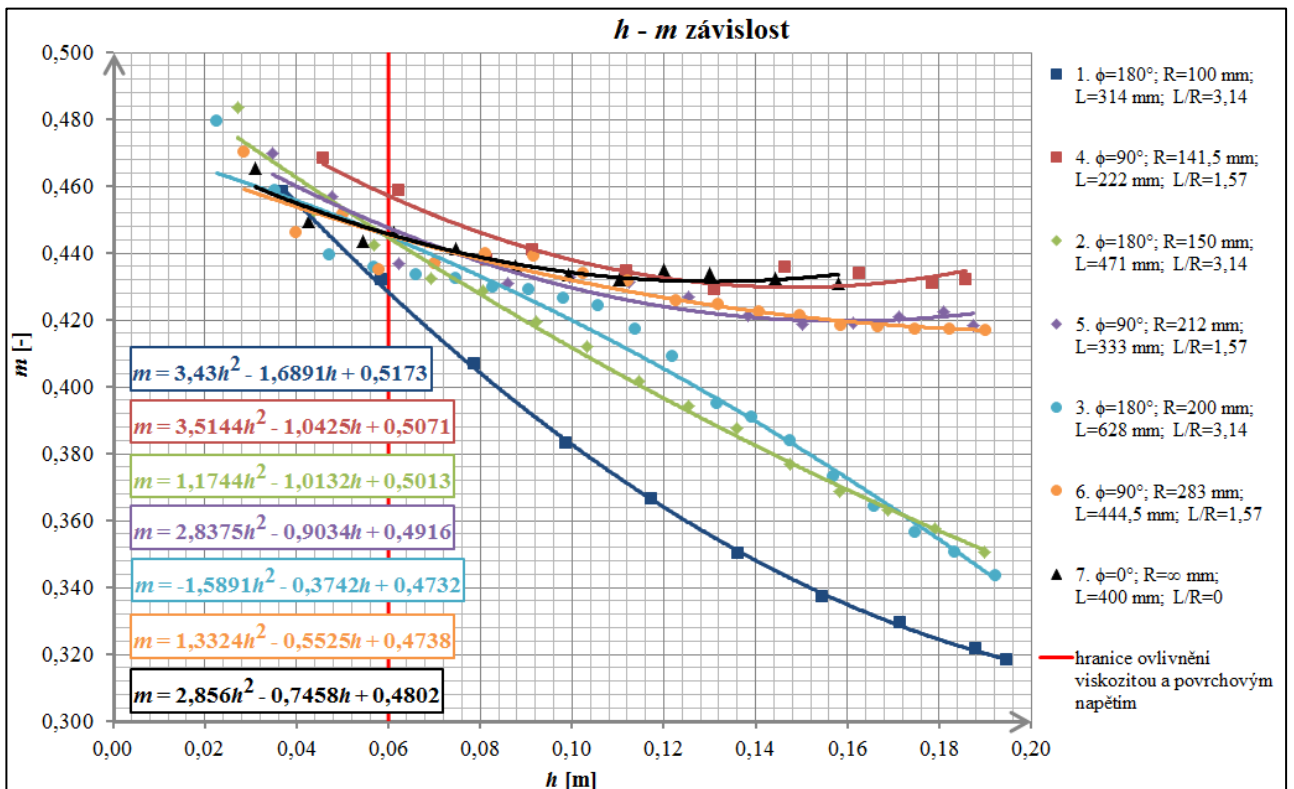
Tab. 5.9 Modelová varianta 7, $\varphi = 0^\circ$, $R = \infty \text{ mm}$, $L = 400 \text{ mm}$, $L/R = 0$

Q	h	h'	h/R	Q	h	m	$m_{\text{přímý}}$	m_{Rehbock}
$[\text{l.s}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[-]$	$[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$
4,5	31,1	31	0,0	0,0045	0,0310	0,465	0,425	0,410
7,0	42,6	43	0,0	0,0070	0,0426	0,449	0,427	0,413
10,0	54,5	54	0,0	0,0100	0,0545	0,444	0,428	0,416
12,0	61,3	61	0,0	0,0120	0,0613	0,446	0,429	0,418
16,0	74,8	75	0,0	0,0160	0,0748	0,441	0,431	0,421
20,0	87,5	87	0,0	0,0200	0,0875	0,436	0,433	0,425
24,0	99,2	99	0,0	0,0240	0,0992	0,434	0,435	0,428
28,0	110,2	110	0,0	0,0280	0,1102	0,432	0,436	0,431
32,0	119,9	120	0,0	0,0320	0,1199	0,435	0,437	0,433
36,0	129,9	129	0,0	0,0360	0,1299	0,434	0,439	0,436
42,0	144,3	144	0,0	0,0420	0,1443	0,432	0,441	0,440
48,0	158,1	159	0,0	0,0480	0,1581	0,431	0,443	0,444

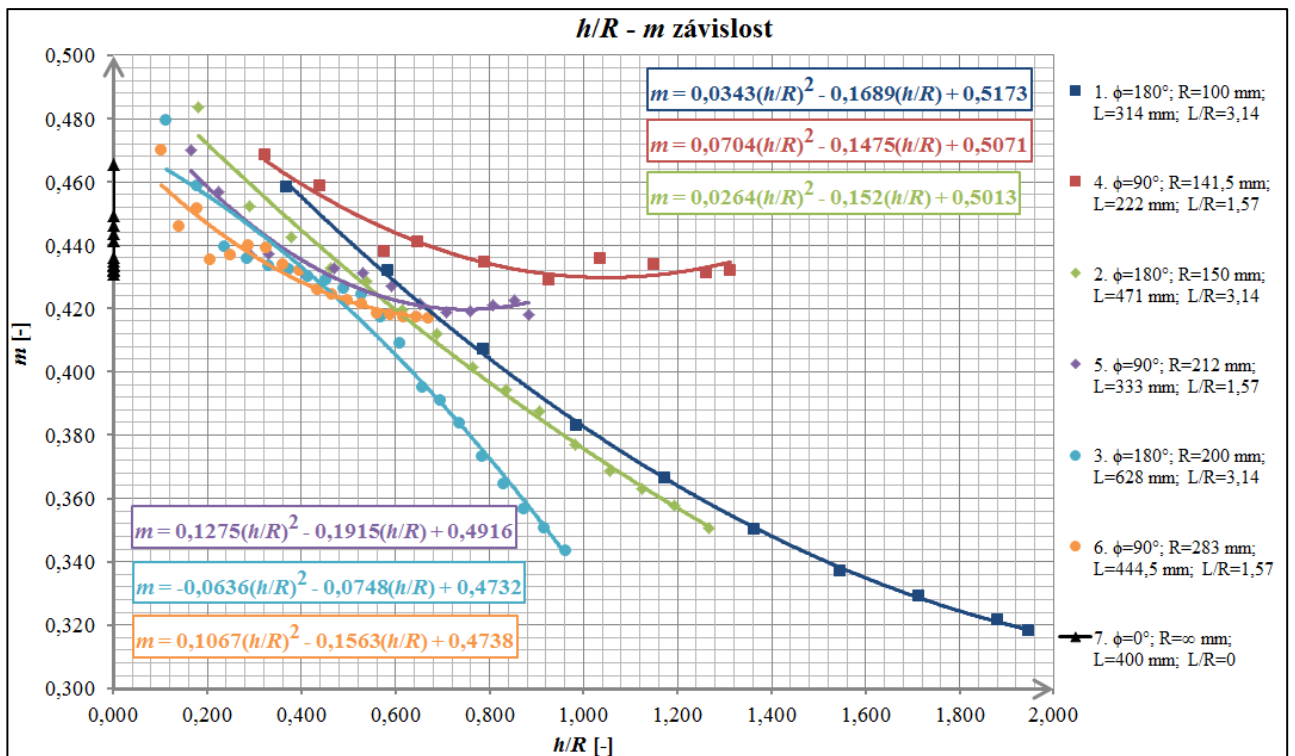
5.4 Přehled výsledků měření – grafické závislosti



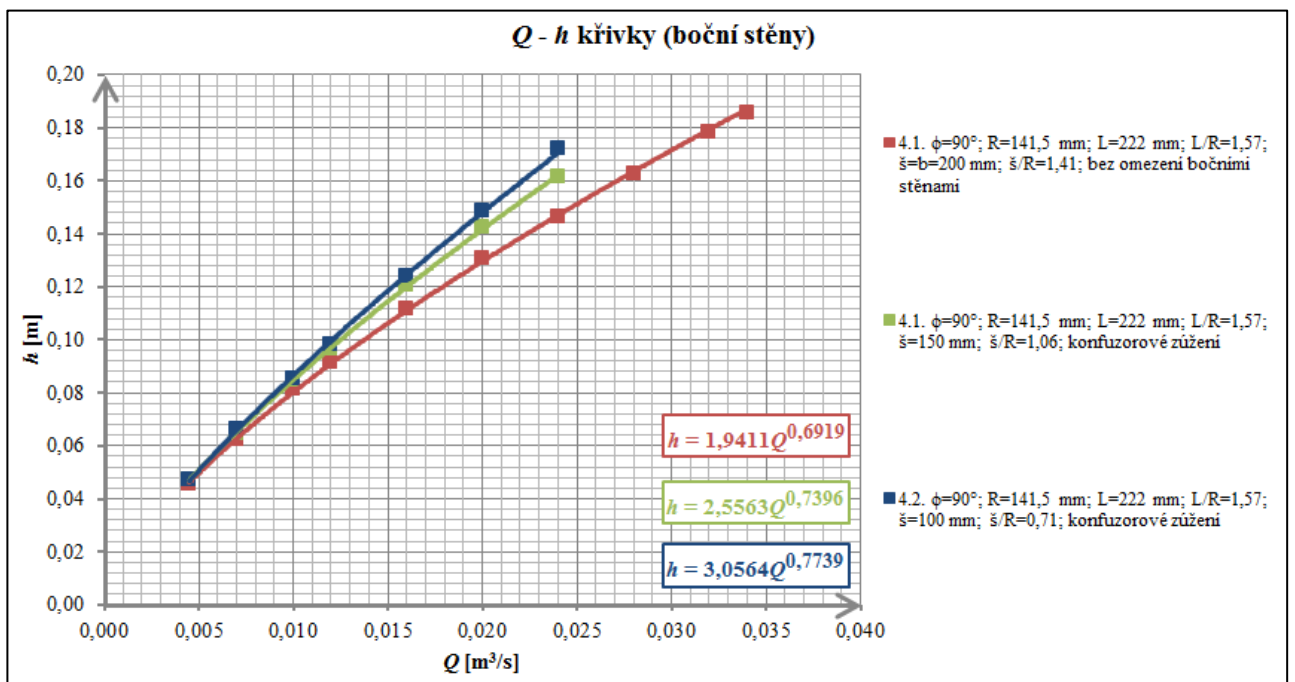
Graf 5.1 Q - h křivky základních modelových alternativ



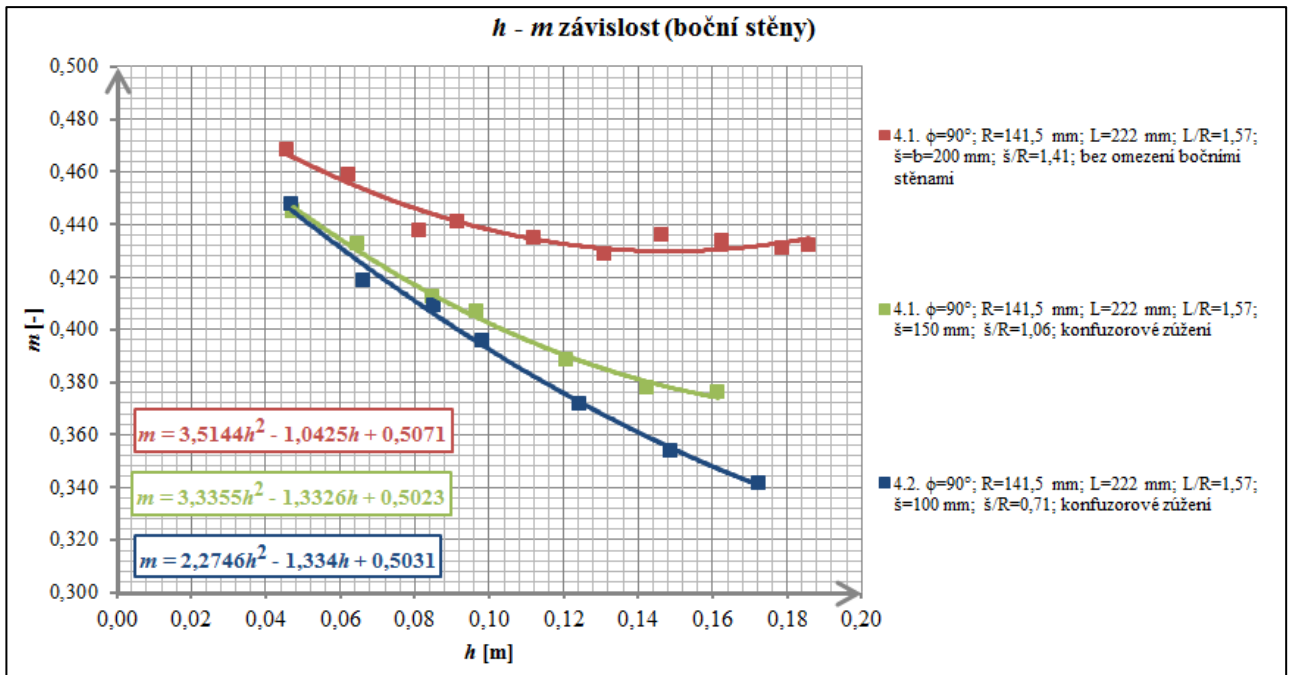
Graf 5.2 h - m závislosti základních modelových alternativ, při $h < 60$ mm je přepadový jev ovlivněn



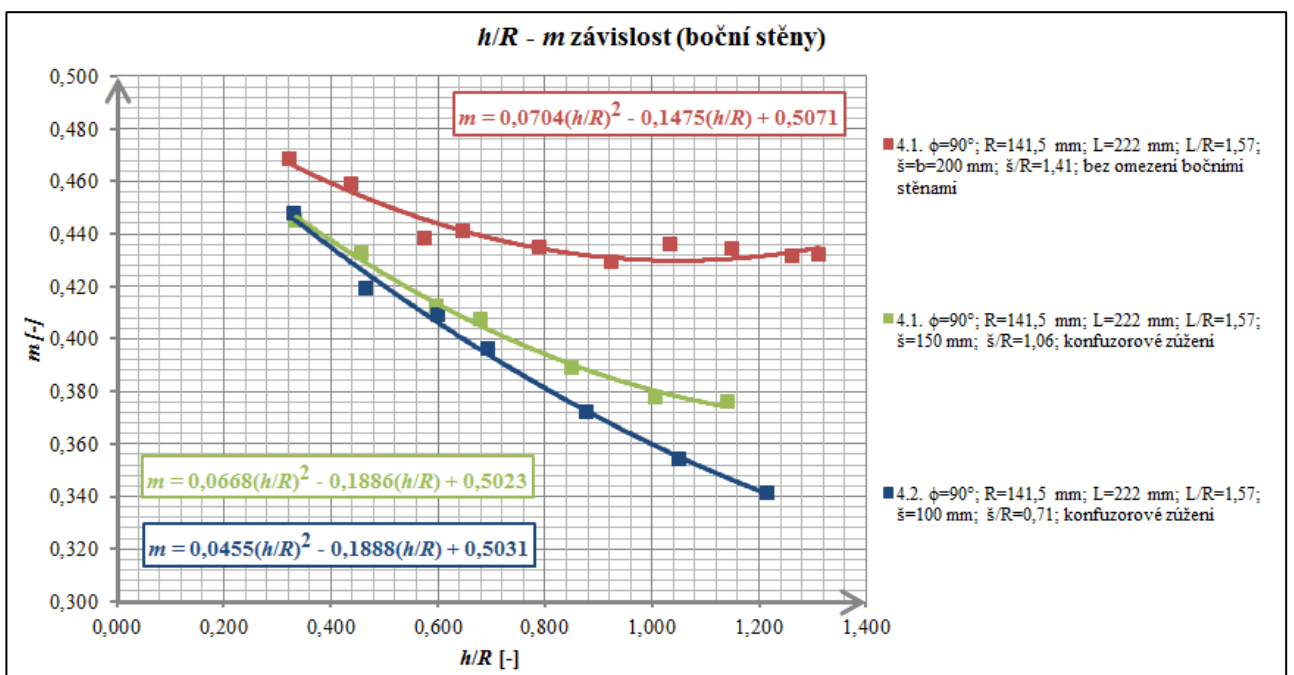
Graf 5.3 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ



Graf 5.4 $Q - h$ křivky modelových alternativ sloužících k určení vlivu zúžení světle šířky spadiště \check{s} , viz obr. 4.9

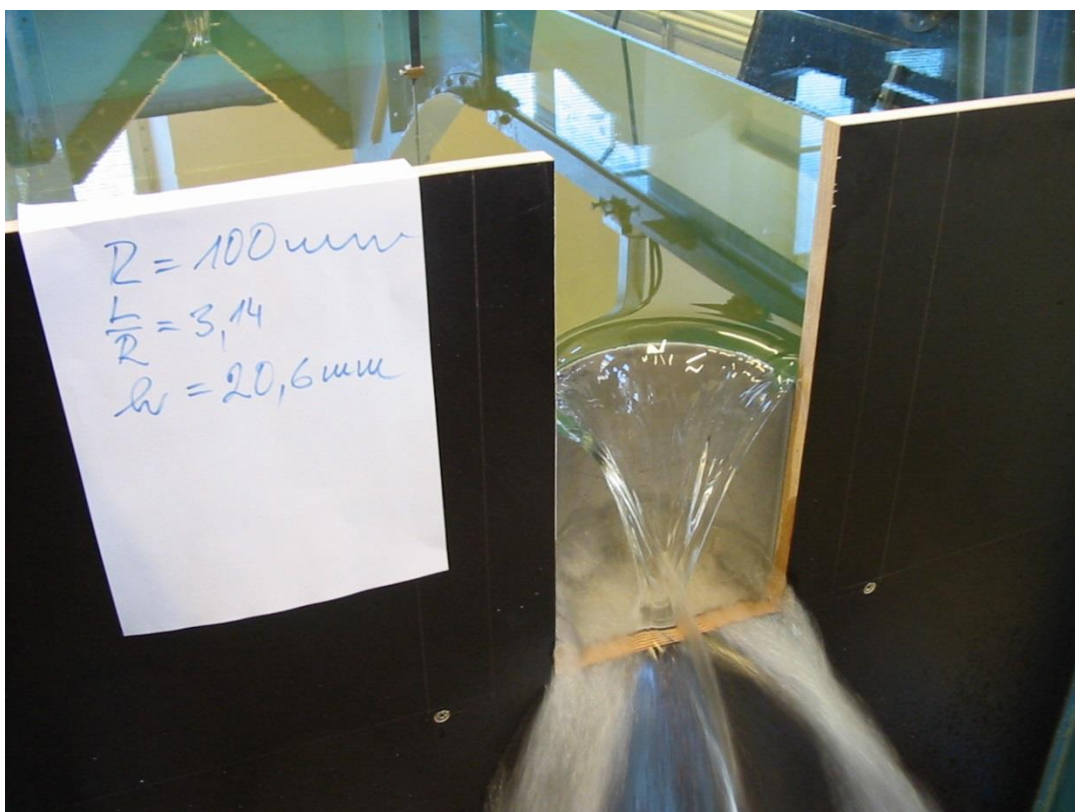


Graf 5.5 $h - m$ závislosti základních modelových alternativ sloužících k určení vlivu zúžení světlé šířky spadiště ξ , viz obr. 4.9

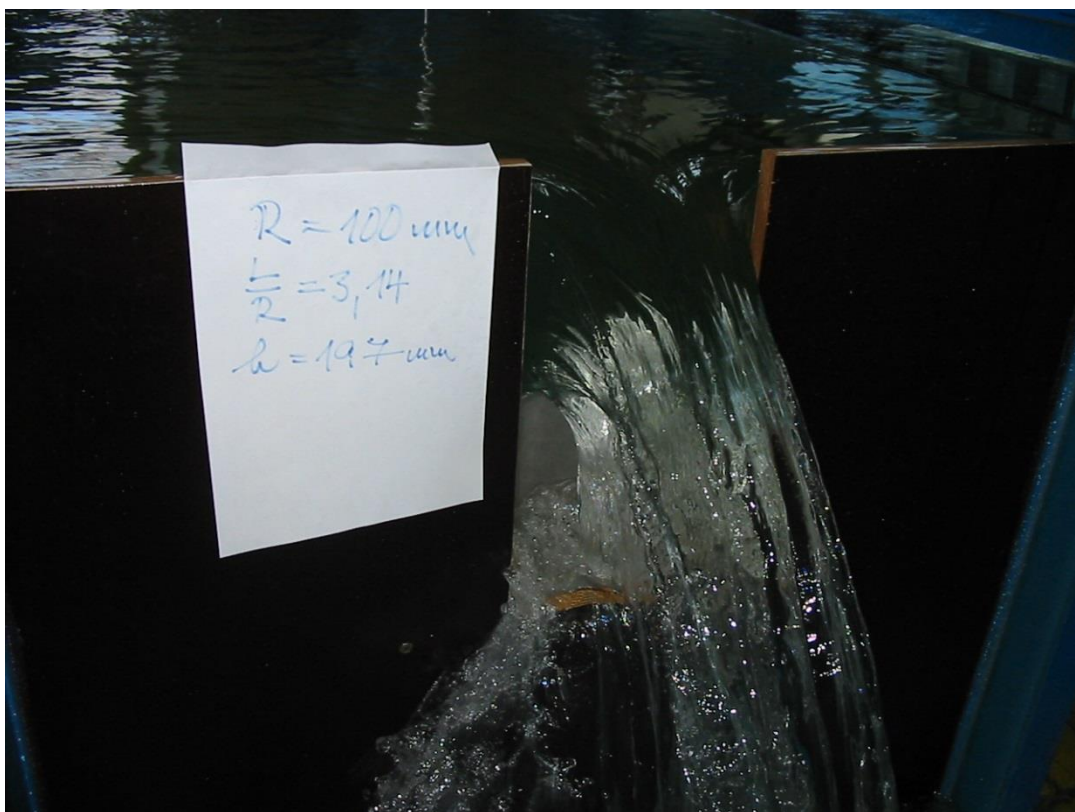


Graf 5.6 $h/R - m$ závislosti modelových alternativ sloužících k určení vlivu zúžení světlé šířky spadiště ξ , viz obr. 4.9

5.5 Fotodokumentace z měření



Obr. 5.1 Modelová varianta 1, $h = 20,6 \text{ mm}$, $L/R = 3,14$, $R = 100 \text{ mm}$



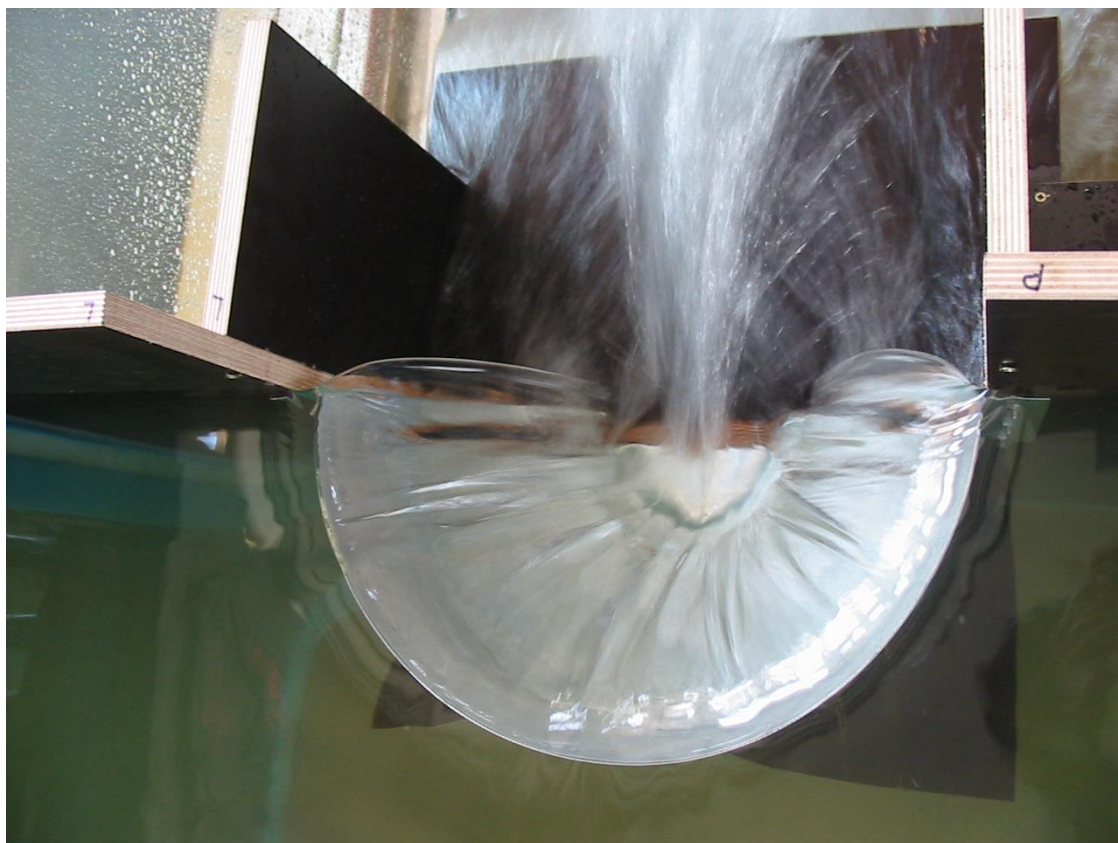
Obr. 5.2 Modelová varianta 1, $h = 197 \text{ mm}$, $L/R = 3,14$, $R = 100 \text{ mm}$



Obr. 5.3 Modelová varianta 2, $h = 27\text{ mm}$, $L/R = 3,14$, $R = 150\text{ mm}$, pohled shora



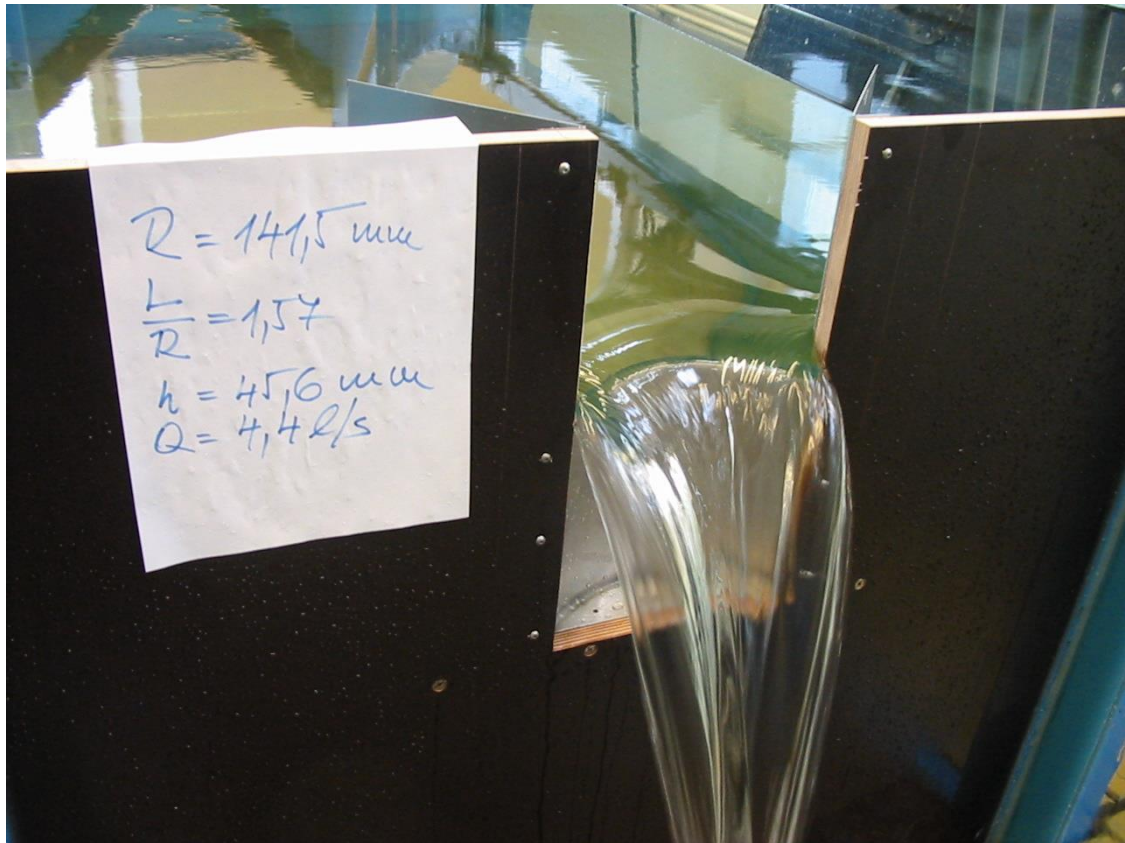
Obr. 5.4 Modelová varianta 2, $h = 114\text{ mm}$, $L/R = 3,14$, $R = 150\text{ mm}$, pohled shora



Obr. 5.5 Modelová varianta 3, $h = 39,5$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 200$ mm, pohled shora



Obr. 5.6 Modelová varianta 3, $h = 105$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 200$ mm, pohled shora



Obr. 5.7 Modelová varianta 4, $h = 45,6 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 141,5 \text{ mm}$



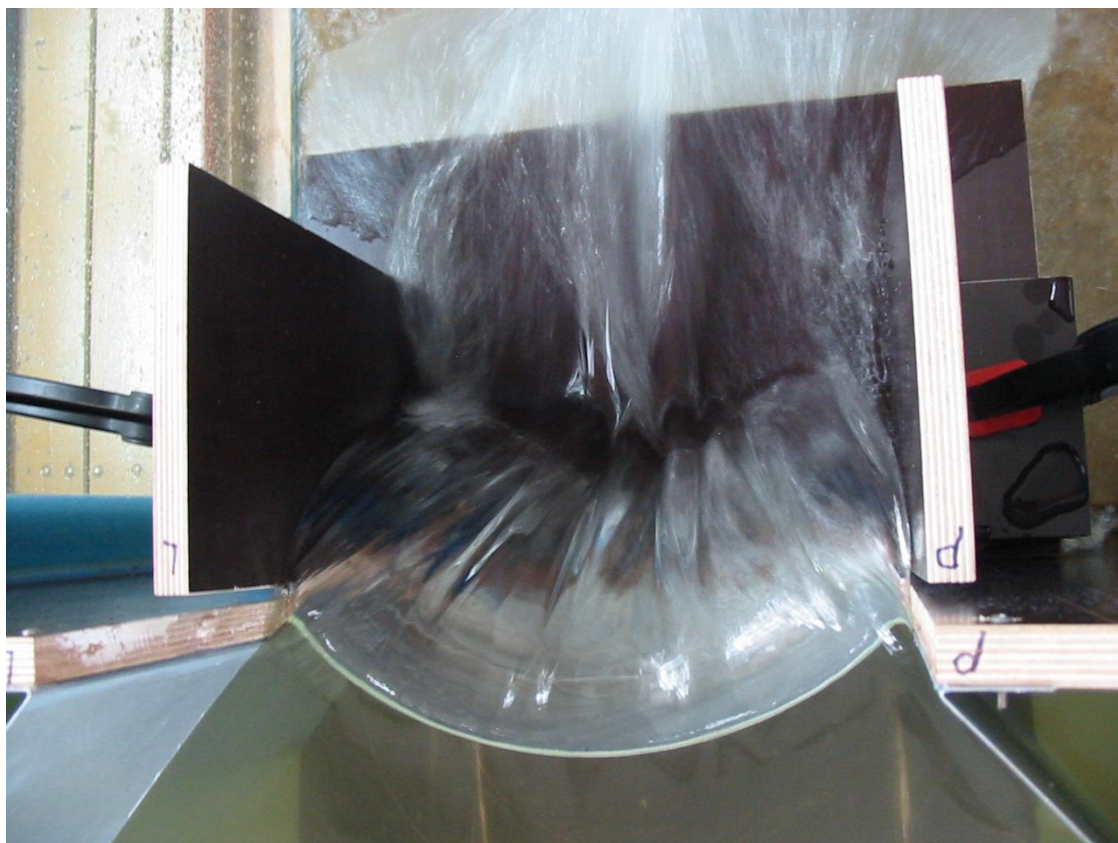
Obr. 5.8 Modelová varianta 4, $h = 146 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 141,5 \text{ mm}$, pohled shora



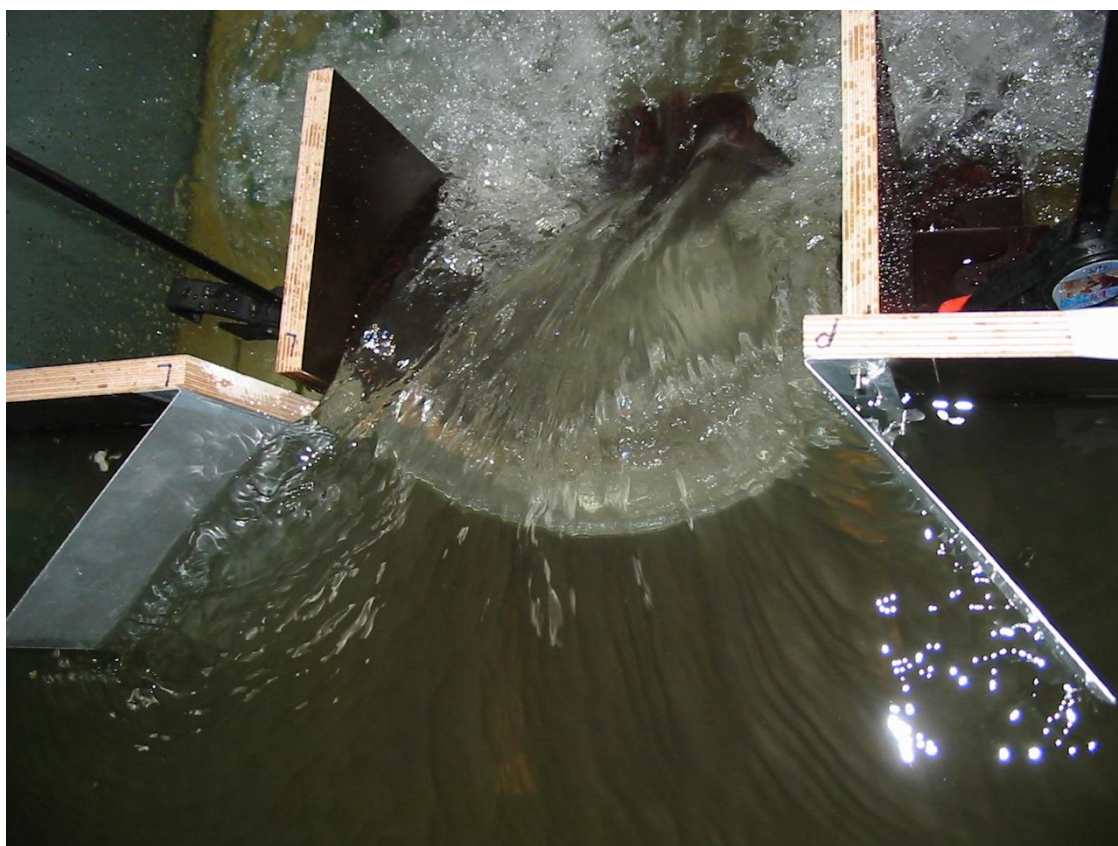
Obr. 5.9 Modelová varianta 4.1, $h = 161,5 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 141,5 \text{ mm}$, pohled shora



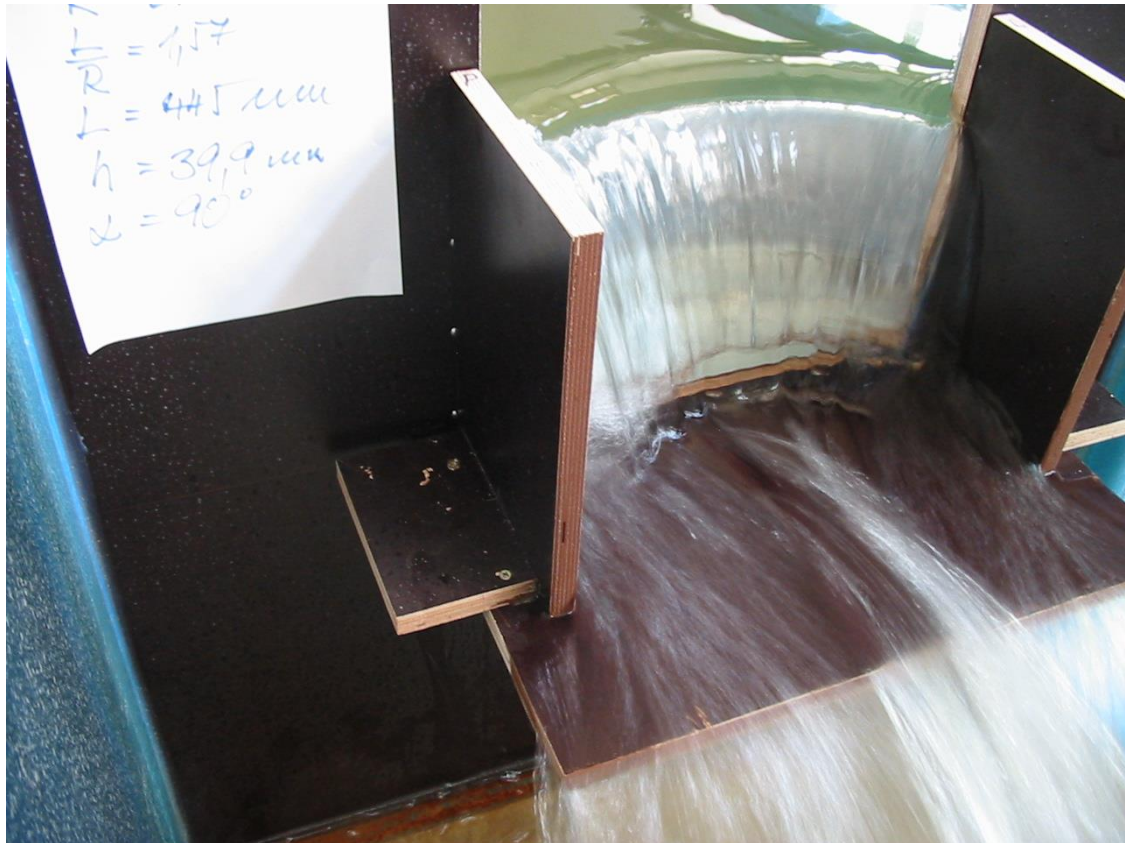
Obr. 5.10 Modelová varianta 4.2, $h = 148,9 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 141,5 \text{ mm}$, pohled shora



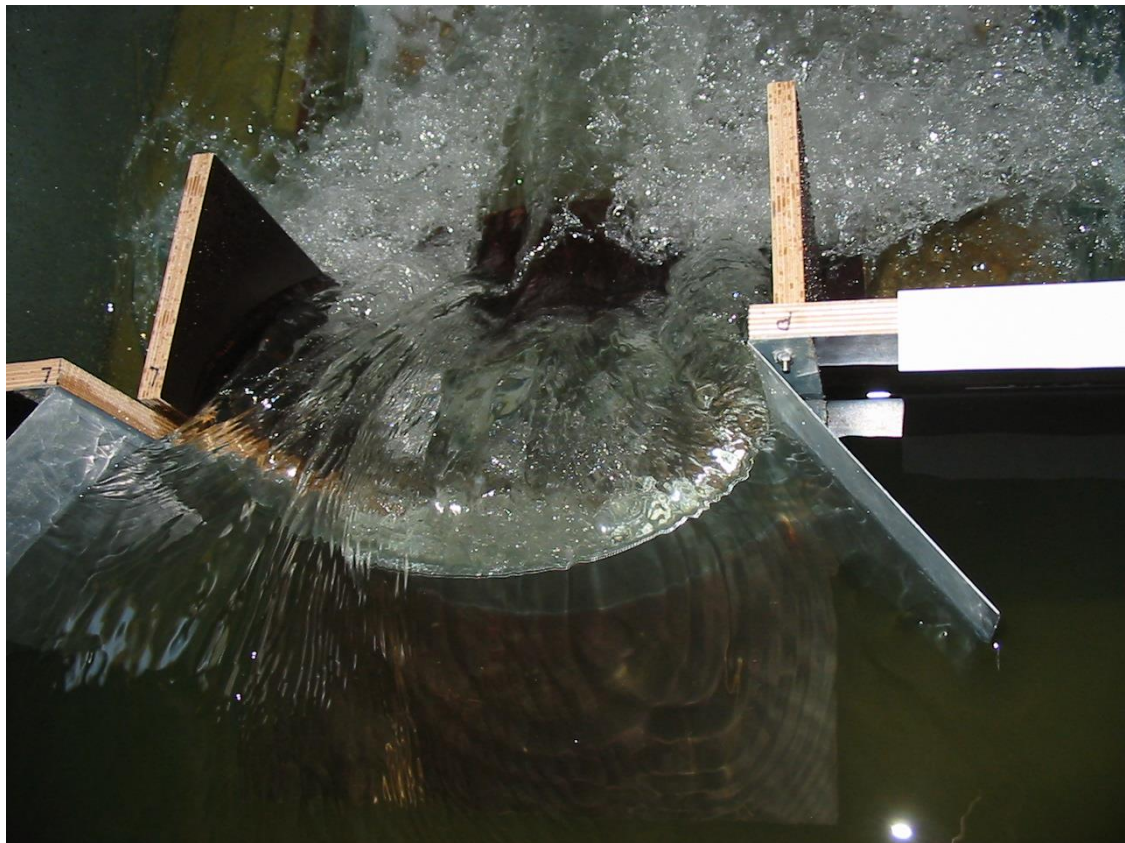
Obr. 5.11 Modelová varianta 5, $h = 47$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 212$ mm, pohled shora



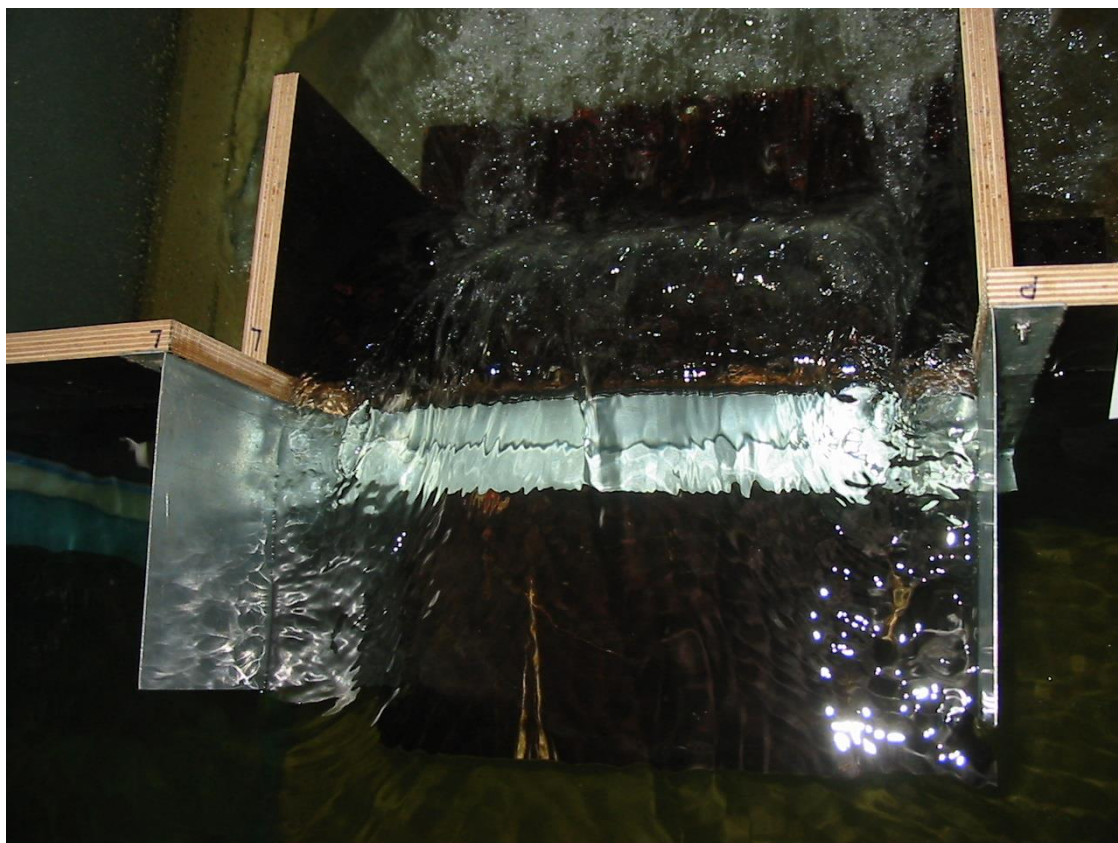
Obr. 5.12 Modelová varianta 5, $h = 125,5$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 212$ mm, pohled shora



Obr. 5.13 Modelová varianta 6, $h = 39,9 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 283 \text{ mm}$



Obr. 5.14 Modelová varianta 6, $h = 123 \text{ mm}$, $L/R = 1,57$, $R = 283 \text{ mm}$, pohled shora



Obr. 5.15 Modelová varianta 7, $h = 87,6 \text{ mm}$, $L/R = 0$, $R = \infty \text{ mm}$, pohled shora

6. ROZBOR VÝSLEDKŮ

6.1 Vyhodnocení výsledků

Pro přehlednost této podkapitoly jsou jednotlivé dílčí závěry vyplývající z modelového výzkumu rozebrány postupně.

6.1.1 Automodelovost

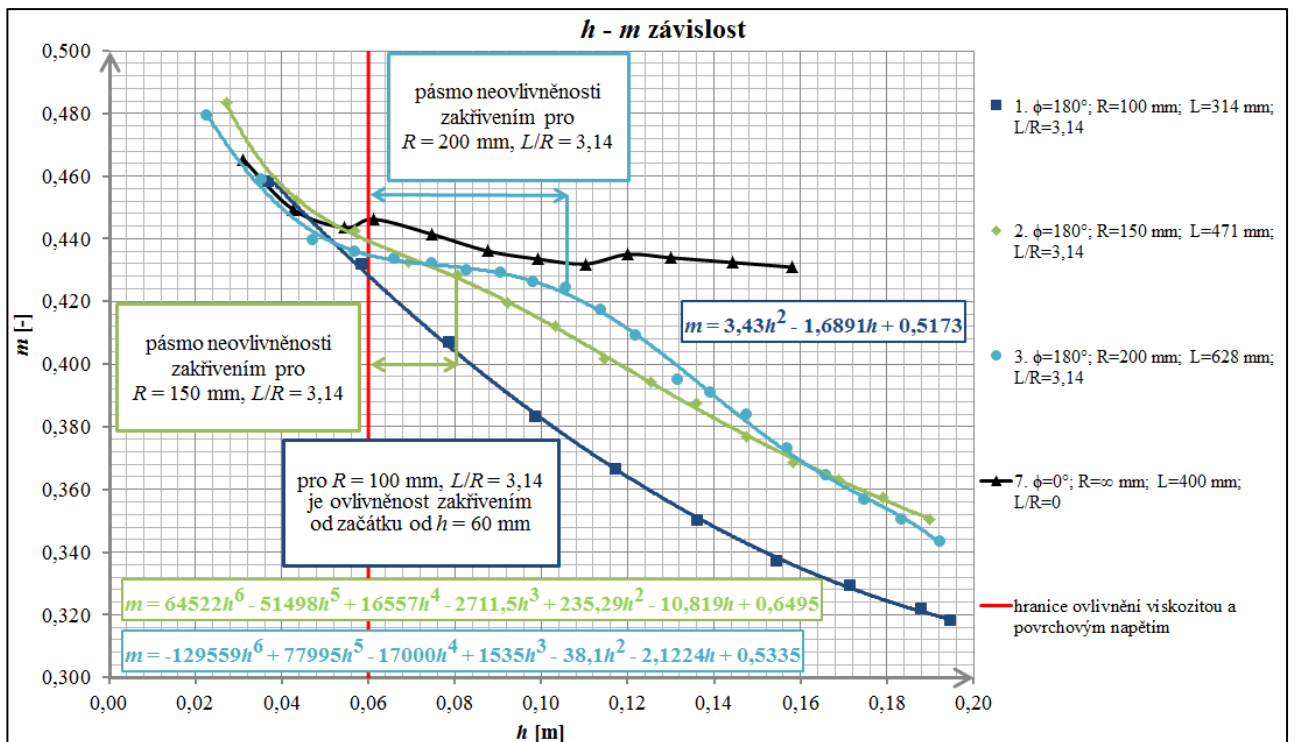
Jelikož přelivy modelujeme pomocí Froudeova kritéria, jsou pro nás rozhodující síly tíže. Ostatní síly lze s ohledem na zachování stejného režimu proudění na modelu a ve skutečnosti zanedbat. Pokud je režim proudění stejný na modelu a ve skutečnosti, pohybujeme se v automodelové oblasti. Jak vyplývá z grafu v podkapitole 5.4, graf 5.2, tak automodelovosti, kdy můžeme vliv ostatních sil zanedbat, je dosaženo při $h \gtrsim 60$ mm, což bylo popsáno již v mezích podobnosti v podkapitole 3.4, a poloměru zakřivení přelivné hrany $R \geq 100$ mm. Existuje možnost, že automodelovosti by bylo dosaženo i pro $R < 100$ mm, ale to nebylo v tomto modelovém výzkumu prokazováno.

6.1.2 Vliv zakřivení přelivu

Modelovým výzkumem bylo prokázáno, že zakřivený přeliv s poměrem $L/R = 1,57$ lze hodnotou přepadového součinitele m , tedy velikostí jeho kapacity Q , uvažovat jako přeliv přímý, což vyplývá z průběhů přepadového součinitele m , viz graf 5.2 a 5.3. Je tedy zřejmé, že i zakřivené přelivy s menší relativní délkou než $L/R = 1,57$ je možné pokládat při výpočtu přepadového množství Q za přelivy přímé shodné délky přelivné hrany L , jelikož přeliv přímý má poměr $L/R = 0$.

Pro $L/R = 3,14$ je však oproti $L/R = 1,57$ potvrzen vliv zakřivení na přepadový součinitel m , viz graf 5.2 a 5.3, tedy i na kapacitu přelivu. Lze předpokládat, že i pro větší poměr L/R bude kapacita ovlivněna. V grafu 6.1 jsou znázorněna pásma přepadových výšek, ve kterých ještě není zřejmý vliv zakřivení přelivu. Průběh $h - m$ závislosti modelové varianty 2 a 3 byl zde s ohledem na zachování naměřených hodnot a pro větší názornost proložen polynomem vyššího řádu, konkrétně šestého.

Všechny tyto jevy platí pro modelové uspořádání bez vlivu zúžení proudu bočními stěnami spadiště, tedy při přepadu do neomezeného prostoru podjezí.

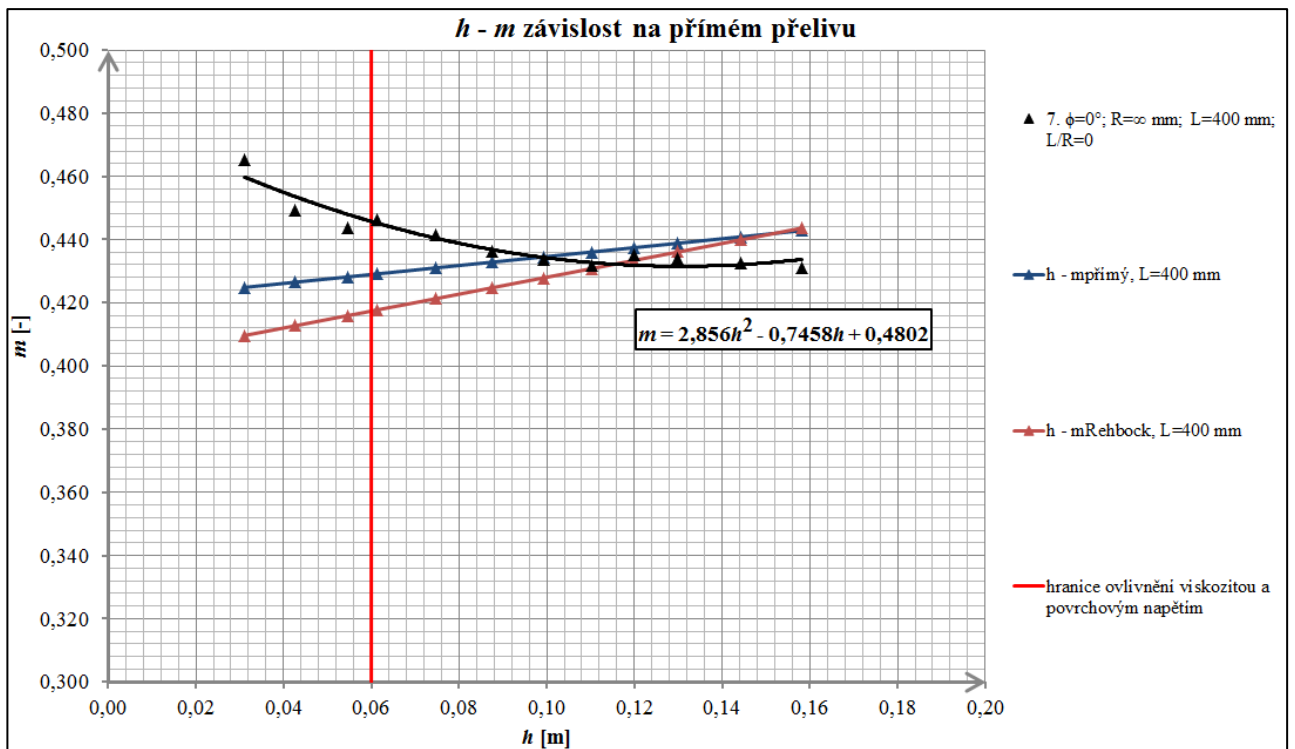


Graf 6.1 $h - m$ závislosti vybraných modelových alternativ s vyznačením pásem, kde ještě není patrný vliv zakřivení

6.1.3 Ovlivnění dolní vodou

Na modelových variantách s poměrem $L/R = 1,57$, kde byl zkoumán i vliv uspořádání spadiště, bylo prokázáno, že konfuzorové uspořádání spadiště má vliv na kapacitu přelivu. Přepadový součinitel m a tedy i kapacita přelivu je při zúžení spadiště nižší než na nezúženém spadišti, viz graf 5.4, 5.5 a 5.6. Při poměru $L/R = 1,57$ lze tedy považovat přeliv za přímý pouze při neomezeném odtoku. Při jeho omezení už dochází k výraznějšímu poklesu přepadového součinitele m , jedná se o jistou obdobu účinné šířky přelivu.

K ovlivnění přepadového jevu dochází i při umístění horizontální desky s upevňujícími postranními křídly k modelu přelivu, což vyplývá především ze srovnání $h - m$ závislostí pro různé přepadové součinitele m na přímém přelivu, viz graf 6.2. Z tohoto srovnání je patrné, že průběh přepadového součinitele m , který byl získán modelovým výzkumem během nainstalované horizontální desky, je rozdílný od průběhu součinitelů $m_{\text{přímý}}$ a m_{Rehbock} dle zdroje [9] a vypovídá o vlivu zvýšeného dna spadiště, které nainstalovaná horizontální deska simuluje.



Graf 6.2 $h - m$ závislosti na přímém přelivu (varianta 7), porovnání průběhu závislosti z modelového výzkumu a závislosti ze zdroje [9]

Je tedy potvrzeno, že uspořádání spadiště má nezanedbatelný vliv na ovlivnění přepadového jevu a velikosti přepadového součinitele. Boční usměrňovací pilíře usměrňují dráhy přepadajících paprsků vody za přelivnou hranou. Paprsky vody jsou pak nuceny do sebe navzájem narážet nejen díky zakřivení přelivu, ale i díky bočním pilířům. Navíc je-li odlehlost koruny přelivu a dna na vzdušné straně malá, pak může zpětný válec „nadzvedávat“ přepadový paprsek, což je rozdíl oproti šachtovému přelivu a což přepadový jev též ovlivňuje.

6.2 Porovnání výsledků s jinými autory

6.2.1 Porovnání výsledků s hodnotami dle Wagnera

Wagner se zabýval přepadem přes ostrou kruhovou hranu (šachtový přeliv s ostrou hranou). Pro poměr $h/R = 0,2$ má podle Wagnera součinitel přepadu hodnotu $m = 0,412$. Poměr h/R má oproti poměru h/d dvojnásobnou hodnotu, Wagnerovy závěry se tedy vztahují k mezím dokonalého přepadu, jelikož platí $h/d = 0,1 \leq h/d = 0,225$, viz podkapitola 2.5.2.

Poměru velikosti přibližně $h/R = 0,2$ bylo během modelového výzkumu dosaženo na čtyřech modelových variantách. Byly to varianty s vyššími hodnotami poloměru zakřivení

R , konkrétně dvě varianty s poměrem $L/R = 1,57$ – varianta 2 ($R = 150$ mm) a varianta 3 ($R = 200$ mm) a dvě modelové varianty s poměrem $L/R = 3,14$ – varianta 5 ($R = 212$ mm) a varianta 6 ($R = 283$ mm).

V tabulce 6.1 jsou hodnoty přepadové výšky h voleny tak, aby hodnota poměru odpovídala hodnotě $h/R = 0,2$. Hodnoty přepadového množství Q jsou pak odvozeny z rovnic z grafu 5.1 pro jednotlivé modelové alternativy. Tyto rovnice vyjadřují mocninnou funkci, která byla k proložení jednotlivých $Q - h$ závislostí použita. Součinitel přepadu m byl následně získán díky hodnotám Q a h vyjádřením z obecné přepadové rovnice, viz podkapitola 5.2 rovnice (5.1).

Tab. 6.1 Velikost přepadového součinitele m na vybraných modelových variantách při $h/R = 0,2$

varianta	L/R [-]	R [mm]	h [mm]	Q [l.s ⁻¹]	h/R [-]	m [-]
2	3,14	150	30,00	5,31	0,2	0,490
3	3,14	200	40,00	10,27	0,2	0,461
5	1,57	212	42,40	5,87	0,2	0,456
6	1,57	283	56,60	11,80	0,2	0,445

Z tabulky vyplývá, že všechny hodnoty přepadového součinitele m , které byly odvozeny z výsledků výzkumu pro poměr $h/R = 0,2$ jsou větší než hodnota, kterou pro tento samý poměr udává Wagner pro ostrou kruhovou hranu, tedy $m = 0,412$. Tato kruhová hrana může představovat přelivnou hranu šachtového přelivu, který není ovlivněn dolní vodou v důsledku zahlcení odpadní štol, viz podkapitola 2.5.2. Jelikož se s hodnotami h pohybujeme v oblasti, která nespĺňuje podmínky automodelovosti, viz podkapitola 3.4 a 6.1.1, tak je nutné uvažovat i vliv viskozity a povrchového napětí na výsledky měření. Povrchové napětí hodnotu přepadového součinitele m zvyšuje, viskozita hodnotu součinitele m snižuje. Působení obou těchto vlivů se projeví celkovým zvýšením součinitele přepadu m , zvláště u nižších přepadových výšek h . Ale i u modelové varianty 6, kde přepadová výška h už téměř splňuje automodelovost je rozdíl oproti Wagnerovi stále patrný. Tímto porovnáním s Wagnerem bylo tedy prokázáno, že na zakřivených přelivech dochází k menšímu ovlivnění přepadového množství, hodnota součinitele přepadu m je tedy vyšší, než na přelivech s uzavřenou kruhovou přelivnou hranou, což bylo předpokládáno, viz podkapitola 2.4.

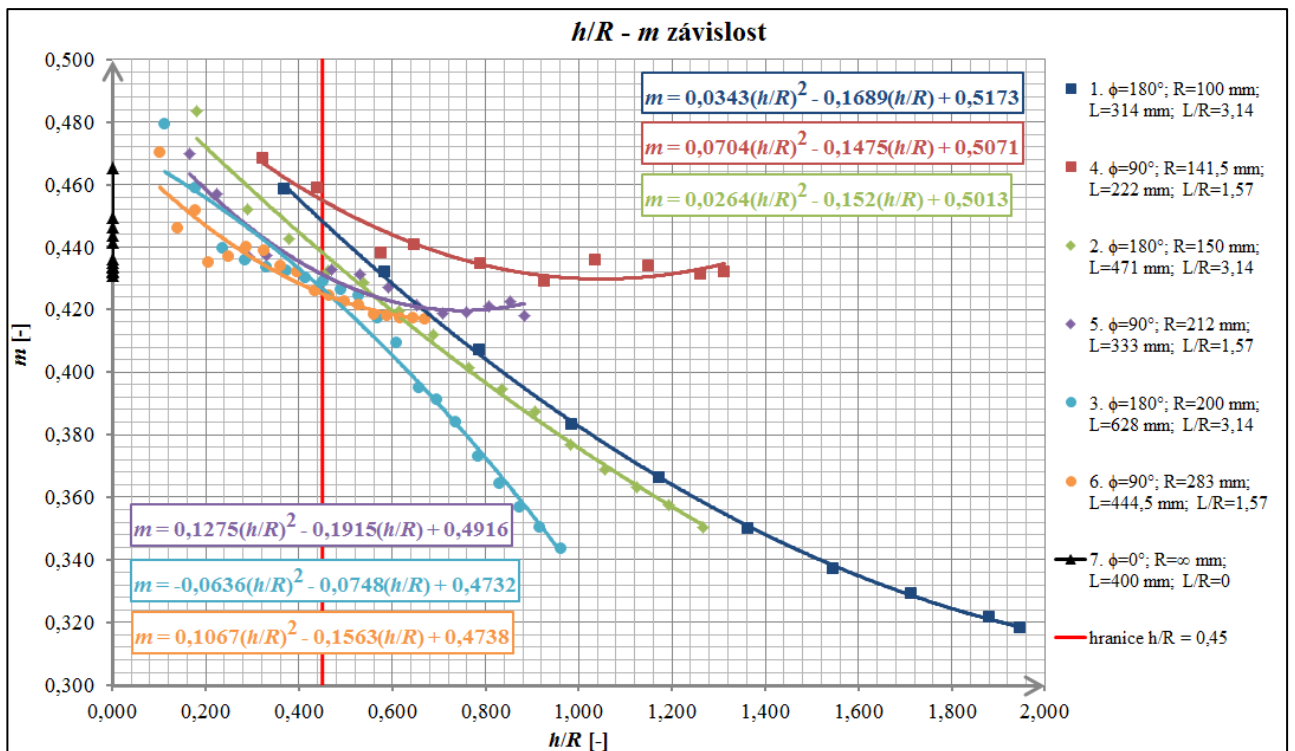
Jak již bylo zmíněno, tak přepad je dle Wagnera dokonalý, respektive neovlivněný, pokud je splněna podmínka $h/d \leq 0,225$, tedy $h/R \leq 0,45$. V tabulce 6.2 jsou stejně jako v tabulce

6.1 uvedeny hodnoty h , Q a m , které byly získány stejným postupem, nyní však odpovídají hodnotě poměru $h/R = 0,45$. Hodnoty přepadové výšky h v tabulce tedy vlastně určují, od jaké přepadové výšky je přepadový paprsek dle Wagnera ovlivněn pro jednotlivé velikosti poloměru zakřivení R . Hodnoty h na modelových variantách s $L/R = 3,14$ z tabulky 6.2 lze srovnat s průběhem $h - m$ závislostí v grafu 6.1. Ze srovnání vyplývá, že k ovlivnění přepadového jevu na zakřiveném přelivu dochází podle výsledků modelového výzkumu při větší přepadové výšce než na šachtovém přelivu. Za vypovídající lze označit modelovou variantu 2, kde ovlivnění dle Wagnera pro ostrou kruhovou hranu začíná na přepadové výšce $h = 67,50$ mm, zatímco dle modelového výzkumu při $h \cong 80,30$ mm. Další vypovídající modelovou variantou je varianta 3, kde ovlivnění dle Wagnera začíná na $h = 90,00$ mm a dle modelového výzkumu na $h = 105,80$ mm. Přepadová výška u modelové varianty 1 nesplňuje podmínky automodelovosti, tudíž není pro toto srovnání vypovídající. Rovněž varianty 4, 5, 6 nejsou pro toto srovnání vypovídající, a to vzhledem k nevýraznému vlivu zakřivení na ovlivnění přepadového jevu při poměru $L/R = 1,57$. Tento poznatek, stejně jako předchozí, potvrzuje ne zcela korektní srovnatelnost zakřivených přelivů se šachtovými z hlediska jejich kapacity při použití tradičních vztahů s uvažováním rozvinuté délky přelivné hrany L .

Tab. 6.2 Velikost přepadové výšky h , od které je dle Wagnera přepadový jev ovlivněn

varianta	L/R	R	h	Q	h/R	m
	[-]	[mm]	[mm]	[l.s ⁻¹]	[-]	[-]
1	3,14	100	45,00	6,00	0,45	0,452
2	3,14	150	67,50	15,70	0,45	0,429
3	3,14	200	90,00	30,88	0,45	0,411
4	1,57	142	63,68	7,16	0,45	0,453
5	1,57	212	95,40	18,85	0,45	0,434
6	1,57	283	127,35	38,07	0,45	0,425

V grafu 6.3 je srovnání skutečného průběhu $h/R - m$ závislostí z modelového výzkumu a hodnoty $h/R = 0,45$, kdy dochází dle Wagnera k ovlivnění přepadového jevu.



Graf 6.3 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ v porovnání s hodnotou $h/R = 0,45$

Wagnerovy poznatky a výsledky byly v této podkapitole převzaty ze zdrojů [4] a [6].

6.2.2 Porovnání výsledků s hodnotami dle Grundlagen des Wasserbaus

Německá literatura Grundlagen des Wasserbaus [10] uvádí způsob výpočtu kapacity na šachtovém přelivu dle následující přepadové rovnice:

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}, \quad (6.1)$$

- kde Q ... kapacita přelivu,
 μ ... přepadový součinitel,
 L ... délka přelivné hrany,
 g ... tíhové zrychlení,
 h ... přepadová výška.

Pro přepadový součinitel μ jsou v této literatuře uvedeny dvě grafické závislosti $h/d - \mu$, jedna pro šachtové přelivy ve tvaru kalichu, druhá pro ostrohranné šachtové přelivy, ta spíše odpovídá našemu případu a byla pro porovnání vybrána. Z těchto závislostí lze odvodit velikost přepadového součinitele μ na základě známého poměru h/d . Pro naše účely byla vybraná závislost upravena na závislost $h/R - m$ (viz tab. 6.3), dle následujících převodních vztahů:

$$m = 2/3 \cdot \mu, \quad (6.2)$$

kde m ... přepadový součinitel,

μ ... přepadový součinitel dle Grundlagen des Wasserbaus [10];

$$(h/R) = 2 \cdot (h/d), \quad (6.3)$$

kde h ... přepadová výška,

R ... poloměr zakřivení přelivné hrany,

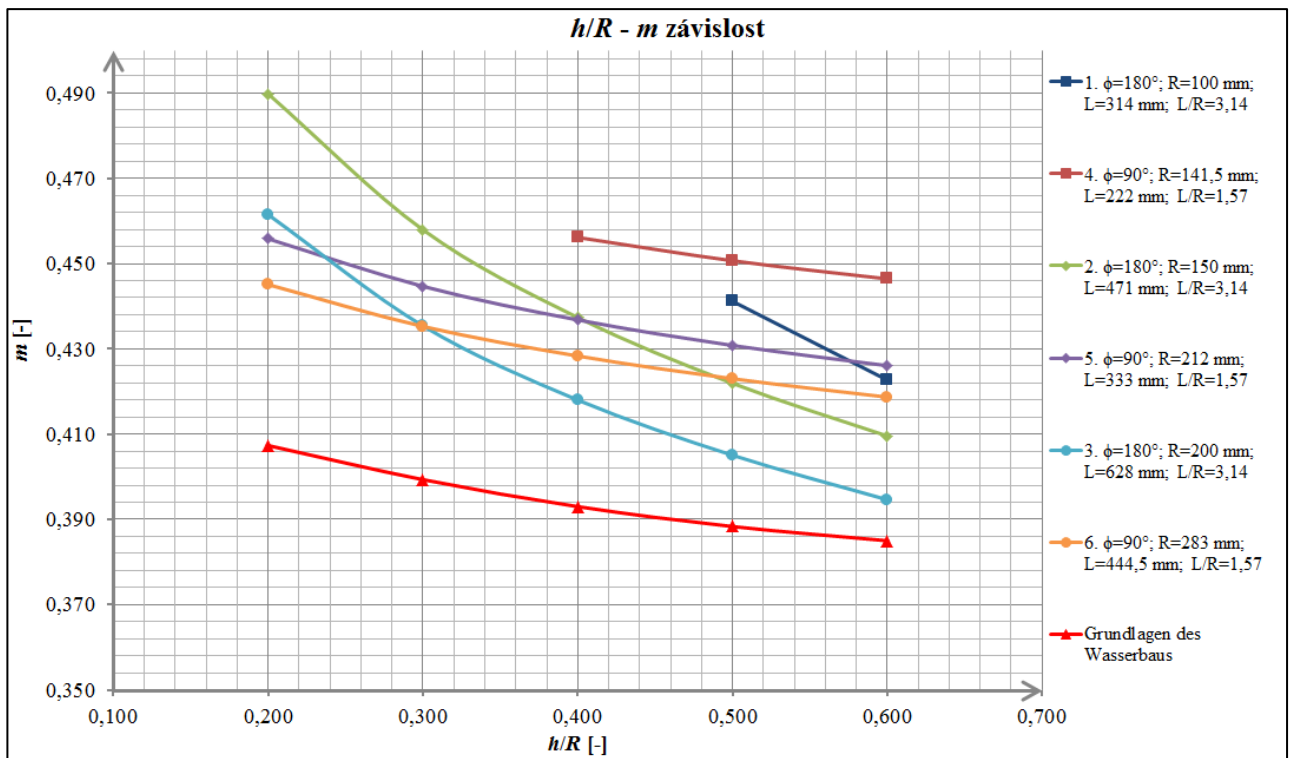
d ... průměr zakřivení přelivné hrany.

V tabulce 6.3 jsou nadále uvedeny přepadové součinitele m i pro různé modelové varianty při vybraných poměrech h/R . Tabulka byla zpracována obdobně jako tabulky 6.1 a 6.2. Některé hodnoty nejsou v tabulce vyplněny, protože na modelových alternativách 1 a 4 nebylo během měření dosaženo tak nízkých poměrů h/R .

Tab. 6.3 Srovnání přepadových součinitelů m s Grundlagen des Wasserbaus [10]

Grundlagen des Wasserbaus				varianta 1	varianta 2	varianta 3	varianta 4	varianta 5	varianta 6
h/d	h/R	μ	m	m	m	m	m	m	m
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,10	0,20	0,611	0,407	-	0,490	0,461	-	0,456	0,445
0,15	0,30	0,599	0,399	-	0,458	0,435	-	0,445	0,435
0,20	0,40	0,590	0,393	-	0,437	0,418	0,456	0,437	0,428
0,25	0,50	0,583	0,388	0,441	0,422	0,405	0,451	0,431	0,423
0,30	0,60	0,578	0,385	0,423	0,410	0,395	0,446	0,426	0,419

Průběhy všech závislostí $h/R - m$ jsou vyneseny v grafu 6.4. Z tohoto grafu vyplývá, že hodnoty přepadového součinitele m z modelového výzkumu jsou oproti hodnotám přepadového součinitele m pro šachtový přeliv podle Grundlagen des Wasserbaus [10] vyšší, což platí pro všechny modelové varianty. Podobného závěru bylo dosaženo i při porovnání výsledků s výsledky dle Wagnera v předchozí podkapitole. Při vyšších hodnotách poměru h/R se průběhu součinitele přepadu m pro šachtový přeliv podobá pouze průběh součinitele přepadu m na modelové variantě 2 a 3.



Graf 6.4 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ v porovnání se závislostí z *Grundlagen des Wasserbaus* [10]

6.2.3 Porovnání výsledků s hodnotami dle Hydraulic design criteria

Literatura vydaná sborem inženýrů americké armády Hydraulic design criteria [11] se rovněž zabývá šachtovými přelivy a výpočtem jejich kapacity. Přepadová rovnice uvedená v tomto zdroji má následující tvar:

$$Q = C \cdot (2\pi R) \cdot H_d^{3/2}, \quad (6.4)$$

kde Q ... kapacita přelivu,

C ... přepadový součinitel,

π ... Ludolfovo číslo,

R ... poloměr zakřivení přelivné hrany,

H_d ... návrhová přepadová výška – vzdálenost mezi čarou energie a spodním lícem přepadového paprsku.

Pro naše potřeby budeme uvažovat s určitým zjednodušením, předpokládejme, že návrhová přepadová výška H_d dle výše uvedené rovnice (6.4) se bude rovnat přepadové výšce h . Přepadový součinitel C převedeme na přepadový součinitel m pomocí převodního vztahu:

$$m = C/\sqrt{2g} \quad (6.5)$$

kde m ... přepadový součinitel,

C ... přepadový součinitel dle Hydraulic design criteria [11],

g ... tíhové zrychlení ve stopách za sekundu na druhou [$\text{ft}\cdot\text{s}^{-2}$].

Dále je třeba hodnoty z této literatury přepočítat na naše jednotky, jelikož je zde použit systém tzv. imperiálních jednotek jako je např. jednotka délky – stopa [ft] nebo jednotka průtoku – kubická stopa za sekundu [cfs]. Vztahy mezi imperiálními a našimi jednotkami jsou následující:

$$1 \text{ ft} = 30,48 \text{ cm} = 0,3048 \text{ m}; \quad (6.6)$$

$$1 \text{ cfs} = 28,31 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 0,02831 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}. \quad (6.7)$$

Pro porovnání výsledků byla vybrána modelová varianta 1, kde poměr $p/R = 2,0$, jelikož přímo pro tuto hodnotu je zde uvedena grafická závislost $C - H_d/R$, se zjednodušením $C - h/R$, kterou upravíme na $h/R - m$. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.4, která je obdobná jako tabulky z předchozích podkapitol.

Tab. 6.4 Srovnání přepadových součinitelů m na variantě 1 s Hydraulic design criteria [11]

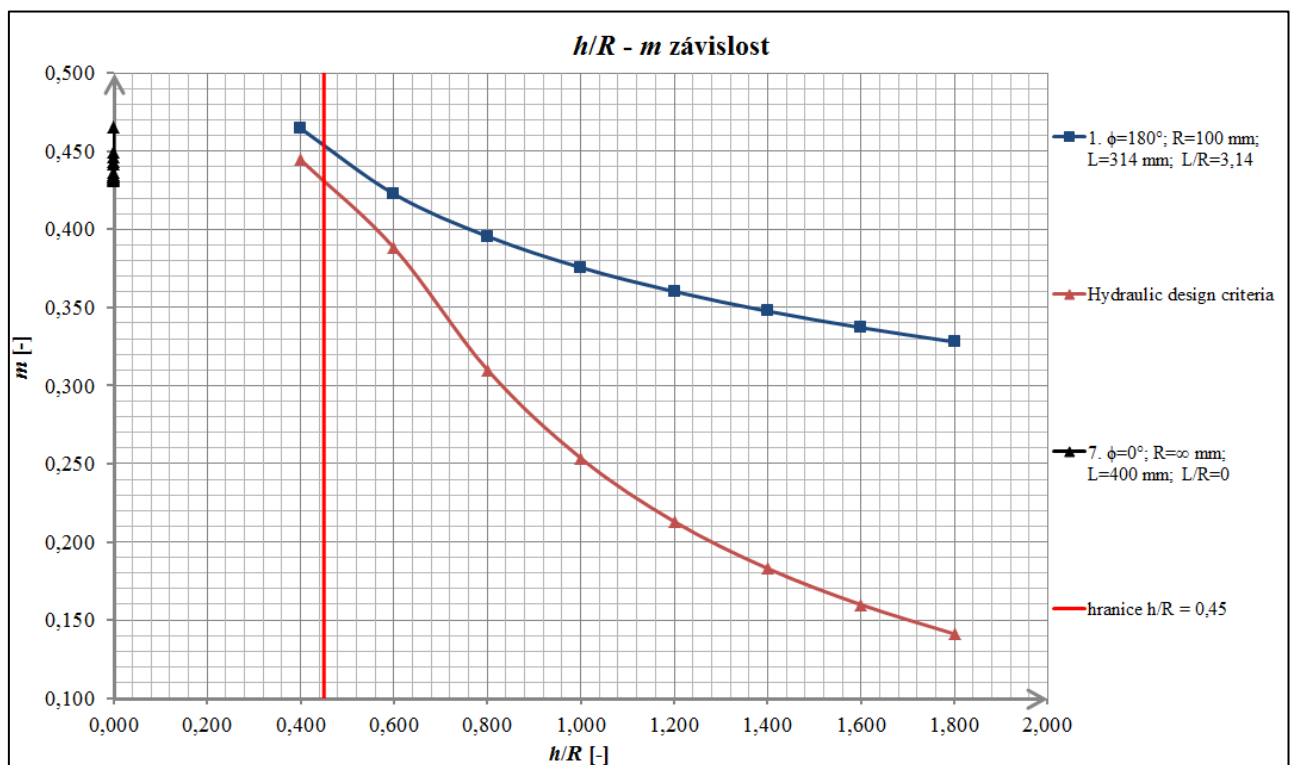
			Hydraulic design criteria		modelová varianta 1
h	Q	h/R	C	m	m
[mm]	[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[-]	[-]	[-]	[-]
40,00	5,17	0,4	3,566	0,445	0,465
60,00	8,64	0,6	3,114	0,388	0,423
80,00	12,45	0,8	2,488	0,310	0,396
100,00	16,52	1,0	2,034	0,254	0,376
120,00	20,83	1,2	1,709	0,213	0,360
140,00	25,33	1,4	1,468	0,183	0,348
160,00	30,01	1,6	1,282	0,160	0,337
180,00	34,84	1,8	1,132	0,141	0,328

Porovnání je patrné z vynesných závislostí v grafu 6.5, kde jsou navíc ponechány původní naměřené hodnoty přepadového součinitele m pro přímý přeliv k přibližnému porovnání rozsahu hodnot tohoto součinitele mezi všemi třemi typy přelivů.

Průběh grafu 6.5 potvrzuje dílčí závěry předchozích dvou podkapitol 6.2.1 a 6.2.2, tudíž že hodnoty přepadového součinitele m , ke kterým jsme dospěli během modelového výzkumu,

se poměrně výrazně liší od přepadových součinitelů pro šachtový přeliv. Hodnoty těchto dvou přepadových součinitelů se přiblíží pouze při podmínce dokonalosti dle Wagnera, tedy $h/R \leq 0,45$, viz podkapitola 2.5.2 a 6.2.1. To je způsobeno tím, že při splnění podmínce dokonalosti, tedy neovlivnění, se proudění na šachtovém přelivu podobá proudění na přelivu zakřiveném více než při přepadu zahlceném, viz obr. 2.9 v podkapitole 2.5.2. Kapacita zakřivených přelivů je i přesto při porovnání s přelivy šachtovými větší.

Jelikož bylo možné graf zpracovat pro větší škálu hodnot poměru h/R , tak je patrné velké kolísání přepadového součinitele v závislosti na hodnotě tohoto poměru. Se zvyšující se hodnotou poměru h/R výrazně klesá kapacita šachtového přelivu. Zatímco u přelivu zakřiveného je pokles mírnější. Rozsah hodnot přepadového součinitele m je na zakřiveném a šachtovém přelivu poměrně značně rozdílný. Podle průběhu grafu 5.3, případně 6.3 lze ale předpokládat, že při vyšší hodnotě poloměru zakřivení R na modelových variantách 2 a 3 by se rozsah hodnot součinitele přepadů m z modelového výzkumu a dle Hydraulic design criteria [11] více přiblížil.



Graf 6.5 $h/R - m$ závislost modelové varianty 1 v porovnání se závislostí z Hydraulic design criteria [11]

Z porovnání výsledků získaných třemi postupy pro kapacity šachtových přelivů při dokonalém režimu přepadu s výsledky modelových zkoušek lze potvrdit jejich nespolehlivost pro aplikaci na půdorysně zakřivené přelivy. Postupy odvozené pro šachtové přelivy nelze pro stanovení přepadového množství na půdorysně zakřivených přelivech s radiusem doporučit.

7. ZÁVĚR

Výsledky modelových zkoušek potvrzují vliv půdorysného zakřivení na přepadový součinitel m a tedy na kapacitu přelivu Q . Pokud použijeme k výpočtu kapacity zakřiveného přelivu hodnoty součinitelů přepadu odvozené pro přeliv přímý, dopouštíme se při poměru $L/R < 1,57$ a při aplikaci $m = f(h)$ oproti modelové alternativě přelivu přímého s plytkým spadištěm maximální chyby kolem 3,0 %, která se dá považovat pro praktické aplikace za přijatelnou. Při větších poměrech L/R však chyba výrazněji roste, a to především se zvyšující se přepadovou výškou h , což bylo prokázáno při poměru $L/R = 3,14$, kdy maximální chyba oproti modelové alternativě přímého přelivu s plytkým spadištěm dosahuje hodnoty téměř 25,0 %. Výpočet kapacity zakřiveného přelivu pomocí postupu výpočtu pro přeliv přímý pak již tedy není zcela korektní.

Bylo potvrzeno, že při aplikacích výsledků je třeba také vždy zvážit konkrétní odtokové poměry ve spadišti, jelikož uspořádání spadiště má též vliv na kapacitu přelivu. Toto dokazuje srovnání modelových alternativ 4., 4.1 a 4.2 s rozdílnou odlehlostí bočních stěn spadiště a také výsledky výzkumu provedeného na přelivu přímém s plytkým spadištěm (modelová varianta 7) v konfrontaci s výsledky ostatních autorů. Vliv spadiště poměrně značně ovlivňuje průběh hodnot přepadového součinitele m v závislosti na přepadové výšce h .

V práci bylo provedeno též srovnání výsledků výzkumu na zakřivených přelivech s výsledky ostatních autorů na přelivech šachtových, kde byl potvrzen předpoklad, že jak okrajové podmínky, tak hodnoty přepadových součinitelů m těchto dvou typů přelivů, nejsou zcela porovnatelné. Přepadové součinitele měly vždy poněkud vyšší hodnotu na přelivech zakřivených, což je způsobeno rozdílem v ovlivněnosti přepadových paprsků a zcela jiným řešením odtoku proudu z těchto typů přelivů.

Jelikož bylo prokázáno, že vliv zakřivení a uspořádání spadiště není zcela zanedbatelný, tak by bylo vhodné v modelovém výzkumu nadále pokračovat. Při dosažení větší škály výsledků z modelového výzkumu by bylo možné zpracovat postup pro výpočet kapacity na různě půdorysně zakřivených přelivech a též podrobněji určit vliv odlišných uspořádání spadiště na kapacitu přelivu.

Výsledky zde předložené se vztahují na jednoduchou a jednoznačnou geometrii a ostrohranný tvar přelivné stěny. Je očekávatelné, že snížení kapacity pro jiné tvary

přelivné koruny bude v uvedeném poměru L/R závislém na poloměru půdorysného zakřivení R v porovnání ke kapacitě přelivu přímého při shodné rozvinuté délce přelivné koruny L .

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

8.1 Literatura a internetové zdroje

- [1] ŠULC, J., ŽOUŽELA, M.: *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice*. Výzkumná zpráva. Brno: LVV ÚVS VUT v Brně, 2013.
- [2] JANDORA, J., ŠULC, J.: *Hydraulika M01*. Brno: FAST VUT v Brně, 2006.
- [3] GABRIEL, P. a kol.: *Jezy*. Praha: SNTL, 1989.
- [4] BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C.: *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968.
- [5] ŘÍHA, J.: *Hydrotechnické stavby II: M01 Přehrady*. Brno: FAST VUT v Brně 2006.
- [6] MÄSIAR, E., KAMENSKÝ, J.: *Hydraulika pre stavebných inžinierov /I/*. Bratislava: ALFA, 1985.
- [7] JOBÁNEK, S.: *Určení bezpečné hloubky ponoru vtoku MVE Vydra 2*. Brno, 2011. 69 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
- [8] ČÁBELKA, J., GABRIEL, P.: *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. Praha: ACADEMIA, 1987.
- [9] SLAVĚTÍNSKÝ, R.: *Stanovení vlivu odchýlení tenkostěnného přelivu s pravouhlým výřezem od svislé roviny na přepadající množství*. Brno, 2010. 31 s, 16 s., 22 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
- [10] SCHRÖDER, W.: *Grundlagen des Wasserbaus*. 3. Auflage Düsseldorf: WERNER VERLAG, 1994.
- [11] *Hydraulic design criteria: Multivolume report of Corps of engineers – manual handbook. Volume 1*. USACE, 1987. Dostupné z: <http://chl.erdc.usace.army.mil/hdc>.

8.2 Zdroje fotografií

- [12] VD Jirkov. *Povodí Ohře, státní podnik* [online]. © 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.poh.cz/vd/jirkov.htm>.
- [13] *Mapy Google* [online]. © 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <https://maps.google.cz>.
- [14] fotografie ze školní exkurze na VD Opatovice v rámci předmětu BR52 Proudění v systému říčních koryt, autor Tomáš Kašpar (zimní semestr 2013)

9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_1 ... obecné zrychlení na modelu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

a_2 ... obecné zrychlení ve skutečnosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

b ... světlá šířka přelivu [m]

b_0 ... účinná šířka přelivu [m]

B ... šířka obdélníkového žlabu nebo koryta [m]

C ... přepadový součinitel dle Hydraulic design criteria [-]

d ...průměr šachty šachtového přelivu, průměr zakřivení přelivu [m]

F_1 ... velikost obecné síly na modelu [N]

F_2 ... velikost obecné síly ve skutečnosti [N]

Fr ... Froudeovo kritérium modelové podobnosti [-]

g ... tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

h ... přepadová výška, tj. výška přepadového paprsku [m]

h' ... přepadová výška měřená pomocí UZV₂ [m]

h_0 ... energetická přepadová výška [m]

h_d ... výška hladiny dolní vody [m]

H ... rozdíl úrovní horní a dolní hladiny, případně těžiště výtokového otvoru [m]

H_d ... vzdálenost mezi čarou energie a spodním lícem přepadového paprsku [m]

k ... rychlostní výška [m]

l_1 ...obecná délka na modelu [m]

l_2 ...obecná délka ve skutečnosti [m]

L ... délka přelivné hrany, koruny [m]

m ... přepadový součinitel [-]

m_1 ... obecná hmotnost na modelu [kg]

m_2 ... obecná hmotnost ve skutečnosti [kg]

M_a ... měřítko zrychlení [-]

M_F ... měřítko sil [-]

M_l ... délkové měřítko [-]
 M_m ... měřítko hmotnosti [-]
 M_Q ... měřítko průtoků [-]
 M_S ... měřítko ploch [-]
 M_t ... měřítko času [-]
 M_v ... rychlostní měřítko [-]
 M_V ... měřítko objemů [-]
 M_ρ ... měřítko měrné hmotnosti [-]
 p ... výška koruny přelivu nad horním dnem [m]
 Q ... kapacita přelivu, přepadové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q_1 ... velikost obecného průtoku na modelu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q_2 ... velikost obecného průtoku ve skutečnosti [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 R ... poloměr zakřivení přelivné hrany [m]
 Re ... Reynoldsovo kritérium modelové podobnosti [-]
 s ... výška koruny přelivu nad dolním dnem [m]
 S ... velikost plochy výtokového otvoru [m^2]
 S_1 ... velikost obecné plochy na modelu [m^2]
 S_2 ... velikost obecné plochy ve skutečnosti [m^2]
 \check{s} ... šířka mezi usměrňovacími pilíři [m]
 t ... tloušťka přelivné stěny [m]
 t_1 ... obecný čas na modelu [s]
 t_2 ... obecný čas ve skutečnosti [s]
 UZV ... ultrazvukové měřidlo
 v_0 ... přítoková rychlost – rychlost vody před přelivem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 v_1 ... obecná rychlost na modelu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 v_2 ... obecná rychlost ve skutečnosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 V_1 ... velikost obecného objemu na modelu [m^3]
 V_2 ... velikost obecného objemu ve skutečnosti [m^3]

VD ... vodní dílo

We ... Weberovo kritérium modelové podobnosti [-]

α ... úhel odklonění přelivné hrany od břehové čáry [°]

α_1 ... úhel odklonění tečny umístěné na počátku přelivné hrany od břehové čáry [°]

μ ... součinitel výtoku otvorem, součinitel přepadu dle Grundlagen des Wasserbaus [-]

π ... Ludolfovo číslo [-]

ρ_1 ... obecná měrná hmotnost na modelu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ_2 ... obecná měrná hmotnost ve skutečnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

σ ... povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]

σ_s ... součinitel šikmosti [-]

σ_z ... součinitel zatopení [-]

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

φ ... středový úhel přelivu [°]

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Typy přelivů a přeпадů.....	9
Obr. 2.2 Typy přelivů podle půdorysného uspořádání	9
Obr. 2.3 Pohled na VD Jirkov s šachtovým přelivem	13
Obr. 2.4 Příčný řez přehradním tělesem a šachtovým přelivem na VD Jirkov	13
Obr. 2.5 Přeliv typu kachní zobák, VD Pilská	14
Obr. 2.6 Přeliv půdorysně zakřivený nízky na VD Bystřička	14
Obr. 2.7 Přeliv složený, VD Opatovice	15
Obr. 2.8 Schéma ovlivnění přeпадových paprsků na zakřiveném a šachtovém přelivu	16
Obr. 2.9 Schéma zahlcení odpadní štol, dokonalého a zahlceného šachtového přelivu....	18
Obr. 4.1 Boční pohled na zkušební žlab	26
Obr. 4.2 Horní pohled na zkušební žlab	27
Obr. 4.3 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (půdorys). 27	
Obr. 4.4 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (řez AA)..	28
Obr. 4.5 Schéma modelu přelivu se třemi zkušebními variantami při $\varphi = 180^\circ$ (řez BB) ..	28
Obr 4.6 Půdorysné schéma modelových variant 1, 2, 3	31
Obr. 4.7 Půdorysné schéma modelových variant 4, 5, 6	31
Obr. 4.8 Varianty modelů zakřiveného přelivu (pohled ve směru ode dna spadiště).....	32
Obr. 4.9 Půdorysné schéma modelových variant 4.1, 4.2	32
Obr. 4.10 Model přímého přelivu, $L/R = 0$, $R = \infty$ mm, pohled shora	33
Obr. 5.1 Modelová varianta 1, $h = 20,6$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 100$ mm	43
Obr. 5.2 Modelová varianta 1, $h = 197$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 100$ mm	43
Obr. 5.3 Modelová varianta 2, $h = 27$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 150$ mm pohled shora.....	44
Obr. 5.4 Modelová varianta 2, $h = 114$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 150$ mm pohled shora.....	44
Obr. 5.5 Modelová varianta 3, $h = 39,5$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 200$ mm pohled shora.....	45
Obr. 5.6 Modelová varianta 3, $h = 105$ mm, $L/R = 3,14$, $R = 200$ mm pohled shora.....	45
Obr. 5.7 Modelová varianta 4, $h = 45,6$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 141,5$ mm	46
Obr. 5.8 Modelová varianta 4, $h = 146$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 141,5$ mm pohled shora.....	46
Obr. 5.9 Modelová varianta 4.1, $h = 161,5$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 141,5$ mm pohled shora..	47
Obr. 5.10 Modelová varianta 4.2, $h = 148,9$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 141,5$ mm pohled shora	47
Obr. 5.11 Modelová varianta 5, $h = 47$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 212$ mm pohled shora.....	48
Obr. 5.12 Modelová varianta 5, $h = 125,5$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 212$ mm pohled shora.....	48
Obr. 5.13 Modelová varianta 6, $h = 39,9$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 283$ mm	49

Obr. 5.14 Modelová varianta 6, $h = 123$ mm, $L/R = 1,57$, $R = 283$ mm pohled shora.....	49
Obr. 5.15 Modelová varianta 7, $h = 87,6$ mm, $L/R = 0$, $R = \infty$ mm pohled shora.....	50

11. SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Součinitel šikmosti jezu σ_s podle Istominy	11
Tab. 2.2 Mezní hodnoty pro nedokonalý přepad přes ostrou hranu	17
Tab. 4.1 Přehled všech modelových alternativ přelivů	29
Tab. 5.1 Modelová varianta 1, $\varphi = 180^\circ$, $R = 100$ mm, $L = 314$ mm, $L/R = 3,14$	36
Tab. 5.2 Modelová varianta 4, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5$ mm, $L = 222$ mm, $L/R = 1,57$	36
Tab. 5.3 Modelová varianta 4.1, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5$ mm, $L = 222$ mm, $L/R = 1,57$	37
Tab. 5.4 Modelová varianta 4.2, $\varphi = 90^\circ$, $R = 141,5$ mm, $L = 222$ mm, $L/R = 1,57$	37
Tab. 5.5 Modelová varianta 2, $\varphi = 180^\circ$, $R = 150$ mm, $L = 471$ mm, $L/R = 3,14$	37
Tab. 5.6 Modelová varianta 5, $\varphi = 90^\circ$, $R = 212$ mm, $L = 333$ mm, $L/R = 1,57$	38
Tab. 5.7 Modelová varianta 3, $\varphi = 180^\circ$, $R = 200$ mm, $L = 628$ mm, $L/R = 3,14$	38
Tab. 5.8 Modelová varianta 6, $\varphi = 90^\circ$, $R = 283$ mm, $L = 444,5$ mm, $L/R = 1,57$	38
Tab. 5.9 Modelová varianta 7, $\varphi = 0^\circ$, $R = \infty$ mm, $L = 400$ mm, $L/R = 0$	39
Tab. 6.1 Velikost přepadového součinitele m na vybraných modelových variantách	54
Tab. 6.2 Velikost přepadové výšky h , od které je dle Wagnera přepadový jev ovlivněn ...	55
Tab. 6.3 Srovnání přepadových součinitelů m s Grundlagen des Wasserbaus	57
Tab. 6.4 Srovnání přepadových součinitelů m s Hydraulic design criteria	59

12. SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1 $Q - h$ křivky základních modelových alternativ	40
Graf 5.2 $h - m$ závislosti základních modelových alternativ.....	40
Graf 5.3 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ	41
Graf 5.4 $Q - h$ křivky modelových alternativ sloužících k určení vlivu spadiště	41
Graf 5.5 $h - m$ závislosti základních modelových alternativ k určení vlivu spadiště.....	42
Graf 5.6 $h/R - m$ závislosti modelových alternativ sloužících k určení vlivu spadiště.....	42
Graf 6.1 $h - m$ závislosti vybraných modelových alternativ	52
Graf 6.2 $h - m$ závislosti na přímém přelivu	53
Graf 6.3 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ v porovnání s $h/R = 0,45$.	56
Graf 6.4 $h/R - m$ závislosti základních modelových alternativ v porovnání se s Grundlagen des Wasserbaus.....	58
Graf 6.5 $h/R - m$ závislost modelové varianty 1 v porovnání s Hydraulic design criteria..	60