



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ZHODNOCENÍ KAPACITY NÍZKÝCH PŘELIVŮ PŘI PŘEVÁDĚNÍ EXTRÉMNÍCH PRŮTOKŮ

CAPACITY EVALUATION OF THE EXTREMELY HYDRAULICALLY LOADED LOW WEIRS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. STANISLAV JOBÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.

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. STANISLAV JOBÁNEK

Název Zhodnocení kapacity nízkých přelivů při převádění extrémních průtoků

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

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

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

Mäsiar, E.; Kamenský, J.: Hydraulika pre stavebných inžierov (I). ALFA Bratislava, 1985

Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968

Šafář, R.; Šulc, J.: Experimentální výzkum přepadu přes přeliv s kruhově zaoblenou korunou. Vodní hospodářství 7/2012, str. 236 – 241

Hydraulic design criteria: Multivolume report of Corps of Engineers – manual handbook.

Volume 1. USACE, 1987, dostupné z <http://chl.erdc.usace.army.mil/hdc>

Stara, V; Koutková, H.: Součinitel přepadu přelivu s kruhově zaoblenou korunou z fyzikálních experimentů. Sborník z 3. Vodohospodářské konference 2003. ECON Brno, 2003

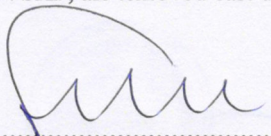
Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Určení kapacity nízkých přelivů v současné praxi užívaných tvarů při dokonalém i nedokonalém přepadu. Práce bude obsahovat analýzu současného stavu užívaných vztahů pro stanovení přepadového množství přes nízké přelivy. Na základě provedených hydraulických zkoušek na modelech extrémně hydraulicky zatěžovaných typů zvolených přelivů stanovit hodnoty přepadových součinitelů. Z výsledků stanovit meze počátku ovlivněnosti přepadu od účinku dolní vody.

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 diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá určením hodnot součinitelů přepadu pro běžně používané typy nízkých přelivů. Srovnání jejich hodnot s hodnotami, které vychází dle zavedených postupů. Určení kapacity nízkých přelivů při dokonalém i nedokonalém přepadu.

Klíčová slova

Fyzikální model, přeliv, přepad, součinitel přepadu, součinitel zatopení

Abstract

The thesis deals with values of overfall discharge coefficients for commonly used types of low weirs. Comparison of their values with values based on established procedures. Determination of low weir capacity at free and submerged overfall.

Keywords

Physical model, weir, overfall, coefficient of overfall discharge, submergence factor

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Stanislav Jobánek *Zhodnocení kapacity nízkých přelivů při převádění extrémních průtoků*. Brno, 2013. 104 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc. .

Prohlášení:

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

V Brně dne 5.1.2014

.....

podpis autora

Bc. Stanislav Jobánek

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za jeho cenné rady, pomoc, ochotu a čas, který mi věnoval během měření a při vypracovávání mé diplomové práce.

Děkuji kolektivu technických pracovníků Laboratoře vodohospodářského výzkumu za vykonanou práci, která byla velmi potřebná k uskutečnění měření.

Velké poděkování patří mým rodičům, že mi poskytli vhodné podmínky a podporu pro studium.

.....

podpis autora

Bc. Stanislav Jobánek

OBSAH

1	Úvod.....	3
2	Přelivy.....	4
2.1	Výpočet přepadu přes jezová tělesa.....	7
2.2	Proudnicové přelivné plochy.....	9
2.2.1	Podtlakové přelivné plochy.....	10
2.2.2	Tlakové přelivné plochy.....	10
2.2.3	Beztlakové přelivné plochy.....	10
3	Vodní skok.....	12
3.1	Druhy vodního skoku.....	13
3.2	Fotografie vodních skoků.....	14
4	Hydraulická problematika.....	17
4.1	Součinitel přepadu různých typů přelivů.....	17
4.2	Součinitel zatopení.....	22
5	Fyzikální modelování proudění přes přeliv.....	24
6	Mechanická podobnost v hydraulice.....	27
6.1	Zákony modelové podobnosti.....	27
6.1.1	Geometrická podobnost.....	27
6.1.2	Kinematická podobnost.....	27
6.1.3	Dynamická podobnost.....	28
7	Modely přelivů a zkušební laboratoř.....	30
7.1	Budova F – zkušební laboratoř.....	30
7.2	Modely přelivů.....	31
7.2.1	Fotografie přelivů.....	32
7.2.2	Schémata přelivů.....	36
8	Měření na modelech přelivů.....	39
8.1	Postup měření.....	39
9	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	41
9.1	Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou.....	43
9.2	Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami.....	48
9.3	Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami.....	53
9.4	Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ.....	58

9.5	Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ	63
9.6	Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ	68
9.7	Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ	73
9.8	Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou	78
9.9	Scimemiho plocha.....	83
9.10	Vyhodnocení.....	88
10	Denverský graf.....	92
10.1	Ověření platnosti Denverského grafu pro určení druhu vodního skoku	93
10.1.1	Ověření platnosti – Scimemiho plocha	93
10.1.2	Ověření platnosti – další zkoušené typy přelivů	95
10.2	Vyhodnocení.....	96
11	Závěr.....	97
12	Seznam použitých zdrojů.....	98
13	Seznam použitých zkratek a symbolů	99
14	Seznam obrázků	101
15	Seznam tabulek	103
16	Seznam příloh	104
17	Přílohy	105

1 Úvod

Nacházíme se v době, kdy dochází ke změnám klimatického procesu. Tyto změny jsou provázeny i hydrologickými extrémy (sucho, povodně).

V posledních letech došlo několikrát ke vzniku povodní. Buďto způsobenými dlouhodobými srážkami nebo takzvanými náhlými povodněmi, kdy na určitou oblast spadne velké množství srážek v krátkém čase.

Po výskytu povodní dochází vždy k přepracovávání povodňových plánů. Rovněž dochází i ke změně hydrologických dat, zejména zvýšení povodňových průtoků.

Většina vodních děl byla vystavěna před rokem 1989 a objekty těchto vodních děl byly navrhovány na jiné hydrologické údaje, než které platí dnes.

Podle naší legislativy je každé vodní dílo kategorizováno a jeho funkčnost musí být ověřena studií, ve které např. současné průtoky návrhové a kulminační průtoky kontrolní povodně jsou třeba 3 krát vyšší než ty, na které dílo bylo navrženo před jeho výstavbou.

Je tedy třeba charakterizovat objekty, zejména bezpečností, které určuje ve velké míře součinitel přepadu. Ten je často počítán dle různých vztahů (v závislosti na tvaru) nebo jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulce.

Náplní této práce je tedy pro daný soubor běžně užívaných typů přelivů najít pokud možno způsob, jak určit součinitel přepadu a popsat, jak každý přeliv převádí extrémní průtoky při přepadu dokonalém i nedokonalém, tedy při dosud neprozkoumaných podmínkách hydraulického zatížení. V těchto podmínkách vysokých výšek přepadových paprsků či vysokých úrovní dolní vody v podjezí nejsou spolehlivé hodnoty přepadových součinitelů publikovány či mnohdy chybějí zcela.

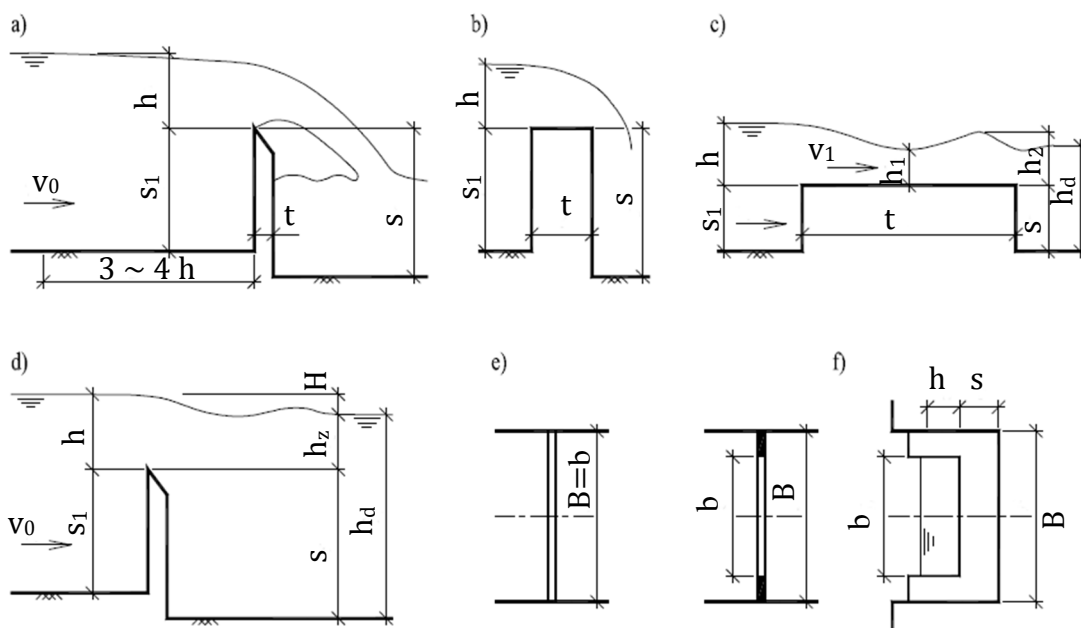
2 Přelivy

Problematika základního rozdělení přelivů a výpočtu přepadového množství vody přes přeliv je velmi dobře a srozumitelně popsána v publikaci [1]. Z této publikace jsou převzata jen základní rozdělení, charakteristiky a způsob výpočtu, týkající se přelivů, zejména jezových.

Na úvod je však důležité uvést rozdíl mezi pojmy: přeliv a přepad. Tyto dva pojmy bývají často zaměňovány (např. ve sdělovacích prostředcích), ačkoliv mají rozdílný význam.

Přeliv (jez) je konstrukce, přes kterou voda přepadá. Nejvyšší část přelivu je nazývána koruna přelivu (někdy označovaná jako přelivná hrana).

Přepad je fyzikální jev. Můžeme jej definovat jako výtok kapaliny otvorem nahoře otevřeným nebo výtok otvorem, ve kterém hladina nedosahuje k jeho hornímu obrysu. Přepadající proud vody se nazývá vodní paprsek.



Obrázek 1 - Rozdělení přepadů a přelivů [1]

Tloušťka a tvar přelivu mají zásadní vliv na proudění vody přes přeliv. Základní dělení přelivů je tedy:

- ostrohranné přelivy (např. Bazinův (Obr. 1a), Thomsonův a další),
- jezové nebo přehradní přelivy (lichoběžníkového nebo obdélníkového (Obr. 1b) příčného průřezu, proudnicové přelivy a další),
- přelivy se širokou korunou (Obr. 1c),
- zvláštní typy přelivů (šachtový přeliv, boční přeliv a další).

Dle ovlivnění přepadového množství vody přes přeliv úrovní hladiny dolní vody (úrovní hladiny vody za přelivem) rozeznáváme:

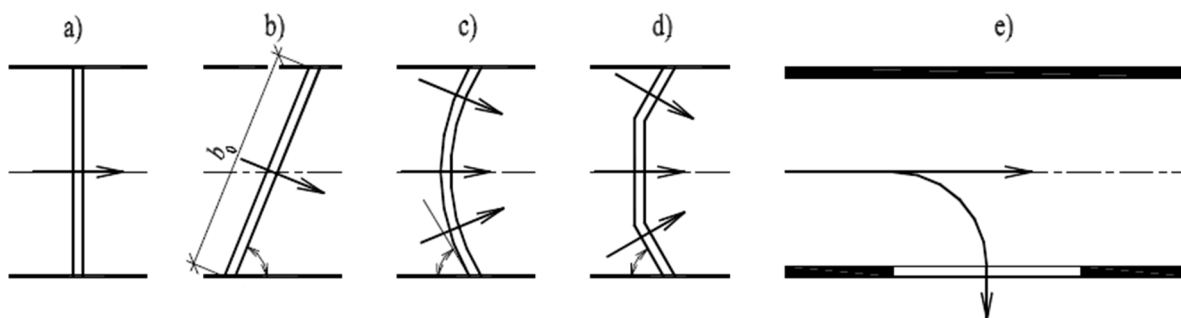
- přepad dokonalý – přepadové množství není ovlivněno úrovní hladiny dolní vody,
- přepad nedokonalý (někdy nazýván zatopený) – je-li úroveň hladiny dolní vody nad úrovní přelivné hrany, je třeba ověřit, jestli není přepadové množství ovlivněno úrovní hladiny dolní vody (Obr. 1d).

Přepad vody přes přeliv může také být:

- bez bočního zúžení – jestliže je šířka přelivu b rovná šířce B , např. šířce obdélníkového žlabu (Obr. 1e),
- s bočním zúžením – nastává v případě, kdy je přepad pouze v části přelivné stěny (Obr 1f).

Dle umístění přelivné hrany k nabíhajícímu proudu rozeznáváme:

- přelivy čelní – přelivná hrana je k nabíhajícímu proudu umístěna kolmo (Obr 2a),
- přelivy šikmé, lomené, křivočaré (Obr 2b, 2c, 2d),
- boční přelivy – přelivná hrana je odkloněná od osy proudu nebo je s ní rovnoběžná, avšak nepřehrazuje vodní tok (Obr 2e).



Obrázek 2 - Typy přelivů [1]

Dále se přelivy dělí podle možnosti manipulace s úrovní koruny přelivu na přelivy:

- pevné – při proměnných průtocích nelze řízeně manipulovat s úrovní hladiny,
- pohyblivé – pro řízenou manipulaci polohy hladiny nad přelivem se používá pohyblivých hradících konstrukcí (uzávěrů) různých druhů. Jde o přelivy: hradidlové, klapkové, válcové, segmentové, vakové a další přelivy.

Fotografie různých druhů přelivů



Obrázek 3 – Ostrohranný měrný přeliv, pramen Jordánka, CHKO Český ráj



Obrázek 4 - MVE Sokolský ostrov a válcový jez v Českých Budějovicích

Jezové přelivy

Jezy jsou pevné nebo pohyblivé konstrukce, pomocí kterých se vzdouvá voda v korytě toku k různým vodohospodářským účelům:

- zajištění odběrů vody,
- zajištění požadovaného spádu (energetika),
- zajištění podmínek pro plavbu,
- zajištění hladiny stálého vzduť aj.

2.1 Výpočet přepadu přes jezová tělesa

Pro výpočet přepadového množství přes jezová tělesa se používá vztah:

$$Q = \sigma_z \sigma_s m b_0 \sqrt{2g} h_0^{3/2}, \quad (1)$$

$$h_0 = h + \frac{v_0^2}{2g} = h + k. \quad (2)$$

Rovnice (1) se zejména v „západních“ publikacích uvádí ve tvaru:

$$Q = \sigma_z \sigma_s M b_0 h_0^{3/2}, \text{ kde } M = m \sqrt{2g}. \quad (3)$$

M je tedy rozšířený součinitel přepadu přes jezová tělesa. Součinitel přepadu m je závislý hlavně na tvaru přelivného tělesa a přepadové výšce h .

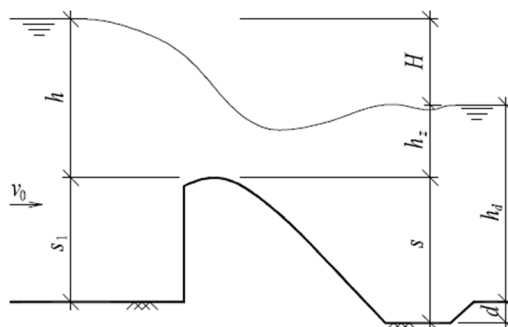
Nedokonalý přepad

Nedokonalý přepad (Obr 5) přes přeliv nastane v případě, kdy úroveň hladiny dolní vody je výš než koruna přelivu a úroveň hladiny tedy snižuje přepadové množství (díky snižujícímu se výškovému rozdílu úrovní hladin). Dle Bachmatěva je přepad nedokonalý, jsou-li současně splněny obě tyto podmínky:

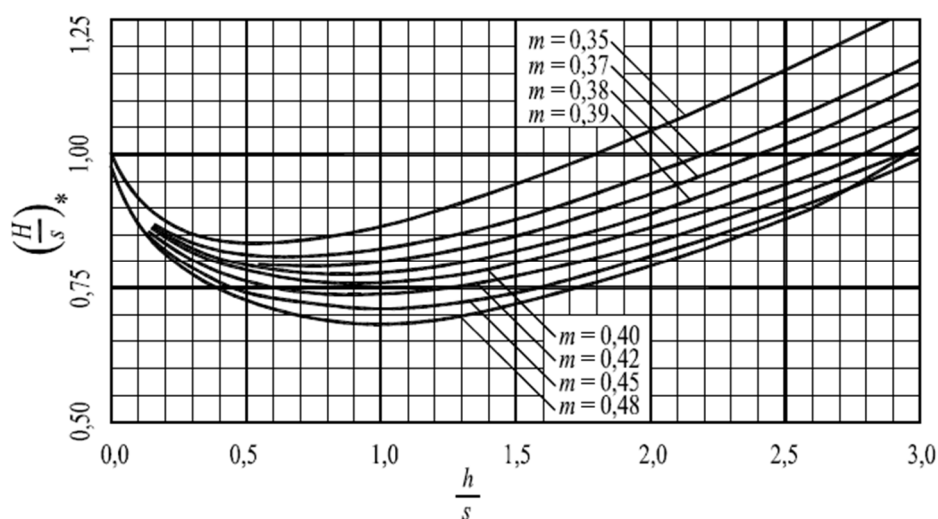
$$h_d + d > s \quad (4)$$

$$\text{a} \quad \frac{H}{s} < \left(\frac{H}{s}\right)^*. \quad (5)$$

Pro zjištění hodnoty $\left(\frac{H}{s}\right)^*$ se využívá grafikon (Obr. 6)



Obrázek 5 - Nedokonalý přepad přes jezové těleso [1]



Obrázek 6 - Bachmatěvův grafikon [1]

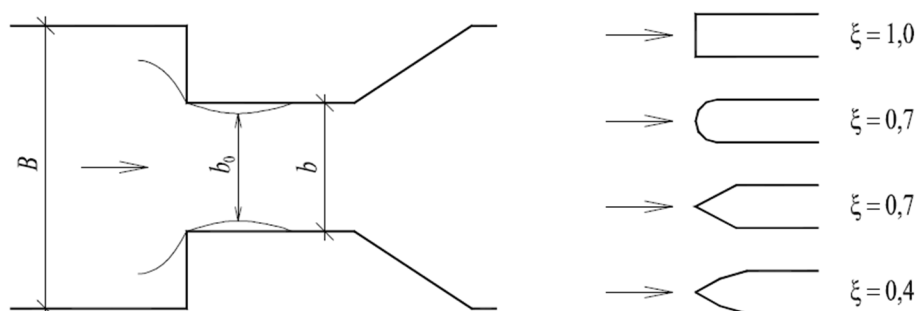
Snížení průtočnosti, vyvolané nedokonalostí přepadu, se vyjadřuje pomocí součinitele zatopení σ_z . Součinitel zatopení je závislý na poměru h_z/h a částečně na tvaru přelivné plochy. Hodnoty součinitele σ_z (v závislosti na poměru h_z/h) dle Istominy a Oficerova jsou uvedeny v tabulce, která je uvedena v kapitole 4.2 této práce.

Vliv půdorysného uspořádání přelivů

V případě, kdy je přelivná hrana půdorysně odkloněná k nabíhajícímu proudu, je součinitel šikmosti $\sigma_s < 1$. Součinitel šikmosti nabývá hodnot od 0,85 do 1,00, v závislosti na poměrné přepadové výšce (h/s) a úhlu odklonu α přelivné hrany od břehové čáry. Konkrétní hodnoty σ_s jsou uvedeny v tabulkách, např. v publikaci [1].

Boční kontrakce

Nastane-li případ, kdy zúžení průtočného profilu není plynulé (Obr. 7), nemohou proudová vlákna sledovat ostré záhyby zdiva. Vlivem setrvačnosti pokračují i v zúžené části v původním směru a tím nastává kontrakce (zúžení) paprsku. Při stěnách průtočného profilu se vytvoří prostory vyplněné vodními víry se svislou osou. Z toho důvodu se průtokově účinná šířka zmenší ($b_0 < b$).



Obrázek 7 - Boční kontrakce [1]

Jestliže nastane kontrakce, musíme do vztahu pro výpočet průtočného množství dosazovat místo šířky b účinnou šířku b_0 , dle vztahu:

$$b_0 = b - 0,1n \xi h_0, \quad (6)$$

kde n je počet zúžení, ξ součinitel závislosti tvaru pilíře na bočním zúžení dle Obr. 7.

2.2 Proudnicové přelivné plochy

Proudnicová přelivná plocha vznikne napodobením tvaru přelivného tělesa, tvaru spodního obrysu volného paprsku přepadajícího přes ostrou hranu. Rozhodující je vedení paprsku v oblasti přelivné hrany a blízko pod ní. Součinitel přepadu m proudnicových přelivných ploch nabývá poměrně vysokých hodnot. Tyto plochy se hojně využívají jednak pro běžná jezová tělesa, ale i jako bezpečnostní přelivy přehradních těles (boční, korunové aj. přelivy).

Proudnicové plochy se dělí (podle způsobu vedení paprsku vody a z toho vyplývajících tlaků na přelivné plochy):

- podtlakové,
- tlakové (např. Smetanova),
- beztlakové (např. Scimemiho).

Pro každou výšku h přepadajícího paprsku vody vycházejí v závislosti na tlakových poměrech na vzdušném líci přelivu jiné rozměry proudnicového přelivného tělesa. Z toho důvodu se proudnicová lící plocha navrhuje většinou pro návrhovou přepadovou výšku, která je zpravidla rovna maximální výšce, která má být přes přeliv převedena ($h_n = h_{max}$). Tím se vyloučí možnost působení nepříznivých podtlaků na přelivné ploše pro všechny průtoky. Dále budou uvedeny základní charakteristiky jednotlivých typů ploch, podrobné informace (souřadnice bodů jednotlivých ploch) jsou uvedeny v publikaci [1].

2.2.1 Podtlakové přelivné plochy

Tyto přelivné plochy mají zaoblenou korunu, avšak její zaoblení je větší než zakřivení volného paprsku, vzniká zde tedy podtlak. Sáním se zvyšuje součinitel přepadu m , ale mohou se vyskytnout tlakové pulsace, které mají nepříznivý vliv na stabilitu povrchu konstrukce. Tyto plochy vyžadují při aplikaci podrobný rozbor proudění a musí být ověřeny modelovými zkouškami. Doporučením při návrhu je dosáhnout maximální hodnoty podtlaku v rozmezí $(3 \div 5) m$ v. s.

2.2.2 Tlakové přelivné plochy

Tlakové přelivné plochy mírně transformují zákonitý tvar volného přepadového paprsku tím způsobem, že tento paprsek podpírají a tím odstraňují s jistou bezpečností podtlaky, za cenu snížení součinitele přepadu.

Nejpoužívanějším typem takovéto plochy je Smetanova plocha. Ta se odvozuje ze Scimemiho rovnice spodního líce volného přepadového paprsku, Smetanova plocha mírně podpírá volný paprsek.

2.2.3 Beztlakové přelivné plochy

Beztlakové přelivné plochy přímo odpovídají spodnímu líci volného paprsku, který přepadá přes ostrou hranu. Těleso přelivu k paprsku jen doléhá a paprsek na přelivnou plochu teoreticky ani netlačí ani se od ní neodtrhává. Velmi podrobná měření přepadajícího paprsku vody přes ostrohranný přeliv provedl Scimemi. Pro beztlakovou Scimemiho plochu při návrhové přepadové výšce h_n je součinitel přepadu $m_n = 0,51$.

Přehradní přelivy v České republice



Obrázek 8 - Korunový bezpečnostní přeliv VD Vranov



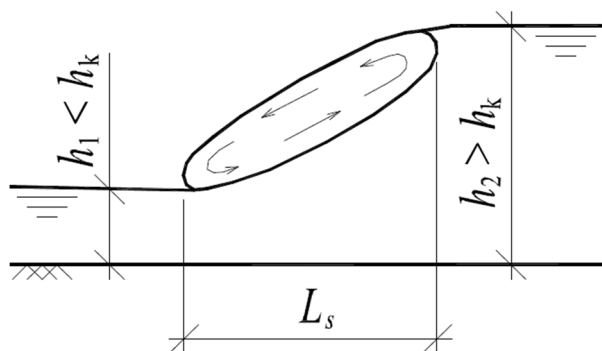
Obrázek 9 - Bezpečnostní přeliv na levém břehu VD Slezská Harta

3 Vodní skok

Problematika základního rozdělení vodních skoků (VS) a výpočet vývaru jsou velmi dobře a srozumitelně popsány v publikaci [1]. Z této publikace jsou převzaty jen základní charakteristiky a rozdělení.

Přechod z říčního proudění do bystřinného (např. zvýšení podélného sklonu koryta) bývá plynulý. Přechod z bystřinného proudění do říčního je provázen jevem, kterému se říká vodní skok. Je to hydraulický jev, který vzniká při přechodu z proudění bystřinného do proudění říčního (např. při výtoku pod stavidlem, za přepadem přes jez, při změně sklonu dna toku z $i_0 > i_k$ na $i_0 < i_k$). Vodní skok se vyznačuje náhlým zvětšením hloubky vody a změnou rychlosti od vysoké k nízké. Vodním skokem dochází ke změně kinetické energie (E_k) v energii potenciální (E_p), za velké ztráty celkové energie (E_c).

Vodní skok je charakterizován tzv. „vzájemnými hloubkami vodního skoku“. Tyto hloubky jsou označovány jako první a druhá vzájemná hloubka vodního skoku (h_1 a h_2). Hloubka h_1 se nachází v průřezu těsně před vodním skokem při proudění bystřinném. Hloubka h_2 se nachází v průřezu těsně za vodním skokem při proudění říčním. Vzdálenost mezi hloubkami h_1 a h_2 je označována jako délka vodního skoku (L_s). Rozdíl hloubek $h_2 - h_1 = h_s$ se nazývá výška vodního skoku. Tyto 4 veličiny (h_1 , h_2 , L_s , h_s) jsou pak velmi důležité pro návrh opevnění prostoru pod jezem (vývaru), přehradními přelivy a jiných konstrukcí.



Obrázek 10 - Průstý vodní skok [1]

Základním a nejčastějším typem vodního skoku je průstý vodní skok s povrchovým válcem. Tento povrchový válec neustále rotuje, pokrývá základní proud a strhává s sebou vzduch. Pohyb vody v povrchovém válci je velmi nepravidelný. V dolní části válce, kde se válec dotýká základního proudu, se částice vody pohybují stejným směrem jako proud, v horní části

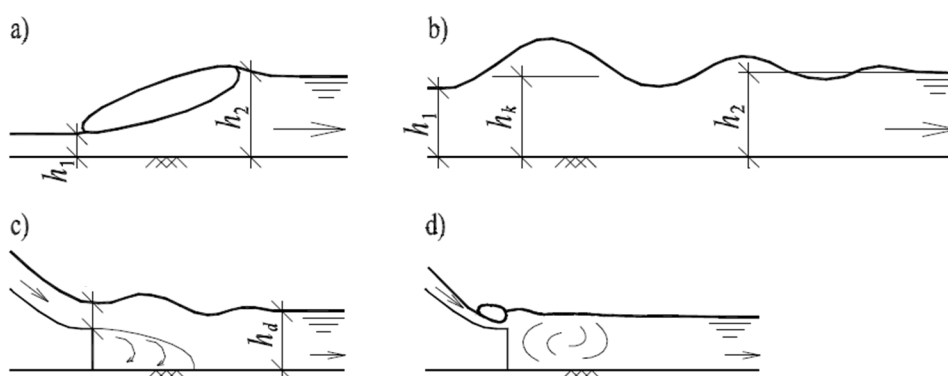
se částice vody pohybují opačným směrem. Mezi základním proudem a povrchovým válcem se částice vody neustále vyměňují.

Prostý vodní skok s povrchovým válcem (běžně označován jako vodní válec) je nebezpečný na splavných řekách, kde je hojně provozován vodácký sport (např. Vltava, Ohře, Lužnice a jiné). Vodáci se často vlastní neopatrností (nevyužití vorové propusti - „šlajsny“, nepřenášení lodí, vliv alkoholu) dostanou do prostoru vodního válce, za co většinou zaplatí životem. Každým rokem před letní sezónou bývá např. v tisku uveřejňován seznam nejnebezpečnějších jezů. Mezi nejnebezpečnější patří například jez Pilař na řece Lužnici a Řepčinský jez na řece Moravě.

3.1 Druhy vodního skoku

Vodní skok může být:

- s dnovým režimem (Obr. 11 a,b),
- s povrchovým režimem (Obr. 11 c,d).



Obrázek 11 - Typy vodního skoku [1]

Podle hodnoty Froudova kritéria (Fr) pro hloubku h_1 při bystrinném proudění se vodní skoky s dnovým režimem dělí:

- vodní skok prostý – v podélném řezu lze jasně rozlišit rozbíhající se proud a silně provzdušněný válec na povrchu (Obr. 12),
- vlnovitý vodní skok – vzniká při malé výšce vodního skoku. Projevuje se řadou tlumených vln, bez vodního válce (Obr 13).

Dle polohy vodního skoku s dnovým režimem k vodní stavbě se vodní skoky dělí:

- vodní skok oddálený (Obr. 15),
- vodní skok přilehlý (Obr. 16),
- vodní skok vzdutý (Obr. 14).

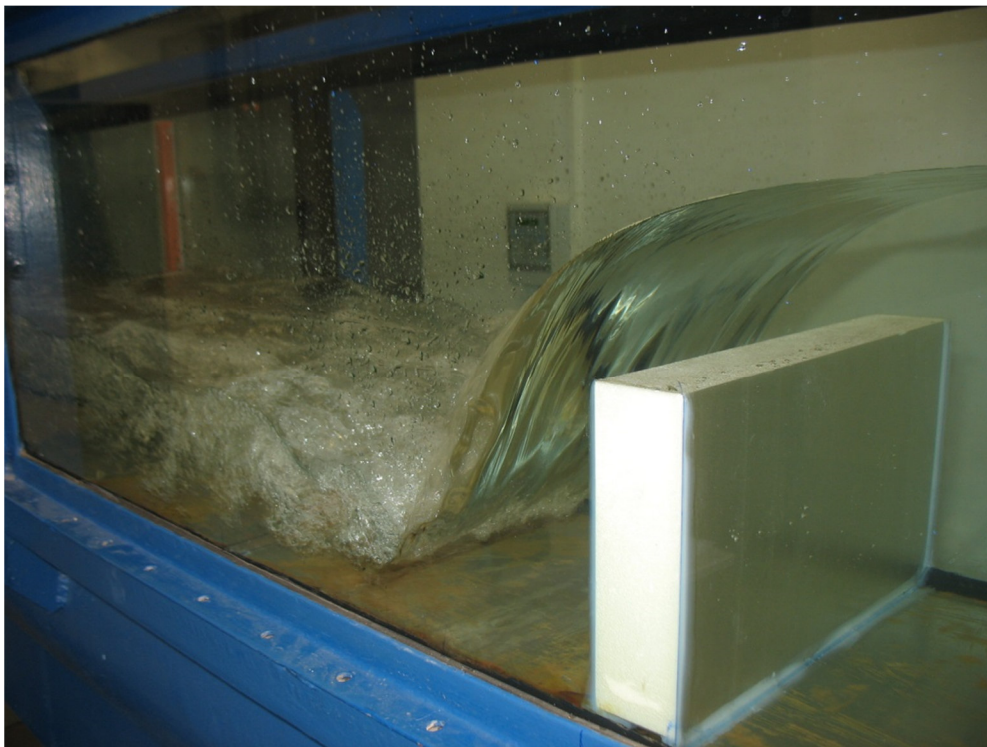
Povrchový vodní skok, který má kompaktní roztékavý proud při povrchu a vodní válec při dně a který vzniká při zaústění bystřínného proudu nade dnem, rozeznáváme:

- povrchový vodní skok (Obr. 11 c),
- vzdutá vlna (Obr. 11 d).

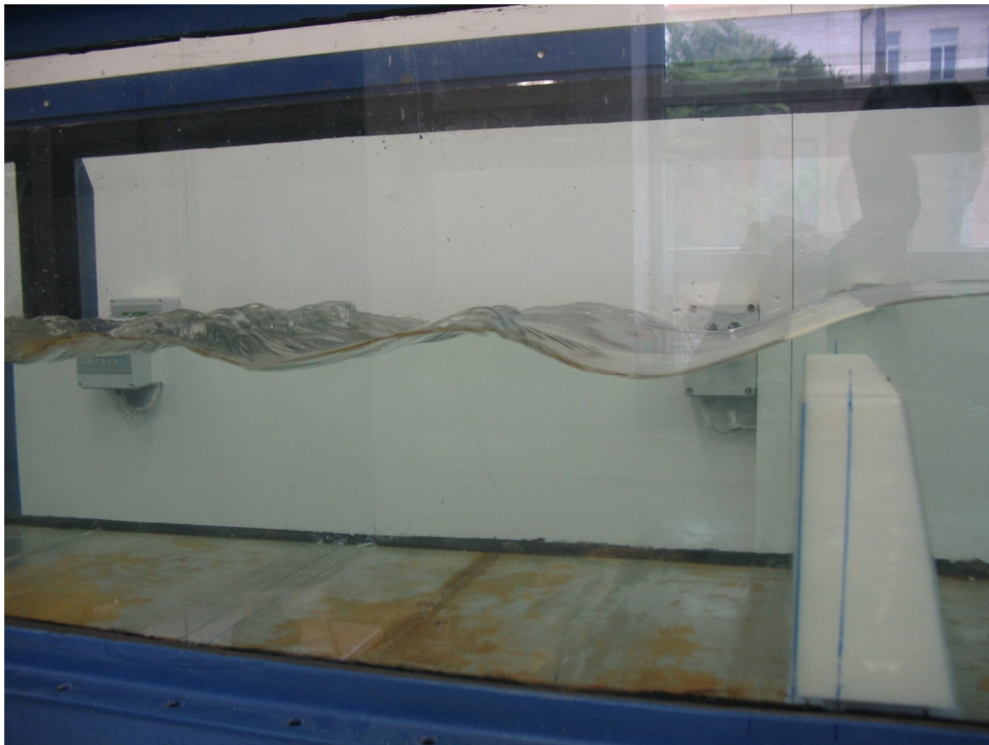
Vzdálenost vodního skoku od vodního díla závisí na hloubce vody (h_d) v odpadním kanále. Tuto hloubku lze ovlivnit různými technickými úpravami.

K identifikaci poloh i typů vodního skoku byly použity fotografie pořízené ze zkoušek realizovaných v rámci této diplomové práce.

3.2 Fotografie vodních skoků



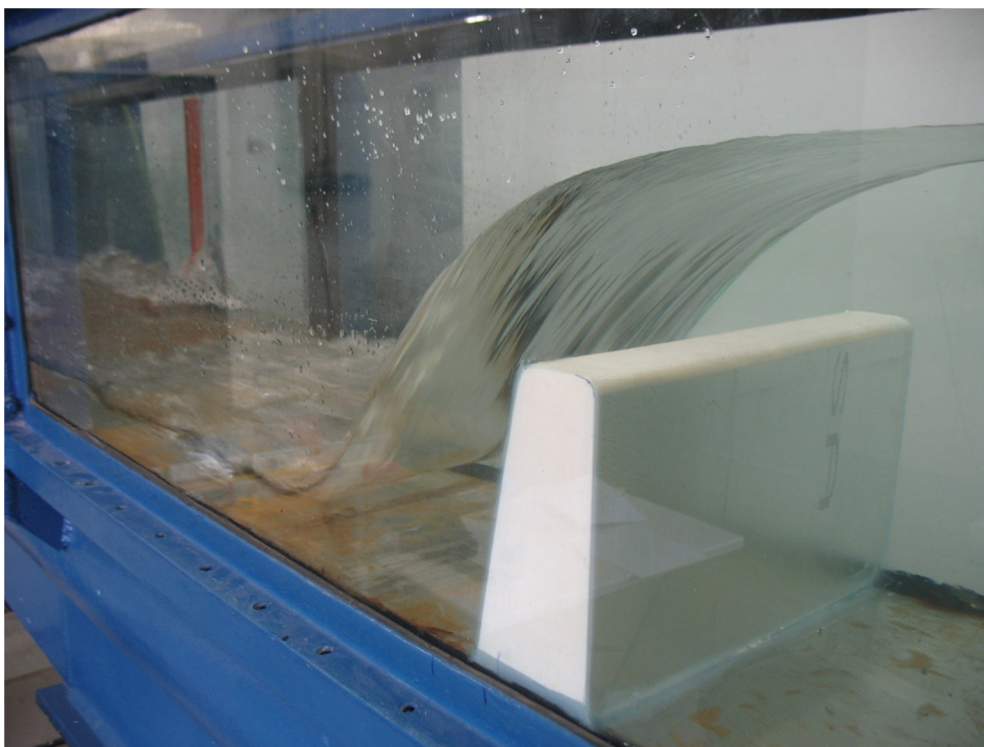
Obrázek 12 - prostý VS



Obrázek 13 - vlnovitý VS



Obrázek 14 - vzdutý VS



Obrázek 15 - oddálený VS



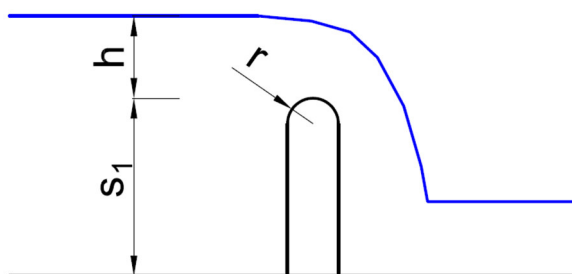
Obrázek 16 - přilehlý VS

4 Hydraulická problematika

4.1 Součinitel přepadu různých typů přelivů

Součástí této práce bylo nalézt v různých zdrojích hodnoty přepadového součinitele pro přelivy, které byly použity pro modelové zkoušky (nebo jim podobné) a identifikovat postupy získání těchto hodnot. Tyto hodnoty byly pak vzájemně porovnány s hodnotami získanými z modelových zkoušek.

Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou



Obrázek 17 - Přeliv obdélníkové průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Stanovením součinitele přepadu na základě podrobného fyzikálního výzkumu, v letech 1993 – 1997, se věnoval Stara. Součinitel přepadu přelivu obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou (Obr. 17), při nezavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem, vyjádřil pomocí nelineárního regresního modelu [5]:

$$m = 0,349494 + 0,307084 \frac{\frac{h}{s_1}}{\left(\frac{h}{s_1}\right)^{1,62877} + \left(\frac{s_1}{2r}\right)^{-1,45694} + 0,223402}. \quad (7)$$

Pro přeliv obdélníkového průřezu s kruhovitě zaoblenou korunou (Obr. 17) uvádí Kramer součinitel přepadu [6]:

$$m = \frac{2}{3} \mu_p = \frac{2}{3} \left\{ 1,02 - \frac{1,015}{\frac{h}{r} + 2,08} + \left[0,04 \left(\frac{h}{r} + 0,19 \right)^2 + 0,0223 \right] \frac{r}{s_1} \right\}. \quad (8)$$

Takto spočítané hodnoty dle Kramera doporučuje Franke zmenšit o 25 až 30 % [6].

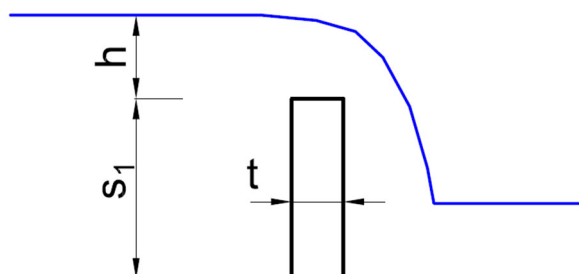
Rehbock uvádí výraz pro stanovení součinitele přepadu pro přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhovitě zaoblenou korunou (Obr. 20) [3]:

$$m = \frac{2}{3} \mu_p = \frac{2}{3} \left[0,312 + 0,09 \frac{h}{s_1} + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{h}{r} \right)^2} \right] \quad (9)$$

s mezemi platnosti:

$$s_1 \geq r \geq 0,02 ; \frac{h}{r} \leq \left(6 - \frac{20r}{s_1+3r}\right). \quad (10)$$

Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami



Obrázek 18 - Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami

Při tloušťce přelivu $t < 0,67h$ se paprsek vody odtrhne od koruny přelivu a vznikne tedy přepad přes ostrohranný tenkostěnný přeliv (v tomto případě se uvažuje s hodnotou $m \approx 0,41$). Při $0,67h < t < 2h$ přilne paprsek za vstupní hranou zpět ke koruně přelivu a součinitel přepadu závisí na poměru h/t (Tab. 1) [3].

Pokud není paprsek zavzdušněn (nedojde k odtržení paprsku od koruny přelivu), vznikne v prostoru pod přepadovým paprskem menší tlak než atmosférický a dojde ke zvětšení součinitele přepadu. Při stejné přepadové výšce je převáděn větší průtok, čemuž se říká zkapacitnění přelivu. Zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem tedy obecně vede ke zmenšení kapacity přelivu.

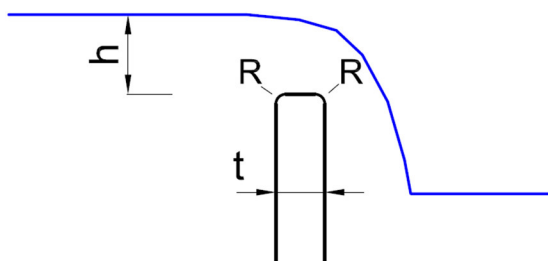
Tabulka 1 - Součinitel přepadu pro obdélníkové přelivy [3]

h/t	0,10	0,33	0,50	1,00	1,50	1,50 až 2,0
m	0,30	0,32	0,33	0,37	0,41	0,41 až 0,42

Součinitel přepadu pro ostrohranný tenkostěnný přeliv - Bazinův přeliv (Obr 1a) [1]:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s_1}\right)^2\right]. \quad (11)$$

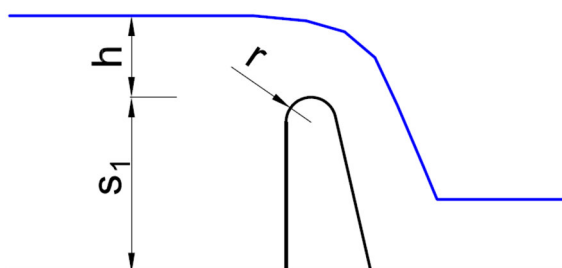
Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami



Obrázek 19 - Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami

Velikost součinitele přepadu se určuje obdobně jako u přelivu obdélníkového průřezu s ostrými hranami (Tab. 1). Jediný rozdíl spočívá v tom, že hodnotu m lze zvětšit o 5 %, vlivem zaoblení vstupní hrany [3]. Zaoblením vstupní hrany (poloměr zaoblení R) dosáhneme zvýšení kapacity přelivu, odstranění ostré hrany usnadní proudy vody obtékání konstrukce přelivu.

Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou



Obrázek 20 - Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Rehbock uvádí výraz pro stanovení součinitele přepadu pro přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhovitě zaoblenou korunou (Obr. 20) [3]:

$$m = \frac{2}{3} \mu_p = \frac{2}{3} \left[0,312 + 0,09 \frac{h}{s_1} + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{h}{r} \right)^2} \right] \quad (9)$$

s mezemi platnosti:

$$s_1 \geq r \geq 0,02 ; \frac{h}{r} \leq \left(6 - \frac{20r}{s_1 + 3r} \right). \quad (10)$$

Pro přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou (Obr. 17) uvádí Kramer součinitel přepadu [6]:

$$m = \frac{2}{3}\mu_p = \frac{2}{3} \left\{ 1,02 - \frac{1,015}{\frac{h}{r} + 2,08} + \left[0,04 \left(\frac{h}{r} + 0,19 \right)^2 + 0,0223 \right] \frac{r}{s_1} \right\}. \quad (8)$$

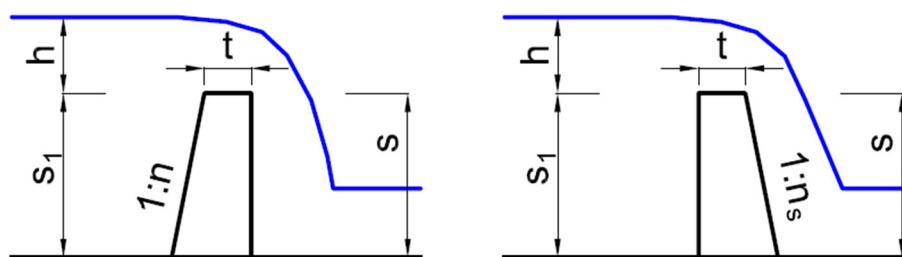
Takto spočítané hodnoty dle Kramera doporučuje Franke zmenšit o 25 až 30 % [6].

Pro přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou (Obr. 17) uvádí Stara součinitel přepadu [5]:

$$m = 0,349494 + 0,307084 \frac{\frac{h}{s_1}}{\left(\frac{h}{s_1} \right)^{1,62877} + \left(\frac{s_1}{2r} \right)^{-1,45694} + 0,223402}. \quad (7)$$

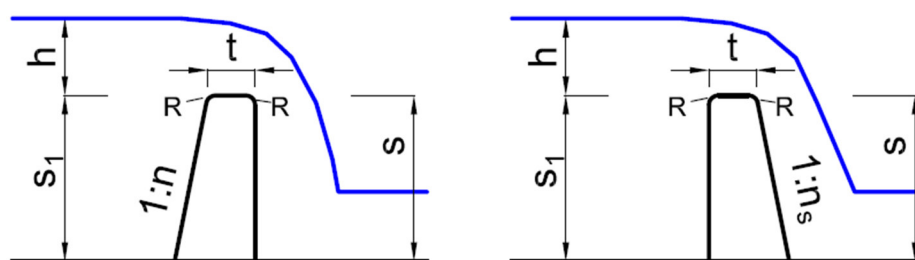
Přeliv lichoběžníkového průřezu

S ostrými hranami



Obrázek 21 - Přeliv lichoběžníkového průřezu

Se zaoblenými hranami



Obrázek 22 - Přeliv lichoběžníkového průřezu (se zaoblenými hranami)

Tento typ přelivu výborně odolává zatížení, ale klade přepadající vodě velký odpor. Z tohoto důvodu se dnes prakticky nenavrhuje. Avšak na našem území je velké množství takovýchto přelivů, které se musí hydraulicky posuzovat. Určení hodnoty součinitele přepadu u tohoto typu přelivu se řídí výškou konstrukce, sklonem stěn a poměrem h/t . Při zaoblení hran (poloměr zaoblení R) lze m zvýšit o 5%. Pro určení hodnoty m se užívá Pavlovského tabulka [1].

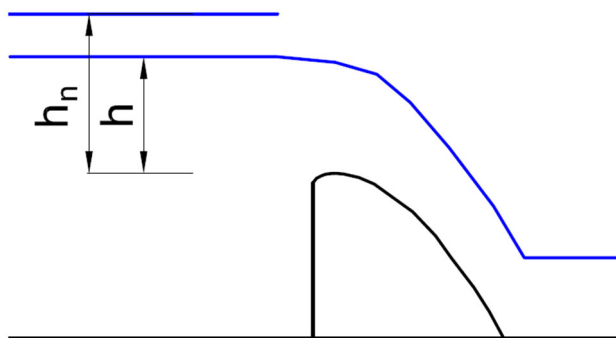
Tabulka 2 - Pavlovského tabulka pro přelivy lichoběžníkového průřezu [1]

typ jezu	sklon stěn	$h/t > 2$	$1 < h/t < 2$	$0,5 < h/t < 1$
vysoké jezy $s > 5\text{m}$	$n \leq 0,5,$ $n_s \leq 0,5$	0,43 - 0,42	0,40 - 0,38	0,36 - 0,35
střední jezy $s = (2 \text{ až } 5) \text{ m}$	se skloněnou návodní stěnou $n = 1$	0,44	0,42	0,40
	$n = 2$	0,43	0,41	0,39
	se skloněnou vzdušnou stěnou $n_s = 1$	0,42	0,40	0,38 - 0,37
	$n_s = 2$	0,40	0,38	0,36 - 0,35
nízké jezy $s < 2 \text{ m}$	se skloněnou návodní stěnou $n = 3$	0,42	0,40	0,38
	$n = 5$	0,40	0,38	0,36
	$n = 10$	0,38	0,36	***
	se skloněnou vzdušnou stěnou $n_s = 3$	0,39	0,37	0,35
	$n_s = 5$	0,375	0,35	***
	$n_s = 10$	0,35	0,35	***

***-přepad přechází v přepad přes širokou korunu

Z důvodu sklonu šikmé plochy zkoušených lichoběžníkových přelivů (1:0,5) jsme se při určení součinitele přepadu, pomocí Pavlovského tabulky, pohybovali v části „vysoké jezy“.

Scimemiho plocha



Obrázek 23 - Scimemiho plocha

Scimemiho plocha (Obr. 23) patří do kategorie Proudnicových přelivných ploch beztlakových. Tedy takových, které na spodní paprsek přepadající vody jen doléhají. Paprsek na takovou plochu teoreticky ani netlačí ani se od ní neodtrhává.

Při přepadové výšce h_n dosahuje součinitel přepadu hodnoty $m = 0,51$.

V jiných případech je možné určit m dle vztahu (upravený Smetanův vztah [1]):

$$m = 0,51 \left(0,63 + 0,37 \sqrt{\frac{h}{h_n}} \right) \quad (12)$$

4.2 Součinitel zatopení

Při dokonalém přepadu je součinitel zatopení $\sigma_z = 1$. Ve chvíli, kdy úroveň hladiny dolní vody začne ovlivňovat přepadové množství a přepad se stává nedokonalým je $\sigma_z < 1$.

Existují postupy, jak při daném Q a přepadové výšce h a hloubce zatopení přelivu h_z určit hodnotu σ_z .

V této práci byly použity 3 postupy:

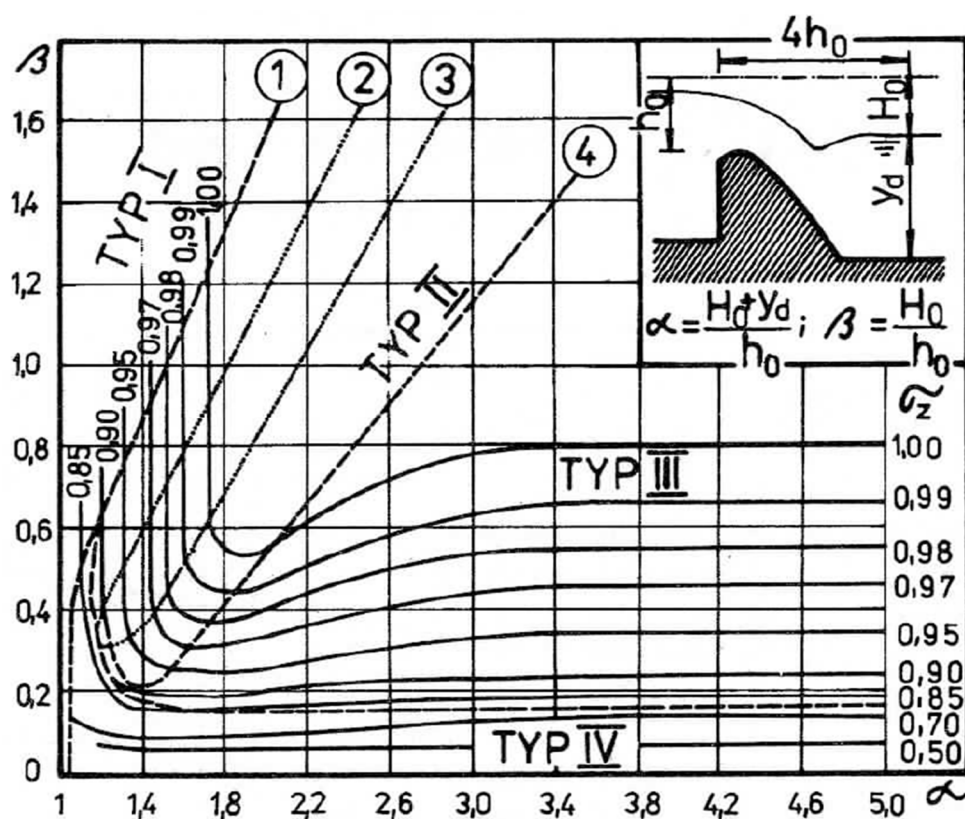
- Pomocí tabulky Oficerova a Istominy [1],
- graf pro určení součinitele zatopení, který je obvykle označován v odborné praxi jako „Denverský“ graf [4],
- pomocí podílů součinitelů dokonalého a nedokonalého přepadu, které byly zjištěny v rámci experimentů prováděných pro diplomovou práci.

Tabulka 3 - Tabulka Oficerova a Istominy [1]

h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z
0,40	0,990	0,65	0,940	0,74	0,869	0,82	0,756	0,90	0,575
0,45	0,986	0,66	0,930	0,75	0,858	0,84	0,719	0,92	0,515
0,50	0,980	0,68	0,921	0,76	0,846	0,85	0,699	0,94	0,449
0,55	0,970	0,70	0,906	0,78	0,820	0,86	0,677	0,95	0,412
0,60	0,960	0,72	0,889	0,80	0,790	0,88	0,629	1,00	0,000

Pro daný poměr hloubky zatopení a přepadové výšky lze získat hodnotu σ_z přímo nebo interpolací. Ve výpočtech (které jsou uvedeny v části Přílohy) je součinitel zatopení získaný z této tabulky označován jako σ_{z2} .

Graf pro určení součinitele zatopení – Denverský graf



Vypočítáním bezrozměrných veličin α , β a vynesení v grafu lze dle polohy průřezků určit velikost součinitele zatopení. Tento graf obsahuje další potřebné údaje, o kterých bude podrobně pojednáno v kapitole 10. Ve výpočtech (které jsou uvedeny v části Přílohy) je součinitel zatopení získaný z tohoto grafu označován jako σ_{zI} .

Podíl součinitelů zatopení

Součinitele zatopení σ_z lze pohodlně vypočítat z vyjádřených hodnot součinitelů přepadů. V našem případě jsme pro jeden průtok měřili 5 stavů (1 dokonalý a 4 nedokonalé přepady). Pro dokonalý přepad je $\sigma_z = 1$, další 4 hodnoty vypočítáme z rovnice:

$$\sigma_z = \frac{m_{0 \text{ nedok}}}{m_{0 \text{ dok}}} \quad (13)$$

Ve výpočtech (které jsou uvedeny v části Přílohy) je součinitel zatopení získaný z této rovnice označován jako σ_z .

5 Fyzikální modelování proudění přes přeliv

Problematikou fyzikálního modelování proudění vody přes přeliv se zabýval např. Šulc a Šafář v publikaci [2]. Z této publikace jsou převzaty jen základní charakteristiky, údaje a vysvětlení.

Při proudění vody na fyzikálních (hydraulických) modelech, běžně používaných rozměrů, působí na tento děj ve velké míře síly tíže, méně potom síly tření a síly povrchového napětí.

Aby byla zachována podmínka mechanické podobnosti, musí být hodnota Froudova kritéria shodná pro model i skutečné dílo, ve vztahném profilu. Tato hodnota Froudova kritéria je stanovena pro charakteristickou rychlost a délku.

Nejmenší možné zmenšení modelovaného jevu je určováno mezními podmínkami platnosti zvoleného kritéria mechanické podobnosti. V případě, kdy je model přelivu příliš zmenšený, dochází ke snižování vlivu gravitace. Na model přepadu začnou mít vliv (ve větší míře) síly povrchového napětí, případně i viskozity. Při následném zmenšení zkoumaného jevu jsou výsledky již velmi ovlivněny. Takové výsledky částečně nebo úplně ztrácí svoji spolehlivost. Když při modelování přepadu dojde k překročení této dolní meze, dochází k zjizvitelnému ovlivnění tvaru přepadového paprsku působením povrchového napětí, případně i viskozitou. Takové ovlivnění způsobuje ztrátu automodelovosti jevu.

Určením dolních mezí, které je velmi důležité znát, při modelování proudění vody přes přeliv (aby nedocházelo k nepříznivým ovlivněním výsledků) se zabývala řada autorů např. Čábelka a Smetana. Tomuto tématu se rovněž věnuje množství publikací a vědeckých prací, které k danému účelu doporučuje asociace IAHR. Některé mezní hodnoty jsou uvedeny dále.

Výška přepadového paprsku

Smetana uvádí pro z boků ohraničený přepad přes ostrou hranu jako mezní hodnotu přepadové výšky 0,02 m. Při nižší výšce začíná již být přepadová parabola paprsku, vlivem povrchového napětí, výrazně zkreslována. Z toho důvodu doporučuje zaměřovat průběh volného paprsku přepadajícího přes ostrou hranu z přepadových výšek alespoň 0,1 m. Čábelka uvádí mezní hodnotu přepadové výšky pro ostrohranný přeliv 0,06 m, pro model proudnicově zaobleného přelivu 0,05 m. Šulc a Šafář v publikaci [2] uvádí, jako spodní hranici pro zachování automodelovosti jevu přepadu přes přeliv lichoběžníkového průřezu

s kruhově zaoblenou korunou, velikost přepadové výšky 16 mm (pro zavzdušněný i nezavzdušněný prostor pod přepadovým paprskem).

Šířka přelivu

Pro zachování dominantního podílu gravitačních sil na modelech přelivných polí jezů a přehrad jsou doporučovány hodnoty světlých šířek $b > 0,06$ m. Při použití výsekových modelů je doporučována šířka hydraulických žlabů (pro potlačení vlivu drsnosti stěn) $b \geq 0,20$ m.

Hodnoty šířek přelivů a přepadových výšek jsou všeobecným doporučením spodních mezí pro zajištění automodelovosti přepadu přes přelivy a byly stanoveny s dostatečnou bezpečností. Dolní meze modelové podobnosti však často přináší zvýšené potřeby na zastavěný prostor laboratoří a zkušeben, kapacitu hydraulického okruhu aj.

Drsnost povrchu přelivu

Při provádění výzkumu přepadu přes přeliv s kruhově zaoblenou korunou [2] byly povrchy zkoušených modelů opatřeny smirkovým papírem (tedy velmi drsným materiálem). Následně byly prováděny zkoušky, které měly určit vliv drsnosti povrchu na změnu kapacity přelivu. Výsledkem bylo, že k ovlivnění opravdu dochází.

Je však důležité si uvědomit, že drsnosti povrchů materiálů, které se běžně používají k výrobě modelů přelivů, jsou velice nízké (v porovnání se smirkovým papírem) a během provádění zkoušek při výškách přepadového paprsku větším než 20 mm se na hodnotě m projeví pouze v rozsahu chyb měření.

V rámci zkoušek prováděných k této diplomové práci byly zkoušeny 2 modely Scimemiho plochy. Jeden měl povrchu opatřený nátěrem, druhý nikoliv. Při srovnání výsledků zkoušek na těchto modelech přelivů bylo dosaženo shody výsledků, tedy potvrzení předpokladů.

Vliv zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem

Zavzdušnění pod přepadovým paprskem nastává v případě, když se velikost tlaku pod přepadovým paprskem přibližně rovná hodnotě atmosférického tlaku. V případě, kdy je

prostor pod přepadovým paprskem zavzdušněný, je umožněno setrvačným silám paprsek vody oddálit a odchýlit od přelivu. Po dopadu proudu vody na dno podjezí (prostor poproudě za přelivem) dojde k jeho rozdělení na dva dílčí proudy (v souladu se změnou hybnosti). Hlavní část proudu odtéká poproudě směrem od přelivu, vedlejší část proudu však směřuje směrem k přelivu a u jeho paty vytvoří rotující přilehlý vodorovný vodní válec, který ovlivňuje výsledný tvar paprsku.

Přepad vody přes přeliv při překročení určitého průtoku a nezavzdušnění je doprovázen zvýšenými podtlaky na přelivné ploše, dochází zde k sání a paprsek vody je tak přichýlen ke konstrukci přelivu.

Zavzdušněnost prostoru pod přepadovým paprskem vody se projevuje na kapacitě takového přelivu, na jeho snížení (viz [2]).

6 Mechanická podobnost v hydraulice

6.1 Zákony modelové podobnosti

V této kapitole budou odvozeny základní vztahy užívané při modelování hydraulických jevů. Podrobné komentáře a odvození výpočetních vztahů a zákonů jsou uvedeny v publikaci [1].

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.

6.1.1 Geometrická podobnost

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

$$M_L = \frac{L_2}{L_1}; L_2 = M_L L_1 \quad (14)$$

Pro měřítka ploch platí:

$$M_S = \frac{S_2}{S_1}; M_S = M_L^2 \quad (15)$$

a pro měřítka objemů platí:

$$M_V = \frac{V_2}{V_1}; M_V = M_L^3 \quad (16)$$

6.1.2 Kinematická podobnost

Dráhy, které opisují sobě odpovídající částice proudu v úměrně odpovídajících si dobách ($t = \text{čas}$), jsou navzájem podobné. K měřítku délek přistupuje měřítko času:

$$M_t = \frac{t_2}{t_1}; t_2 = M_t t_1 \quad (17)$$

Odvozená měřítka jsou:

-rychlostní měřítko:

$$M_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{L_2/t_2}{L_1/L_2} = \frac{L_2/L_1}{t_2/t_1} = \frac{M_L}{M_t}; v_2 = M_v v_1 \quad (18)$$

-měřítko zrychlení:

$$M_a = \frac{a_2}{a_1} = \frac{L_2/t_2^2}{L_1/t_1^2} = \frac{L_2/L_1}{t_2^2/t_1^2} = \frac{M_L}{M_t^2} \quad (19)$$

-měření průtoků:

$$M_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{V_2/t_2}{V_1/t_1} = \frac{V_2/V_1}{t_2/t_1} = \frac{M_L^3}{M_t} \quad (20)$$

6.1.3 Dynamická podobnost

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

$$M_F = \frac{F_2}{F_1}; F_2 = M_F F_1. \quad (21)$$

Pro hmotnost proudící kapaliny definujeme měřítko hmotnosti:

$$M_m = \frac{m_2}{m_1}; m_2 = M_m m_1. \quad (22)$$

Dále se zavádí měřítko měrných hmotností:

$$M_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (23)$$

Po aplikaci uvedených poměrů v silové rovnici

$$F = m a \quad (24)$$

(pozn. a = zrychlení, m = hmotnost), obdržíme bezrozměrné Newtonovo kritérium, zároveň vyjadřuje obecný zákon podobnosti:

$$\frac{F}{\rho v^2 L^2} = \textit{idem}. \quad (25)$$

Mají-li být dvě proudění mechanicky podobná, musí mít poměr (25) 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 je jeden druh sil (nebo nad ostatními dominuje).

Při převažujícím účinku síly tíže vyplývá:

$$\frac{gL}{v^2} = idem, \quad (26)$$

což musí platit i pro převrácenou hodnotu

$$\frac{v^2}{gL} = Fr = idem. \quad (27)$$

Rovnice (27) 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 (vodní stavby jako jsou přelivy a jezy, při proudění v řekách, ale i při proudění vodními turbínami a čerpadly, účinky vln apod.).

Při převažujícím účinku sil tření platí:

$$\frac{vL}{\vartheta} = Re = idem. \quad (28)$$

Rovnice (28) 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 apod.

Při převažujícím účinku sil povrchového napětí platí:

$$\frac{\rho v^2 L}{\sigma} = We = idem. \quad (29)$$

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 skutečnost byla shodná.

Mezi další kritéria patří:

- Cauchyho kritérium – pro objemovou stlačitelnost,
- Strouhalovo kritérium – pro podobnost dvou neustálených jevů,
- Karmánovo kritérium – pro podobnost dvou turbulentních jevů.

V našem případě volíme $b = 412$ mm, je splněna podmínka udávána doporučenou mezí ($b > 0,2$ m). Měření provedeme pro $h > 0,02$ m.

7 Modely přelivů a zkušební laboratoř

Pracovníky Laboratoře vodohospodářského výzkumu bylo vyrobeno 9 modelů přelivů z extrudovaného polystyrenu. Tyto modely byly jednotlivě instalovány v měrném žlabu v budově F, Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Po provedení měření byl příslušný model přelivu vyňat a nahrazen dalším. Model přelivu byl k plechovému dnu a bočním skleněným stěnám uchycen pomocí silikonu. Z toho důvodu vyplývala jistá časová náročnost, poněvadž po proběhnutí zkoušek muselo být místo instalace přelivu vysušeno, následně umístěn další přeliv a silikonový tmel musel určitý počet hodin schnout.

7.1 Budova F – zkušební laboratoř

Pro provádění zkoušek byl zvolen hydraulický okruh s proskleným žlabem délky 12,5 m a šířky 412 mm v budově F. Tento žlab je možný nastavit do požadovaného sklonu, avšak pro naše účely byl nastaven do horizontální polohy ($J_0 = 0$). Požadovaný průtok byl nastavován pomocí ovládací jednotky. Voda v této zkušebně není přiváděna přímo z vodovodního řadu, ale z podzemních zásobních nádrží (důvod úspory), pomocí čerpadel. Voda následně proudila přes Thomsonův měrný přeliv, opatřený ultrazvukovým měřidlem (dále jen UZV), do měrného žlabu. Na konci měrného žlabu bylo rovněž umístěno UZV měřidlo, z bezpečnostních důvodů (v případě překročení max. hloubky vody ve žlabu dojde k okamžitému odstavení čerpadel, aby nedošlo k rozlité vody mimo žlab). Odtok vody ze žlabu je řešen pomocí svislého potrubí, na kterém je instalován klapkový uzávěr. Voda tudý volně padá zpět do zásobní nádrže.



Obrázek 24 - Hydraulický žlab v budově F

7.2 Modely přelivů

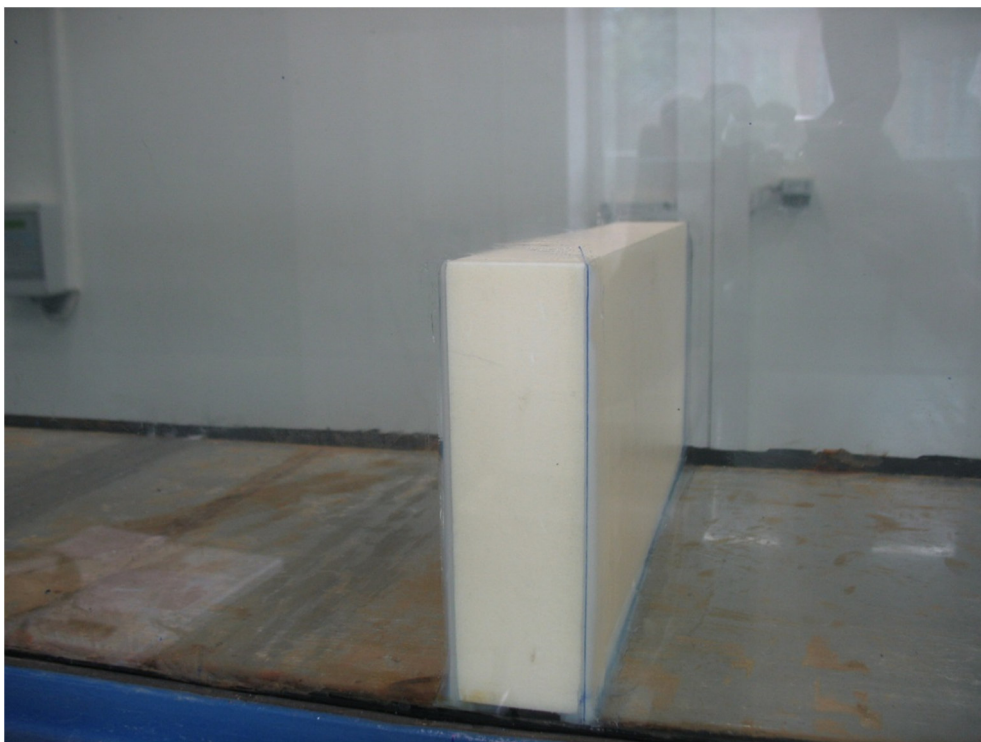
Celkem bylo zkoušeno 9 typů přelivů, které lze charakterizovat tvarem příčného průřezu:

- Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou (Obr. 25)
- Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami (Obr. 26)
- Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami (Obr. 27)
- Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ (Obr. 28)
- Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ (Obr. 29)
- Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ (se zaoblenými hranami) (Obr. 30)
- Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ (se zaoblenými hranami) (Obr. 31)
- Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou (Obr. 32)
- Scimemiho plocha (Obr. 33)

7.2.1 Fotografie přelivů



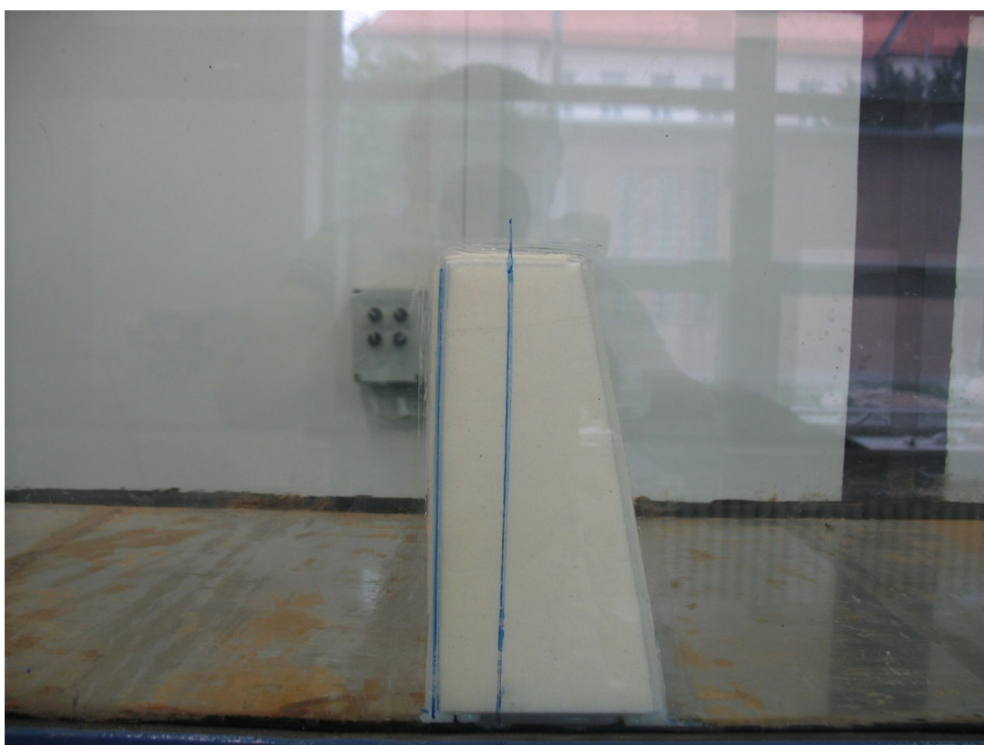
Obrázek 25 – Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou



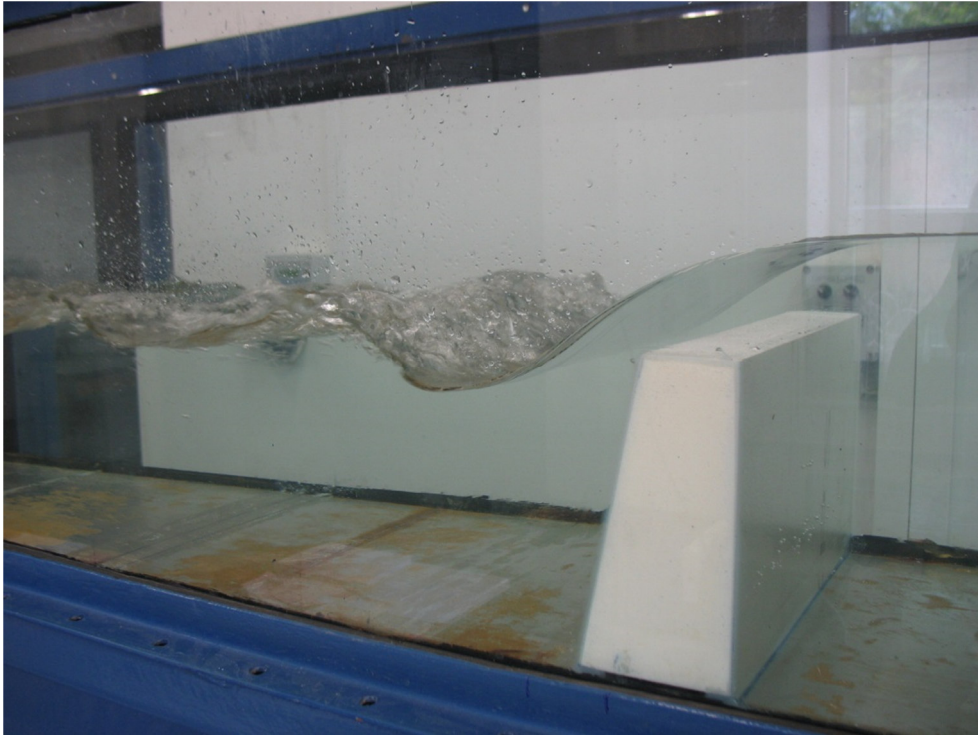
Obrázek 26 – Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami



Obrázek 27 – Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami



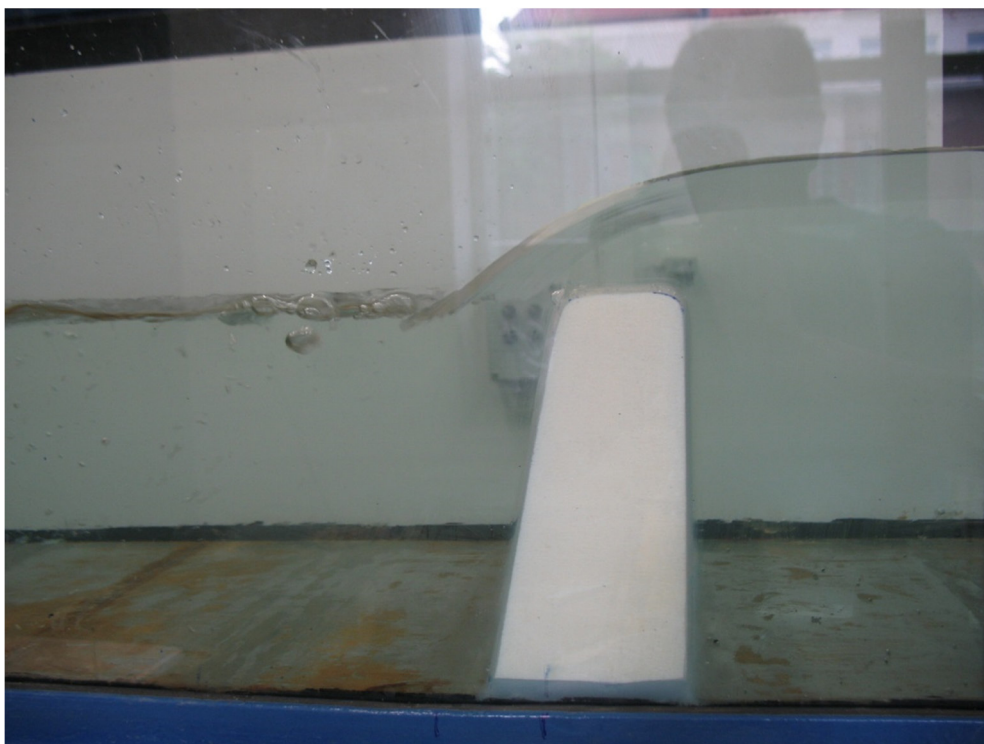
Obrázek 28 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ



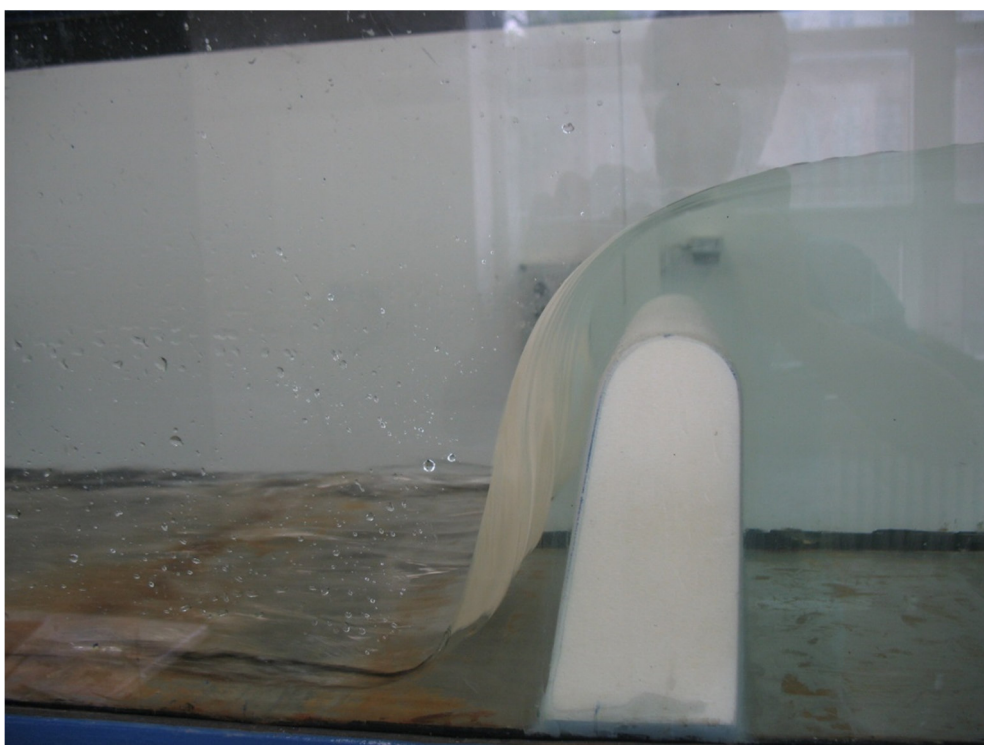
Obrázek 29 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ



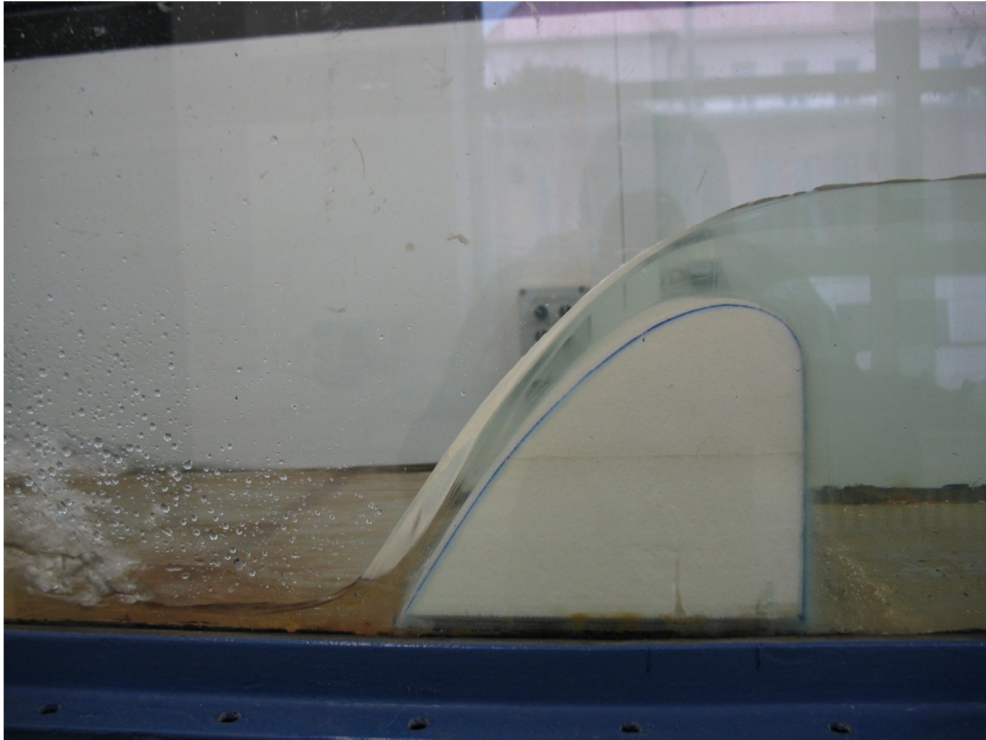
Obrázek 30 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ



Obrázek 31 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ



Obrázek 32 – Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

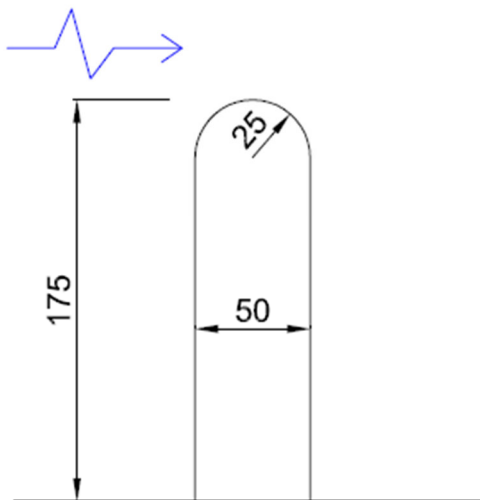


Obrázek 33 – Scimemiho plocha

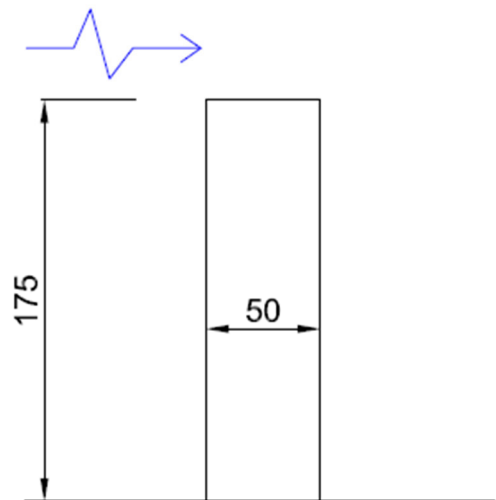
7.2.2 Schémata přelivů

Uvedené rozměry v této kapitole jsou v [mm].

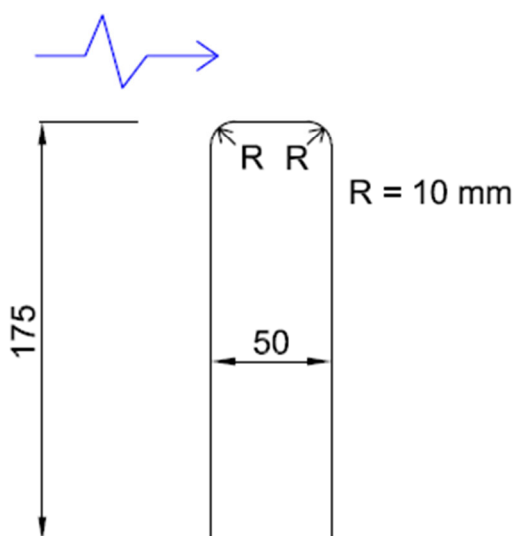
Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou



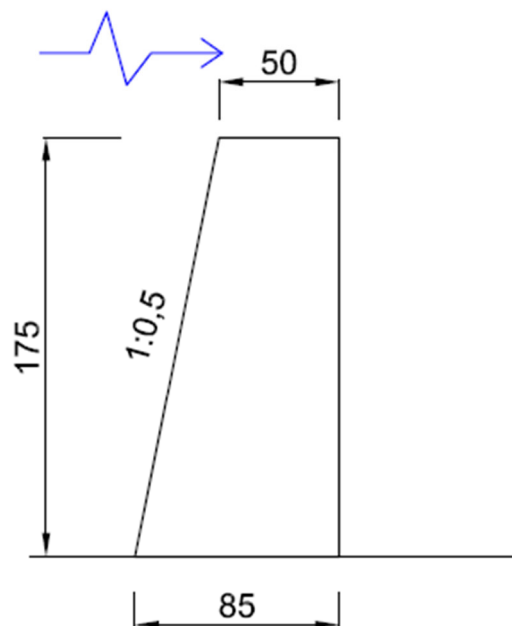
Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami



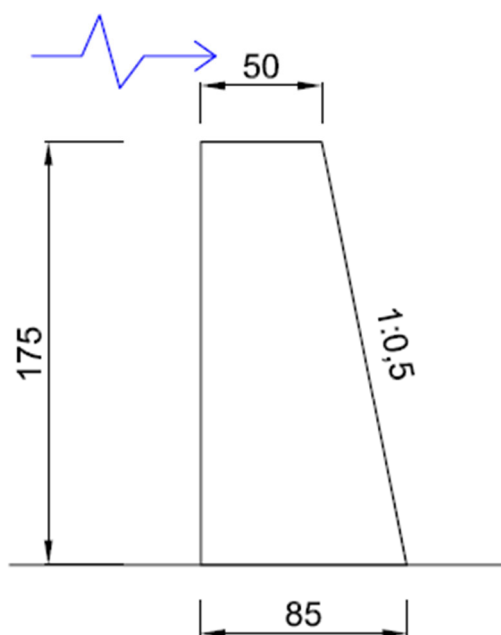
Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami



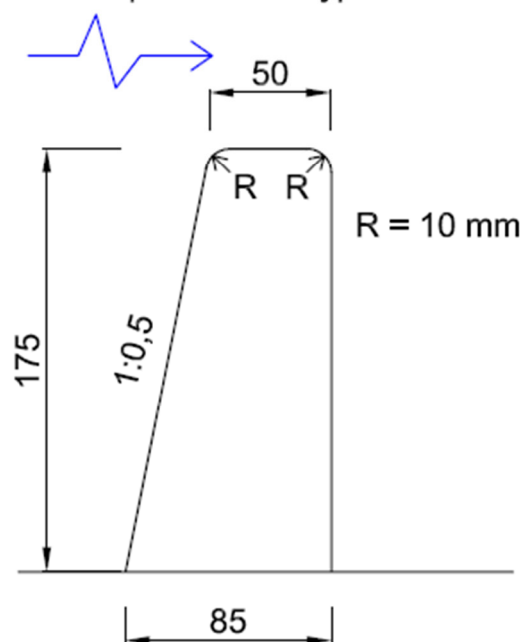
Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ



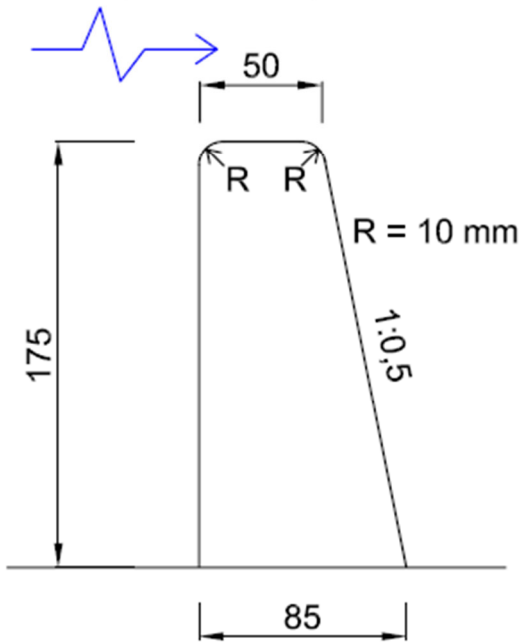
Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ



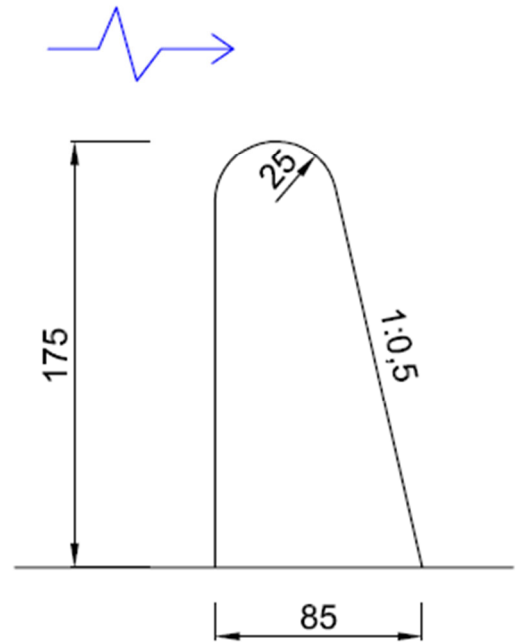
Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ



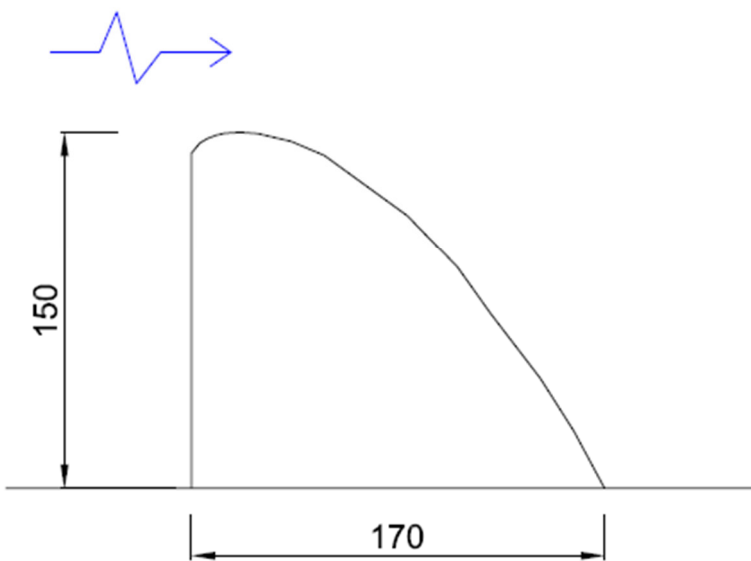
Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ



Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou



Scimemiho plocha



Platí pro návrhovou přepadovou výšku $h_n = 70$ mm.

8 Měření na modelech přelivů

Všechny modely přelivů byly zkoušeny při 5 průtocích. Nejnižší průtok byl stanoven 9 l/s, nejvyšší 40 l/s. Vzhledem k tomuto rozpětí byly zvoleny průtoky $Q = (10; 20; 25; 30; 35)$ l/s. Úrovně hladiny byly odečítány digitálními hrotovými měřidly. Průtoky byly odečítány na průtokoměrné jednotce. Tato jednotka dokáže měřit průtok vody s přesností 0,01 l/s. Podélný sklon žlabu byl, během všech zkoušek, vodorovný ($J_0 = 0$).

8.1 Postup měření

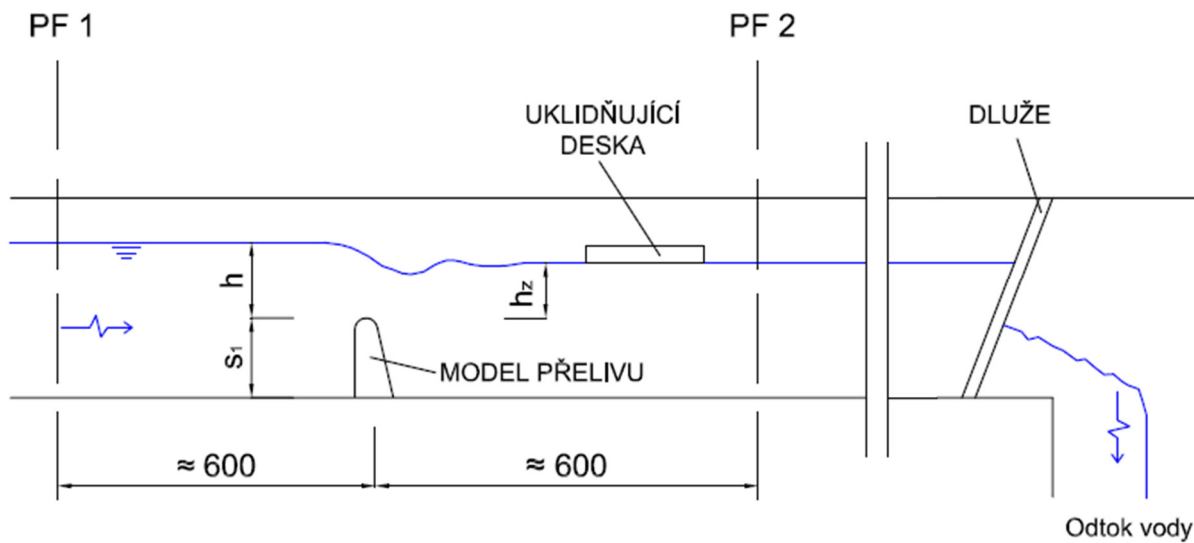
Pro každý průtok bylo nastaveno 5 různých stavů. 1. stav byl dokonalý přepad (přepadové množství není ovlivněno úrovní hladiny vody za přelivem). Další 4 stavy byly nastaveny tak, aby došlo k ovlivnění přepadu – nedokonalý přepad. Tento případ nastal ve chvíli, kdy úroveň hladiny dolní vody byla výš než úroveň koruny přelivu (rovnice 4) a přeliv byl tedy postupně zatápen. Měření úrovně hladin vody (h a h_z) se provádělo za ustáleného stavu, kdy úrovně hladin v profilech PF1 a PF2 (viz schéma níže), ve kterých byla umístěna hrotová měřidla, byly konstantní během určité doby. Hladinové poměry zejména při počátku ovlivnění byly foceny.

Hloubka zatopení přelivu (velikost h_z) se ovlivňovala pomocí úzkých plastových dluží („jednoduchý malý hradlový jez“), které se postupně umísťovaly do proudu vody na konci žlabu. Při dně žlabu se dluže umísťovaly do drážky, v horní části se tlakem vody opíraly do kovového úhelníku, který prochází napříč žlabem.

Z důvodu snazšího a přesnějšího odečtu výšky hladin byly za Thomsonovým přelivem a za přelivem (v dostatečné vzdálenosti, aby nedocházelo k ovlivnění měření) umístěny plovoucí polystyrenové desky. Tyto desky plnily řádně svoji funkci, hladina nebyla tak rozvlněná a měření se stalo přesnější.

Schéma uspořádání modelu a měřených veličin

Uvedené rozměry jsou v [mm].



9 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

Z hodnot odlehlosti úrovní hladin od koruny přelivu získaných modelovými zkouškami (h a h_z) jsme pro jednotlivé přelivy spočítali hodnotu přítokové průřezové rychlosti vody ve žlabu v_0 :

$$v_0 = \frac{Q}{S}, \quad (30)$$

pomocí rovnice (2) jsme schopni vyjádřit velikost energetické přepadové výšky h_0 :

$$h_0 = h + \frac{v_0^2}{2g}.$$

V tuto chvíli nám již nic nebrání vypočítat hodnotu přepadového součinitele přelivu m_0 , pomocí úpravy rovnice přepadu (1):

$$m_0 = \frac{Q}{bh_0^{3/2}\sqrt{2g}}. \quad (31)$$

Pozn.: v této kapitole (i v části Přílohy) je m_0 součinitel přepadu, který zahrnuje velikost přítokové rychlosti, tedy hodnotou h_0 . Přepadový součinitel m neuvažuje s přítokovou rychlostí ($v_0 = 0$ m/s, tedy $h_0 = h$).

Ve výpočtech (viz Přílohy) byly počítány hodnoty obou součinitelů přepadu (m i m_0). Při porovnávání hodnot součinitelů přepadů z měření s hodnotami dle různých autorů, byly porovnávány jen hodnoty m . Protože žádný z autorů neuvažuje ve výpočtu (nebo v tabulkách) s hodnotou přítokové rychlosti.

$$m = \frac{Q}{bh^{3/2}\sqrt{2g}} \quad (31a)$$

Dále byly určovány 3 hodnoty součinitele zatopení σ_z a to způsoby, které jsou uvedeny v kapitole 4.2. Jednou z částí této práce je porovnání hodnot součinitelů zatopení získaných z Denverského grafu (σ_{z1}) a součinitelů zatopení získaných poměrem přepadových součinitelů (σ_z) a tím tedy potvrzení platnosti (neplatnosti) Denverského grafu pro určování hodnot součinitelů zatopení. Hodnoty σ_{z2} dle Oficerova a Istominy (Tab. 4) jsou zde brány jen jako orientační a neporovnávají se s hodnotami σ_z (z měření), protože hodnoty součinitele zatopení dle Oficerova a Istominy jsou závislé na poměru h_z/h (neuvažují s vlivem velikosti přítokové rychlosti). Zatímco σ_{z1} dle Denverského grafu a σ_z získané z měření uvažují s velikostí přítokové rychlosti.

Součástí výpočtů bylo rovněž určení poměrů h_z/h_0 a s_1/h_0 pro každý měřený stav. Hodnoty těchto poměrů byly dále využívány pro grafické vyhodnocení.

Každý zkoušený druh přelivu byl kapacitně charakterizován 4 způsoby.

V prvním je vyjádřena hodnota součinitele m ze vztahu (31a) a tato je porovnána s hodnotami m dle různých autorů.

Druhé vyhodnocení charakterizuje závislost m_0 (uvažuje se s velikostí přítokové rychlosti) na bezrozměrné veličině. Tato závislost je pro dokonalý přepad vyjádřena pomocí polynomu a jeho rovnice, která je uvedena v grafu i v komentáři vyhodnocení. Vyjádření závislosti pomocí rovnice polynomu bylo prováděno zejména z důvodu využití výstupů této práce pro uplatnění v technické praxi.

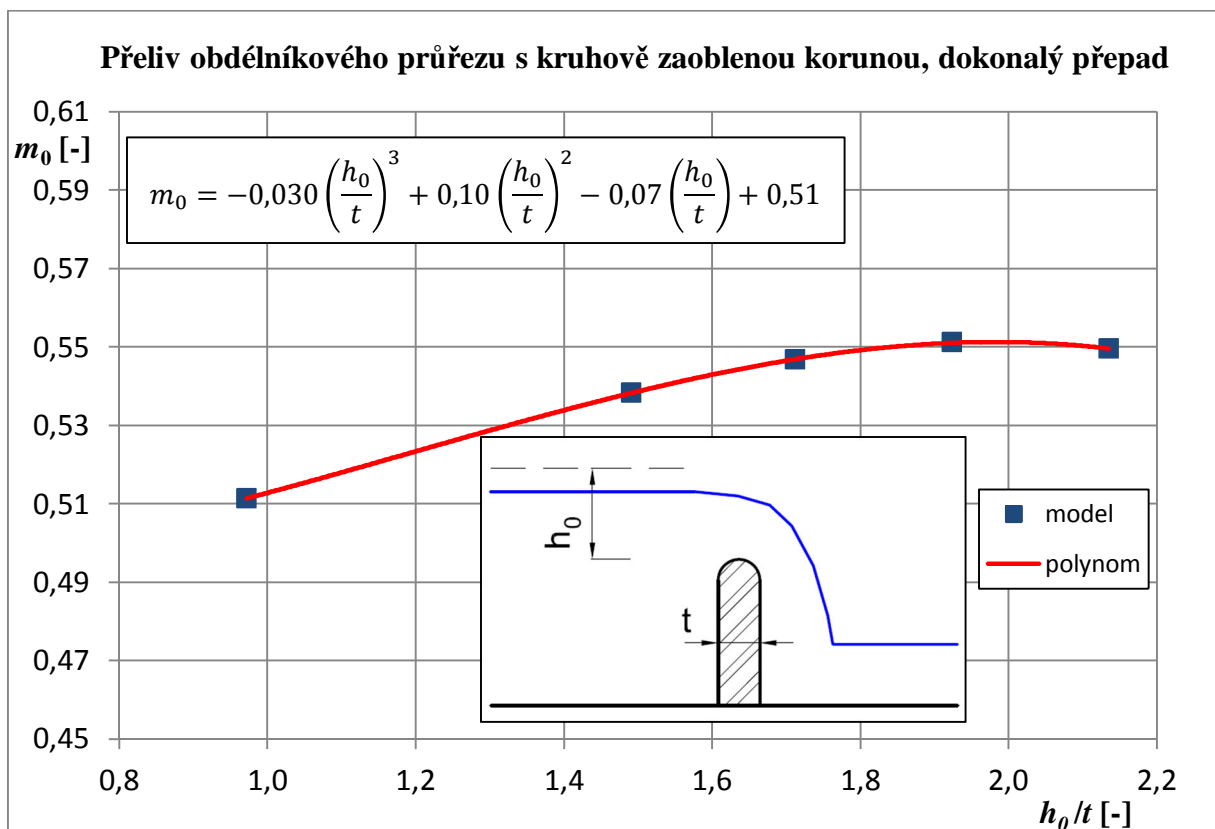
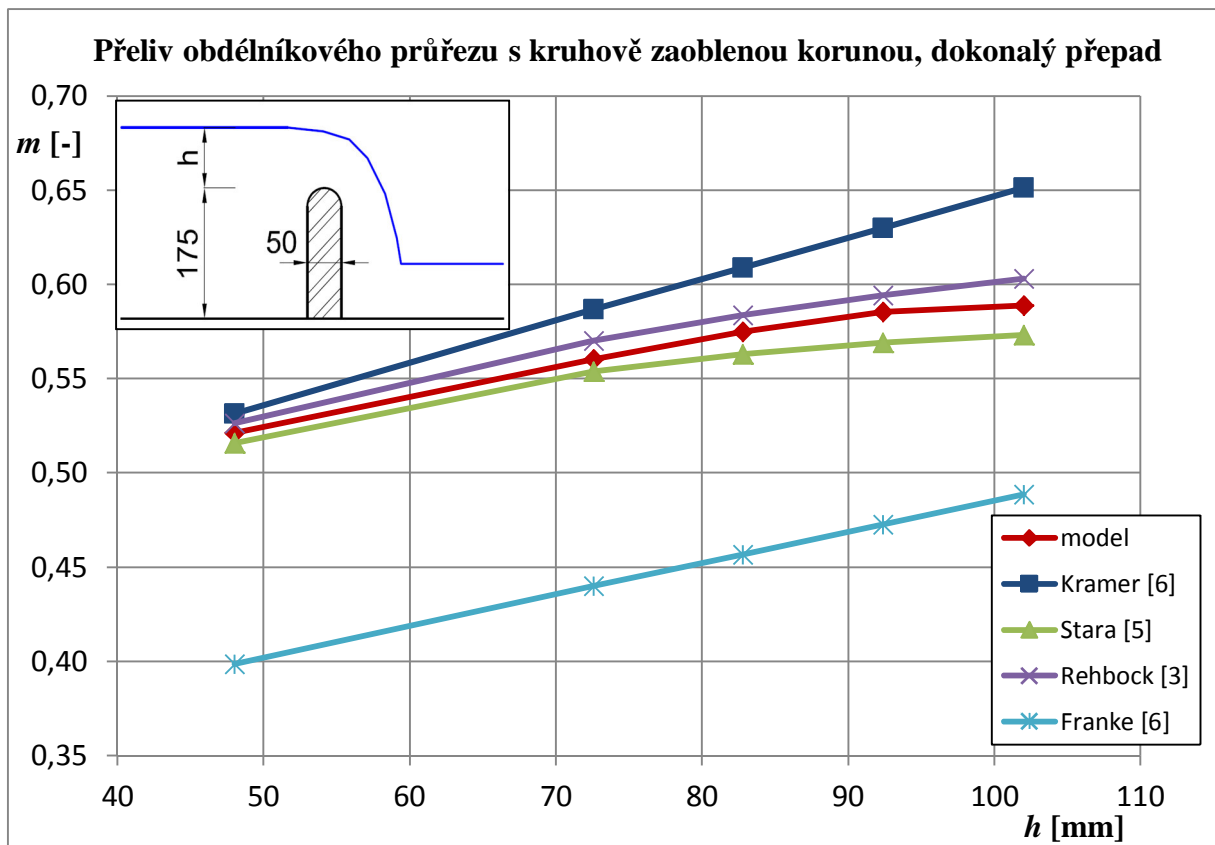
Třetí způsob vyhodnocení vyjadřuje závislost součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 .

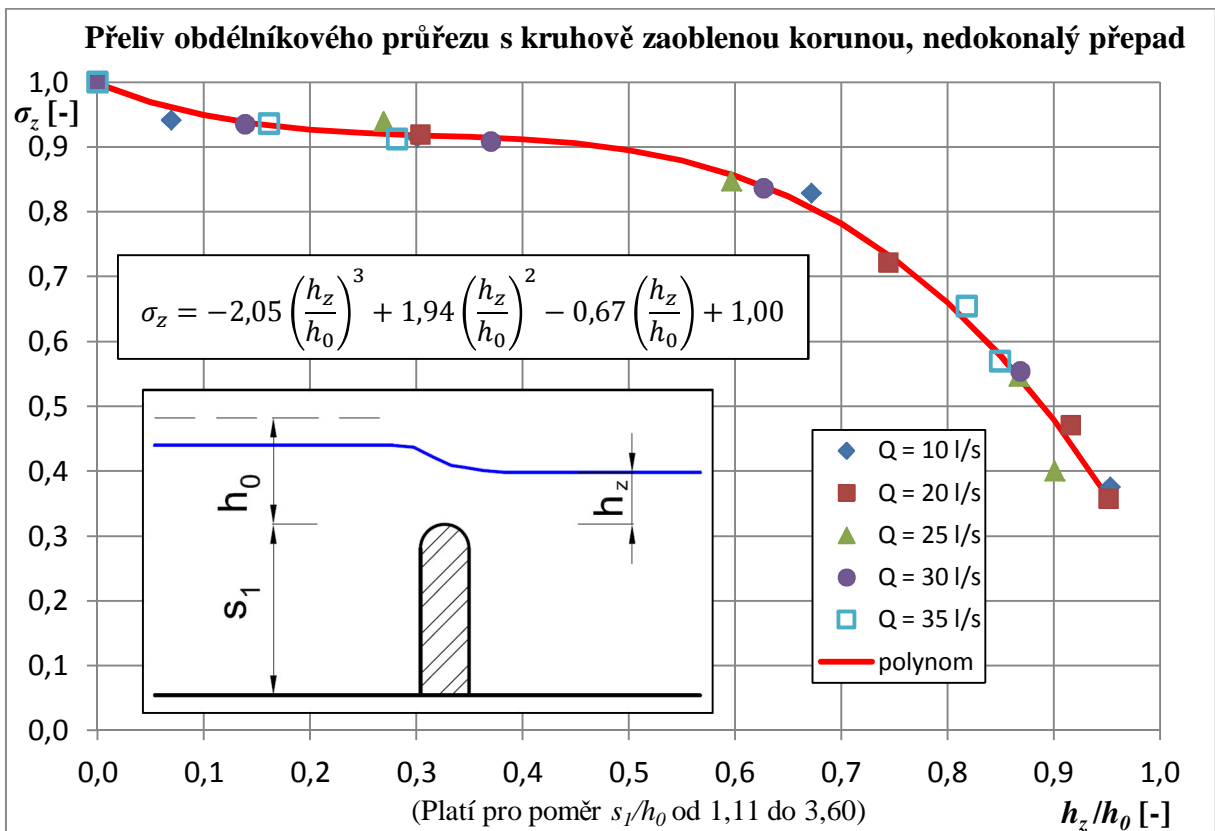
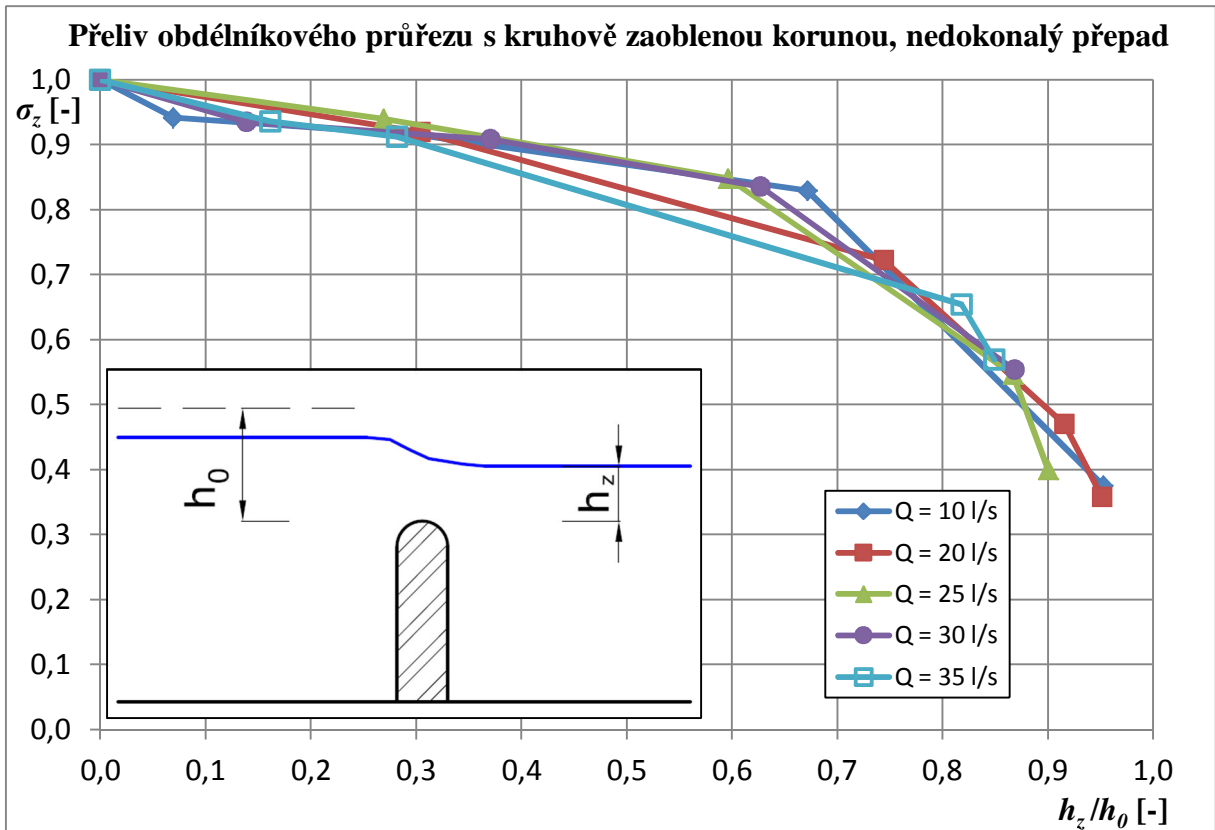
Čtvrté vyhodnocení je podobné třetímu. Rozdíl spočívá v tom, že jednotlivé body nejsou spojeny čarami, ale jsou samotné. Průběh závislosti je vyjádřen rovněž pomocí polynomu a jeho rovnice, která je uvedena v grafu i v komentáři vyhodnocení. V komentáři ke grafickým vyhodnocením (i v grafu samotném) je uveden interval mezi maximální a minimální hodnotou poměru s_1/h_0 , aby bylo možné použít výsledky v praxi. Tedy projektant si bude moci podle daného poměru h_z/h_0 zjistit přímo hodnotu součinitele zatopení. Bude si však muset ověřit, že se pohybuje v rozmezí udávaného intervalu s_1/h_0 .

V následující části jsou uvedena grafická vyhodnocení s příslušným komentářem a fotografie pořízené během provádění zkoušek. Tabulky s naměřenými a vypočtenými údaji pro každý zkoušený typ přelivu jsou uvedeny v části Přílohy.

Nyní budou představeny graficky zpracované výsledky měření pro jednotlivé typy zkoušených přelivů s příslušnými komentáři.

9.1 Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Z grafického vyhodnocení zkoušek a vypočtených hodnot dle různých autorů vyplývá, že výsledky z měření na modelu přelivu jsou nejvíce podobné s výsledky získanými dle Stary [5] a Rehbocka [3]. Mají přibližně stejný průběh, zejména s výsledky získanými výpočtem dle Stary [5]. To je velmi potěšitelné z toho důvodu, že Stara uvedl vyjádření přepadového součinitele pomocí nelineárního regresního modelu, právě pro přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou a rovněž prováděl zkoušky při nezavzdušněném prostoru pod přepadovým paprskem. Nejvyšší rozdíl který byl dosažen mezi výsledky dle Stary a výsledky z měření je 0,016 (tj. 3 %), nejnižší 0,005 (tj. 1 %).

Rehbock [3] sestavil vztah pro jiný druh přelivu (lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou), avšak jeho vyjádření m jsme použili pro srovnání, díky podobnému tvaru přelivu.

Výsledky dle Kramera [6] mají přibližně lineární průběh. S našimi výsledky se neshodují, vyjma výsledků při $Q = 10$ l/s. Franke [6] doporučuje výsledky dle Kramera ponížít o 25 až 30 %, tedy výsledky získané dle Frankeho mají s Kramerovými rovnoběžný průběh.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 3. stupně:

$$m_0 = -0,030 \left(\frac{h_0}{t}\right)^3 + 0,10 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 - 0,07 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,51. \quad (32)$$

Závislost součinitele zatopení na poměru h_z/h_0 má mírně sestupnou tendenci do hodnoty 0,7. Od této hodnoty poměru h_z/h_0 začíná být přepad přes přeliv silně ovlivněn dolní vodou. Tato závislost hodnoty σ_z na poměru h_z/h_0 je vyjádřena pomocí polynomu 3. stupně:

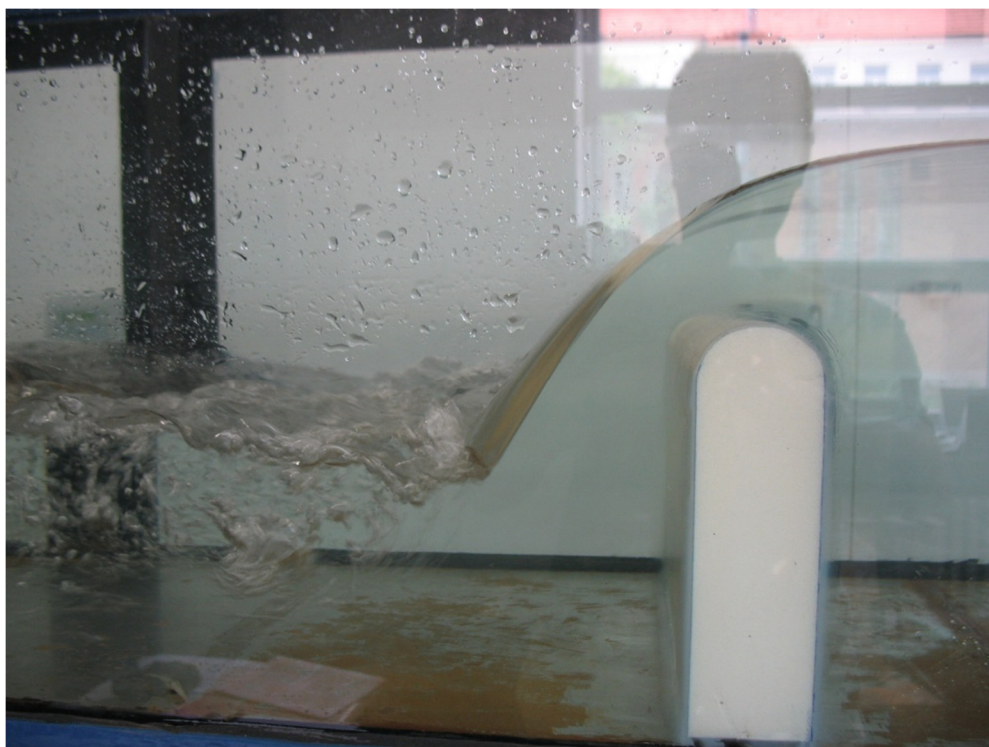
$$\sigma_z = -2,05 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 1,94 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,67 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (33)$$

Tato uvedená závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 1,11 do 3,60.

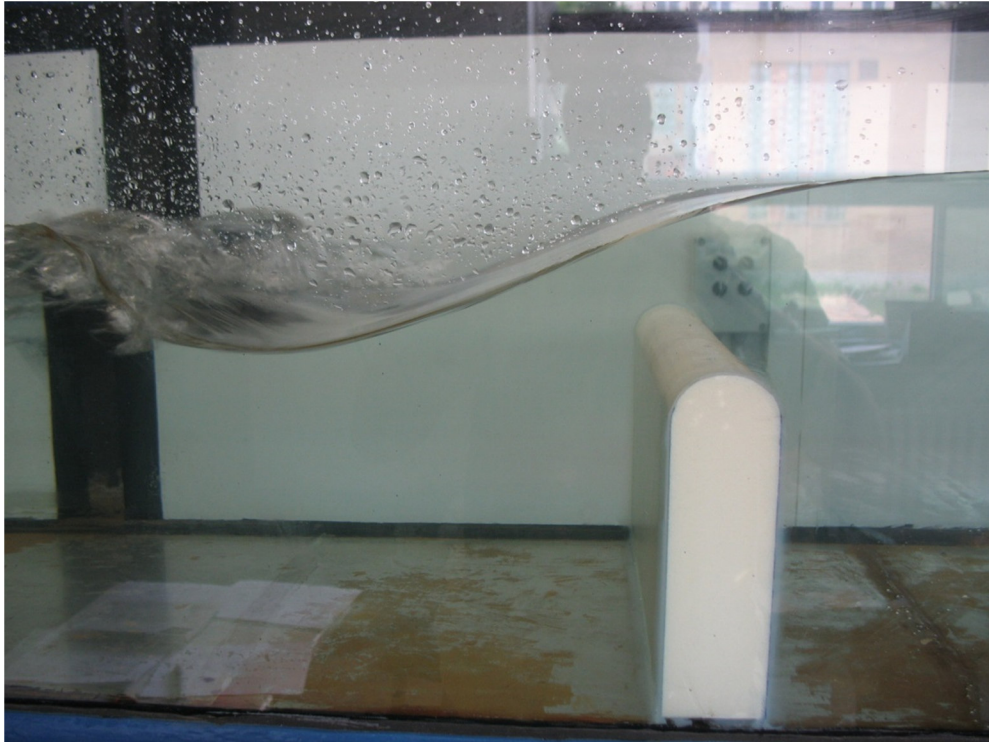
Součinitelé zatopení dle Denverkého grafu vycházejí vyšší (viz Příloha P1), než hodnoty σ_z , které jsme vypočítali, řádově o min 0,09. Shodu lze najít v posledních stavech, kdy byl přepad velmi ovlivněn. Avšak tuto shodu je nutno brát s rezervou, protože přesnější určení $\sigma_{z1} < 0,5$ z grafu je nemožné.



Obrázek 34 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 48 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 35 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 73 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$

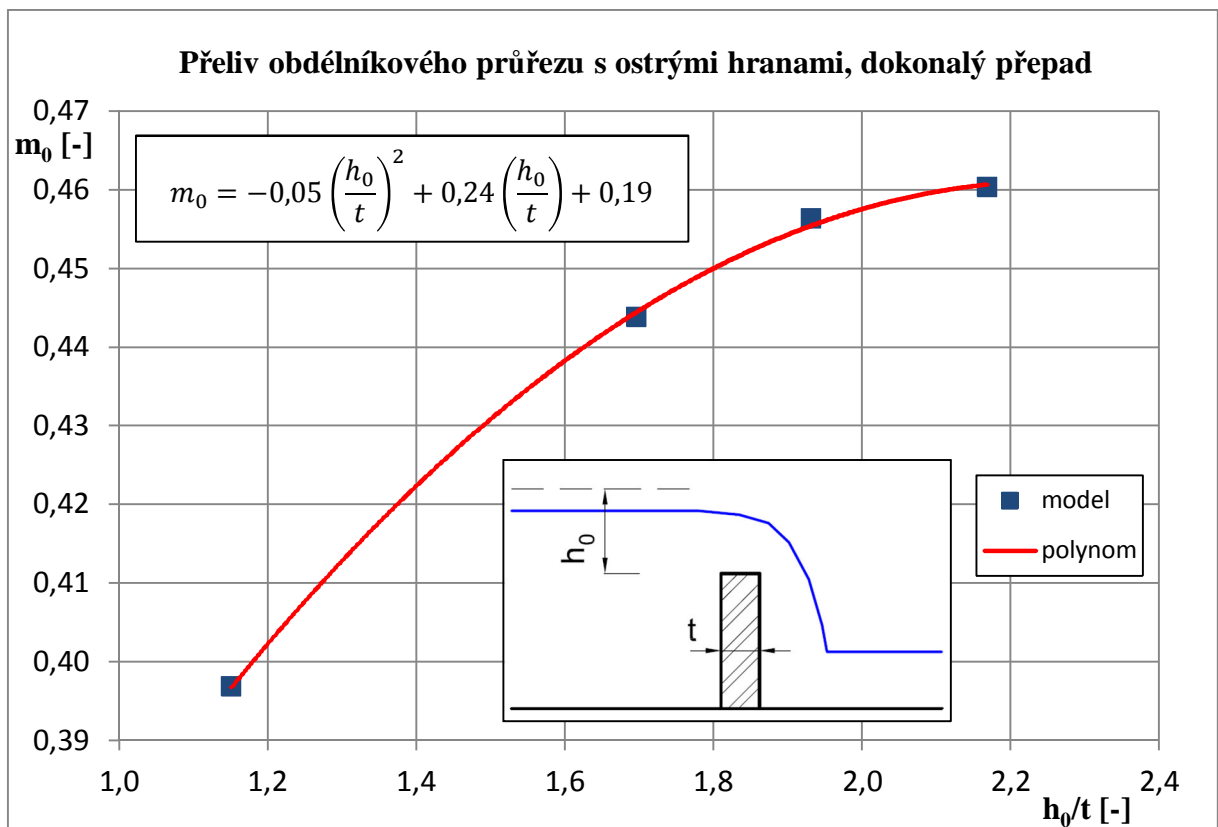
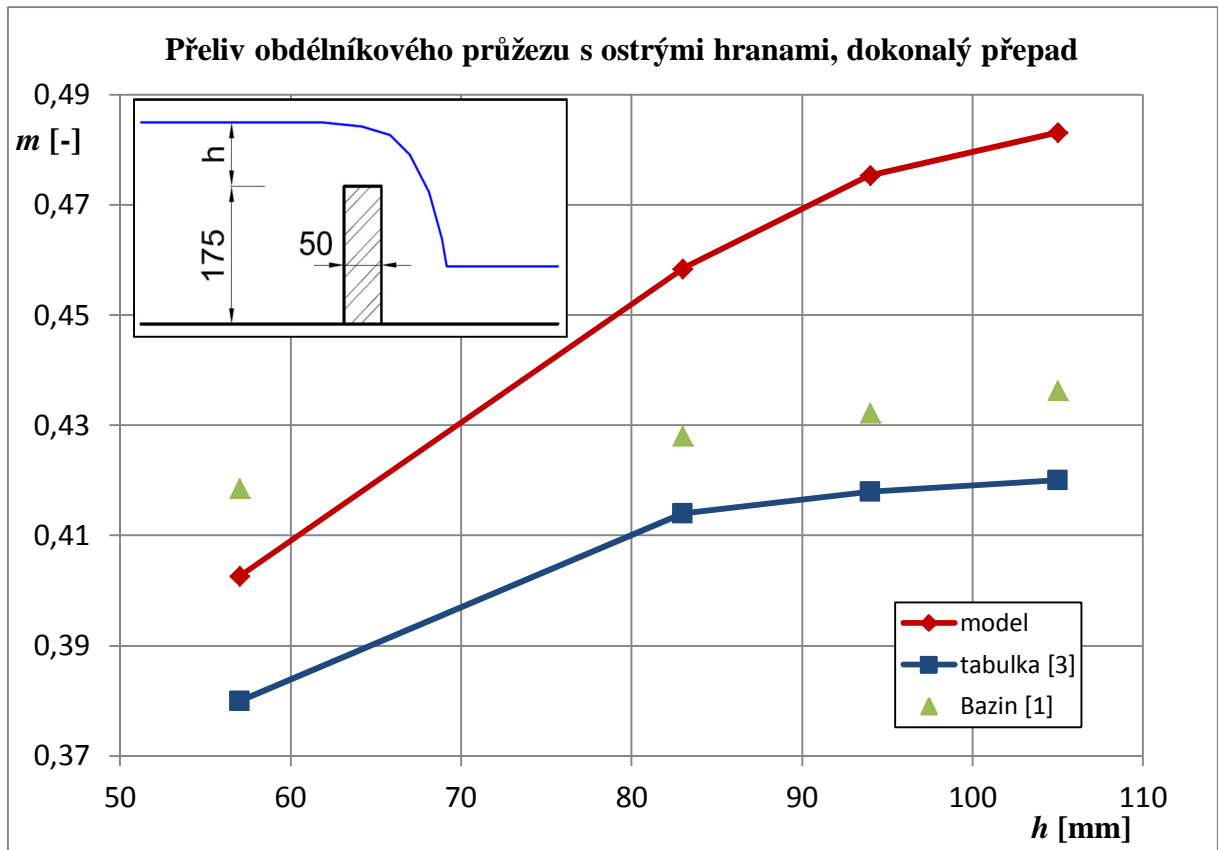


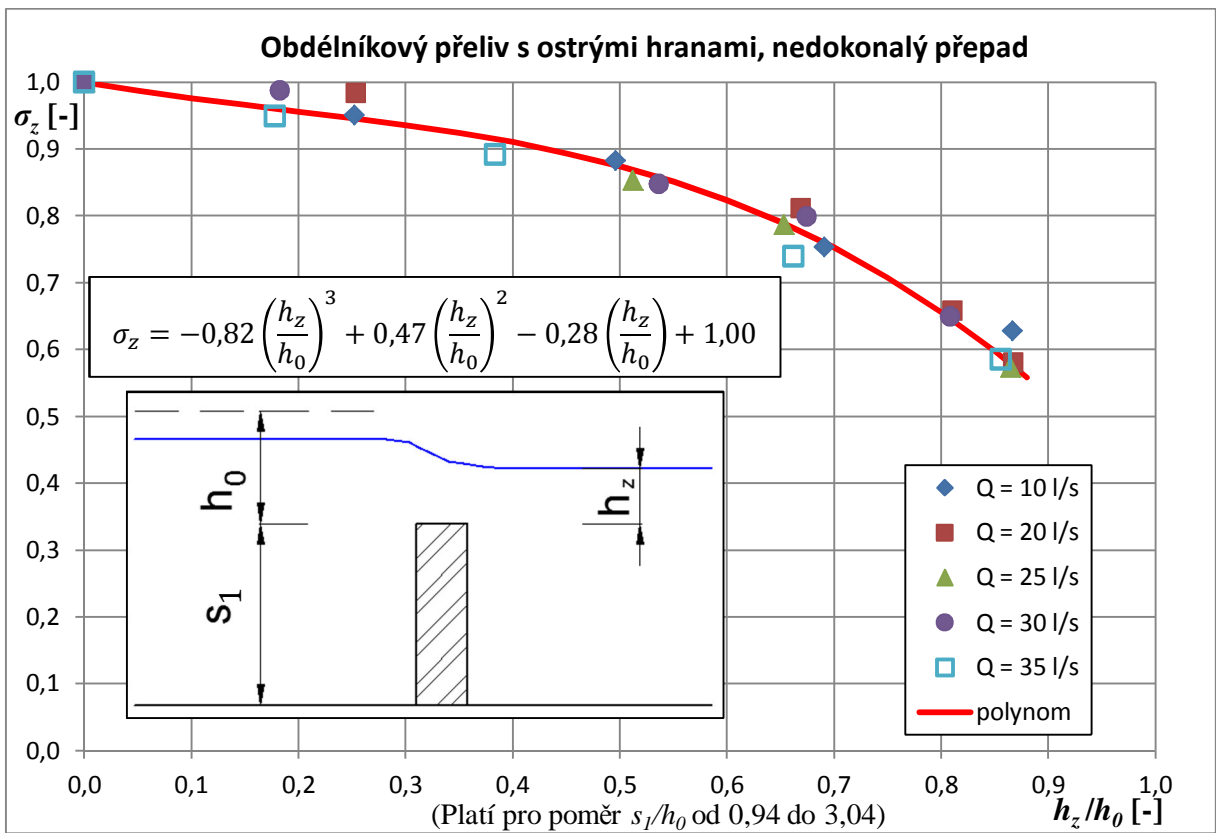
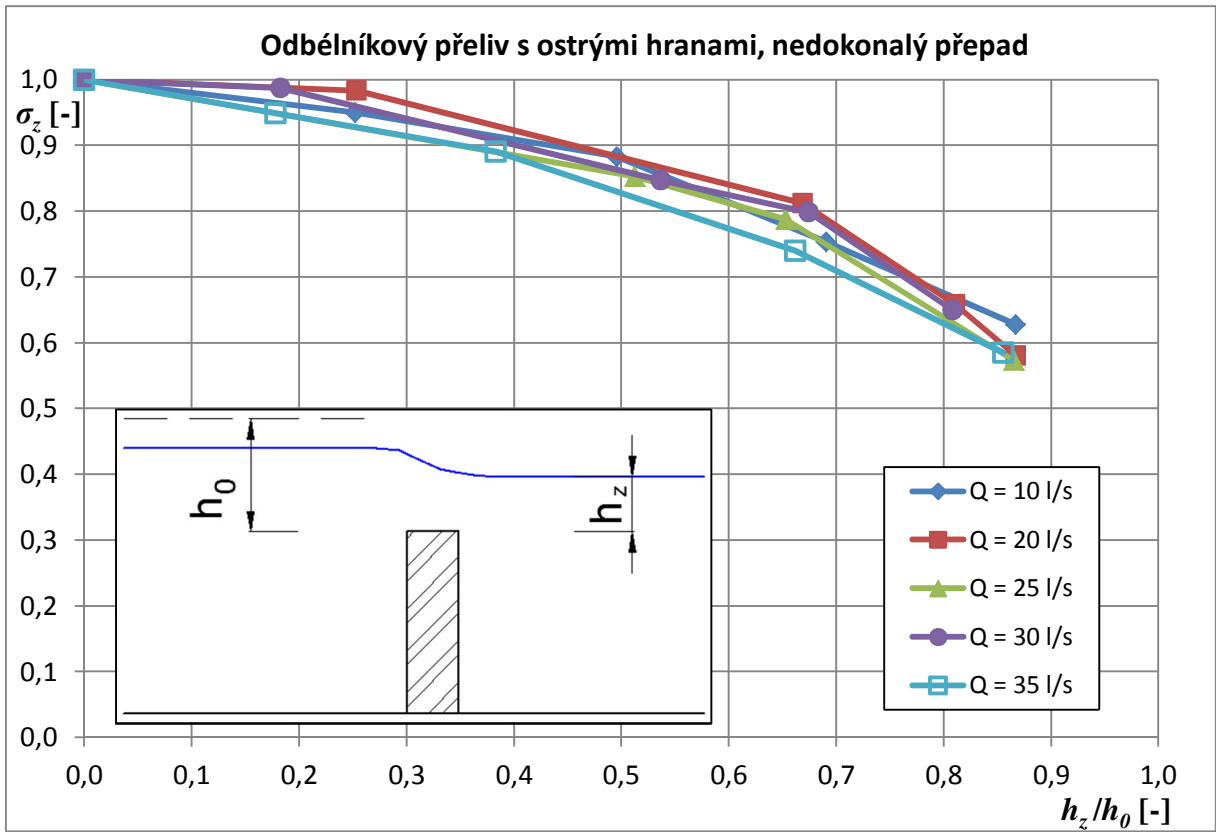
Obrázek 36 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 93 \text{ mm}$, $h_z = 57 \text{ mm}$



Obrázek 37 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 109 \text{ mm}$, $h_z = 32 \text{ mm}$

9.2 Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu obdélníkového průřezu s ostrými hranami

Hodnoty součinitele přepadu získané modelovými zkouškami mají rostoucí průběh. Hodnoty m pro tento typ přelivu jsou odvozeny z tabulky (Tab. 1), zdroj [3], kde součinitel přepadu je závislý na poměru přepadové výšky a tloušťky přelivu. Tyto hodnoty m je tedy třeba dle poměru h/t interpolovat. V jiných případech by mohlo dojít ke skokovým změnám hodnot m dle změny intervalu poměru h/t . Největší rozdíl přepadového součinitele m , který byl dosažen mezi hodnotami získanými z měření na modelu a z (Tab. 1) činí 0,063 (tj. 13 %), nejnižší 0,023 (tj. 6 %).

Důvodem takovéto rozdílnosti by mohly být například podmínky, při kterých byly prováděny zkoušky, které byly podkladem pro vytvoření této tabulky, závislosti m na poměru h/t .

Hodnoty přepadového součinitele m , které vyplývají z našich zkoušek, byly porovnány s hodnotami, které byly vypočteny pro ostrohranný tenkostěnný přeliv, tyto hodnoty m pro ostrohranný tenkostěnný vycházejí nižší. To je způsobeno skutečností, že odvozený vztah pro tento druh přelivu (viz rovnice 11) uvažuje se zavzdušněním prostoru pod přepadovým paprskem (čímž dojde ke snížení kapacity přelivu). Odtržení přepadového paprsku od koruny přelivu bylo pozorováno během zkoušek v případě, kdy $Q = 35$ l/s (Obr. 41). Tento stav byl však nepřesně zaměřen a z toho důvodu byl z grafického vyhodnocení vypuštěn.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,05 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,24 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,19. \quad (34)$$

Ovlivnění přepadu polohou hladiny dolní vody je minimální ($\sigma_z > 0,9$) do překročení poměru h_z/h 0,3. Je možné říci, že průběh této závislosti je plynulý.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 je vyjádřena pomocí polynomu 3. stupně:

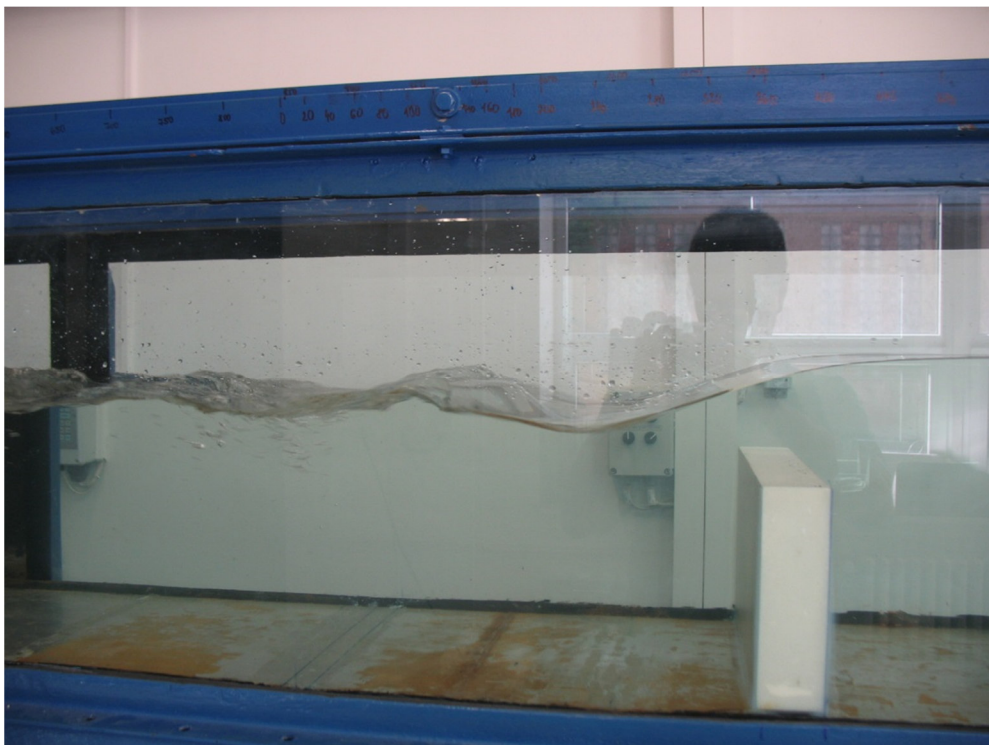
$$\sigma_z = -0,82 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 0,47 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,28 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (35)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 0,94 do 3,04.

Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší, než hodnoty σ_z , které vyplývají z našich zkoušek (viz Příloha P2).



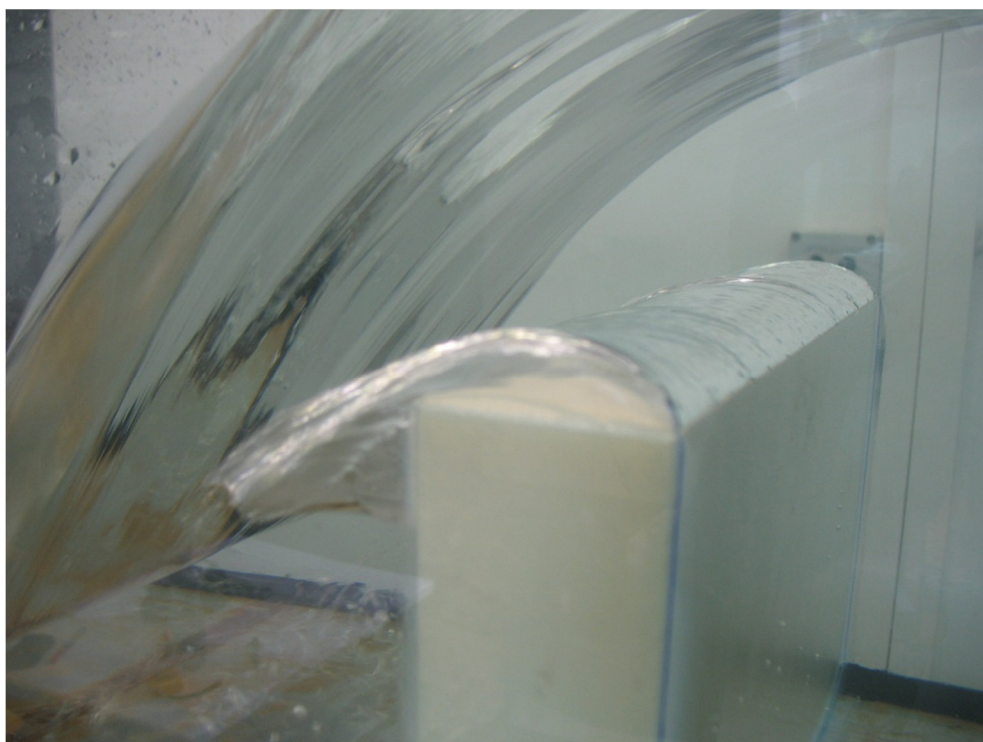
Obrázek 38 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 57 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 39 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 85 \text{ mm}$, $h_z = 22 \text{ mm}$

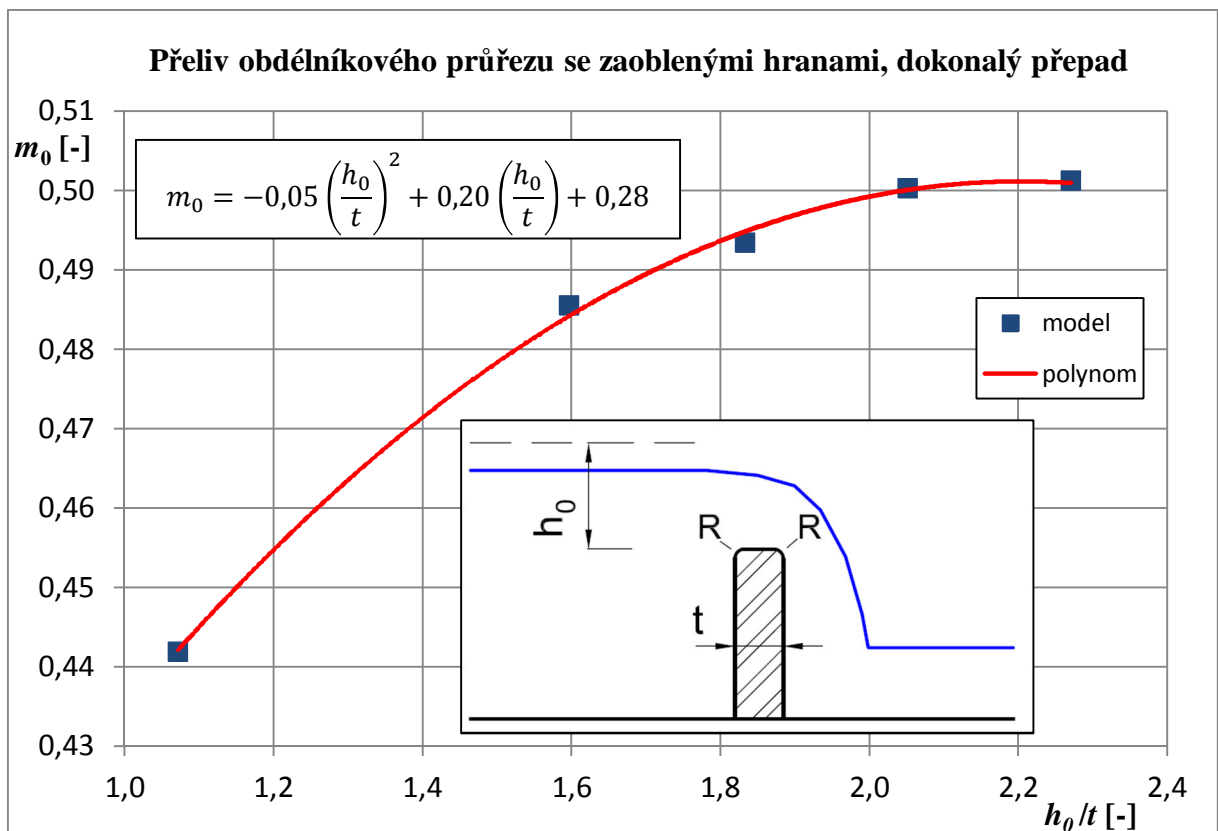
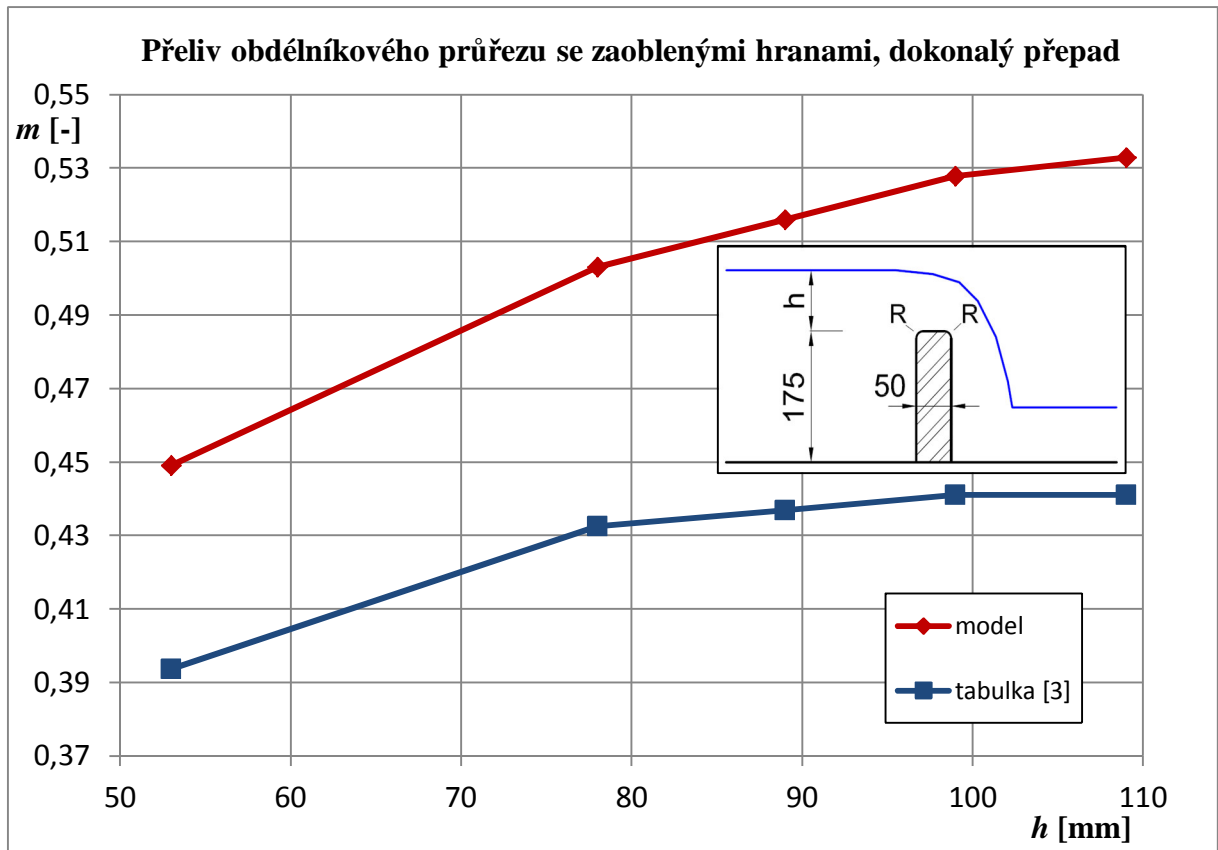


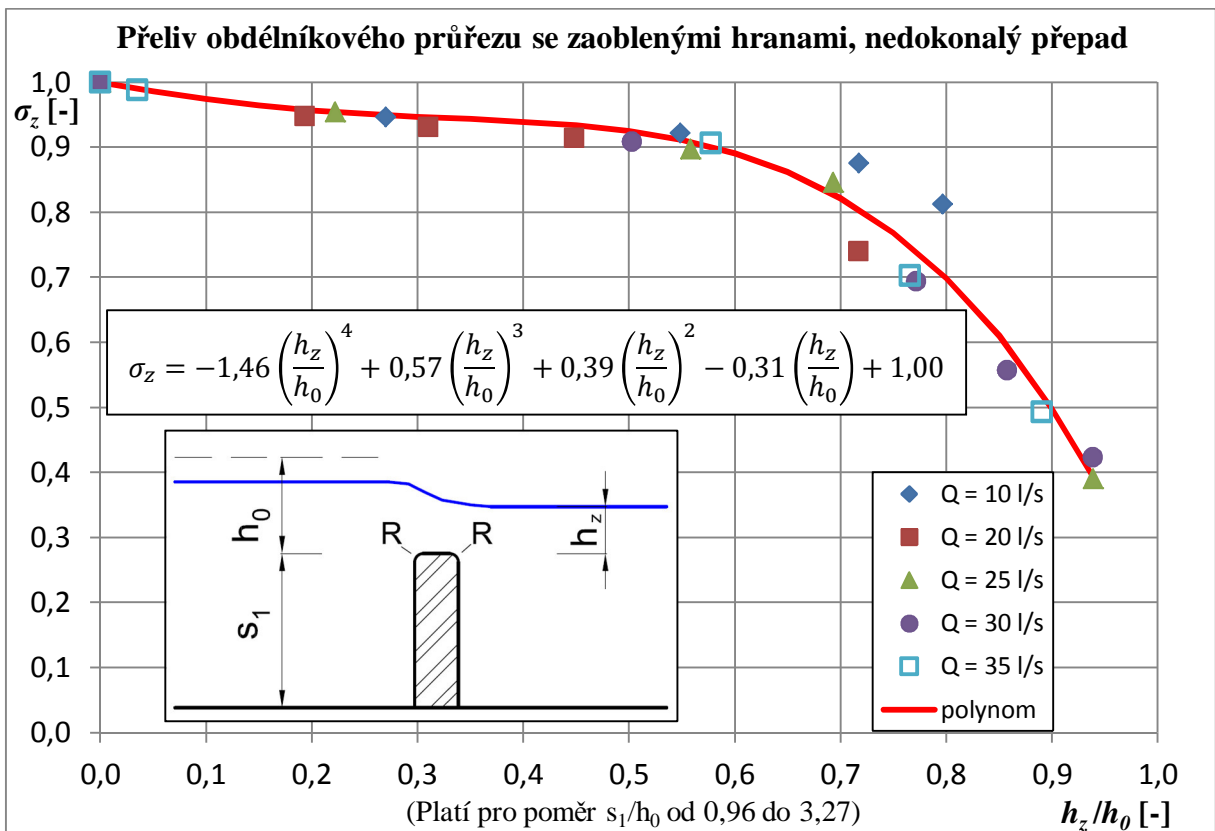
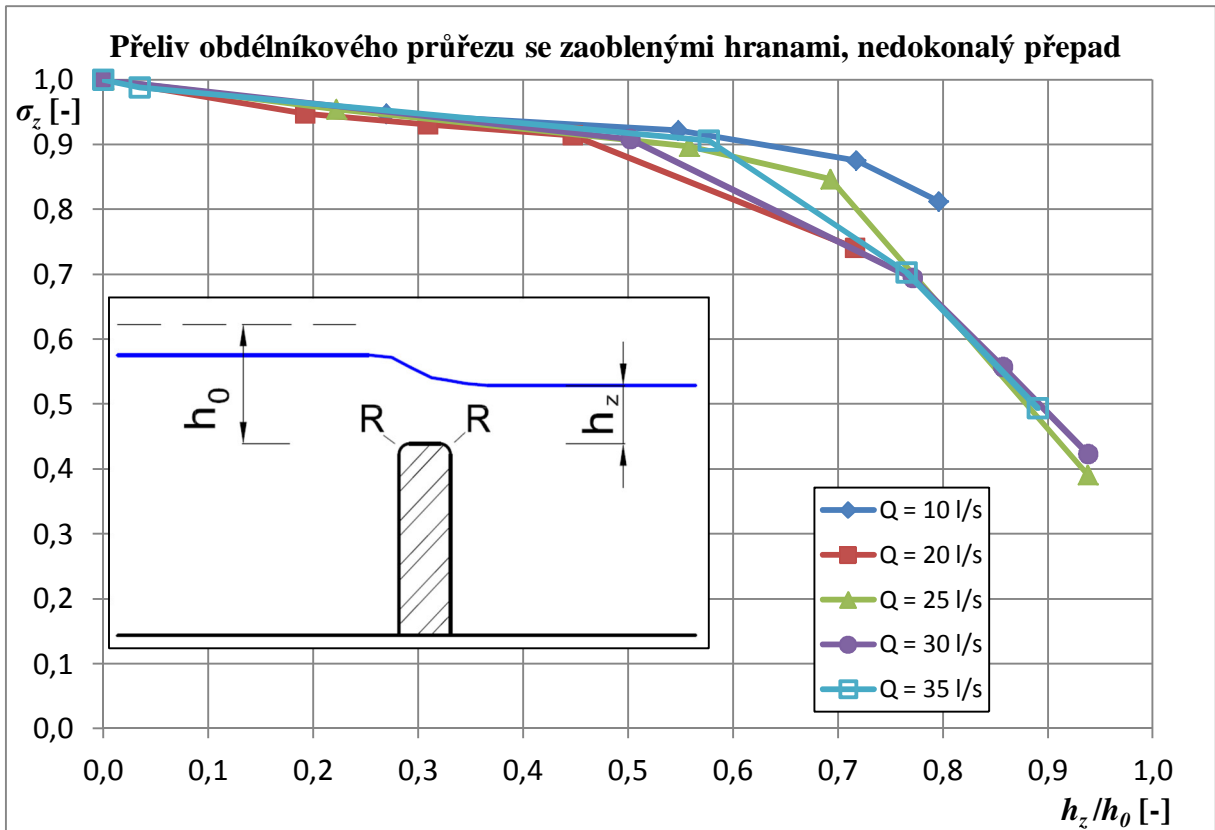
Obrázek 40 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 111 \text{ mm}$, $h_z = 74 \text{ mm}$



Obrázek 41 - $Q = 35 \text{ l/s}$, odtržení přepadového paprsku od koruny přelivu

9.3 Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami

Z grafického vyhodnocení výsledků měření na modelu je patrné, že výsledky získané z měření na modelu a z tabulky (Tab. 1) mají stejný trend. Avšak hodnoty m z modelových zkoušek mají vyšší hodnoty než výsledky určené dle Tab. 1. Nejvyšší rozdíl mezi výsledky činí 0,092 (tj. 17 %), nejnižší 0,055 (tj. 12 %).

Jak vyplývá z [3], díky zaoblení návodní hrany lze navýšit hodnoty součinitele přepadu, získané z tabulky, o 5 %. Zaoblení návodní hrany rovněž způsobilo to, že při stavu kdy $t < 0,67h$, nedošlo k odtržení paprsku od návodní hrany.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,05 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,20 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,28. \quad (36)$$

Při postupném zatápění přelivu dolní vodou až do hodnoty h_z/h 0,5 je ovlivnění minimální ($\sigma_z = 1$ až 0,9). Při rostoucím poměru hloubky zatopení a přepadové výšky dochází k prudkému růstu vlivu součinitele zatopení.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 4. stupně:

$$\sigma_z = -1,46 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^4 + 0,57 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 0,39 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,31 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (37)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 0,96 do 3,27.

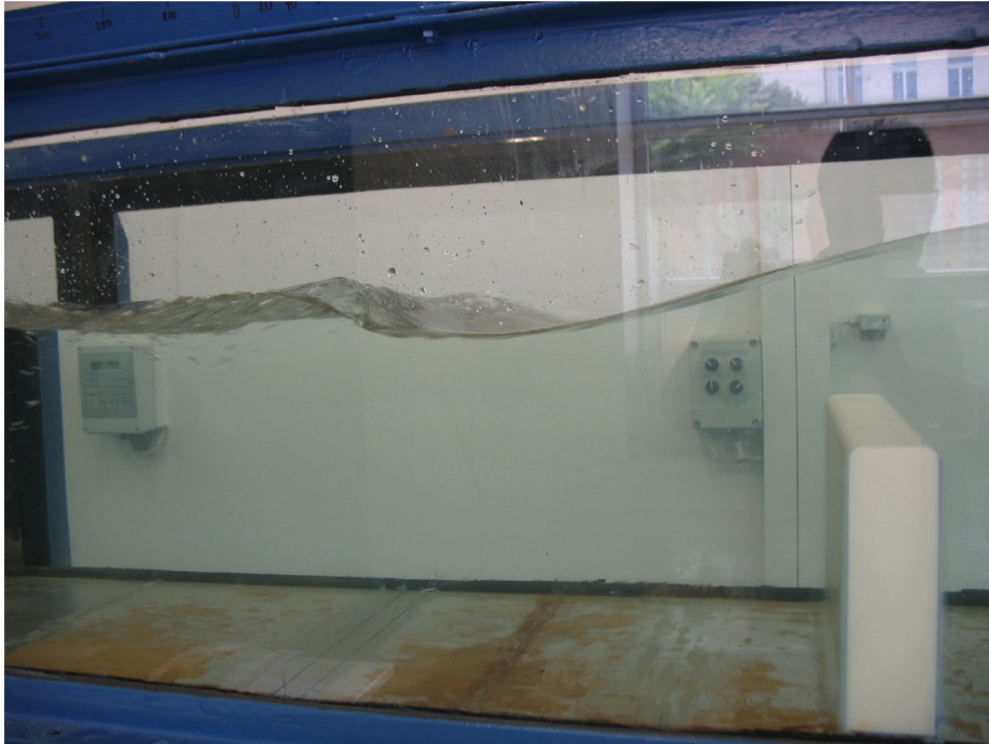
Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší, než hodnoty σ_z , které jsme si vypočítali, řádově o min 0,05 (viz Příloha P3).



Obrázek 42 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 53 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 43 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 83 \text{ mm}$, $h_z = 38 \text{ mm}$

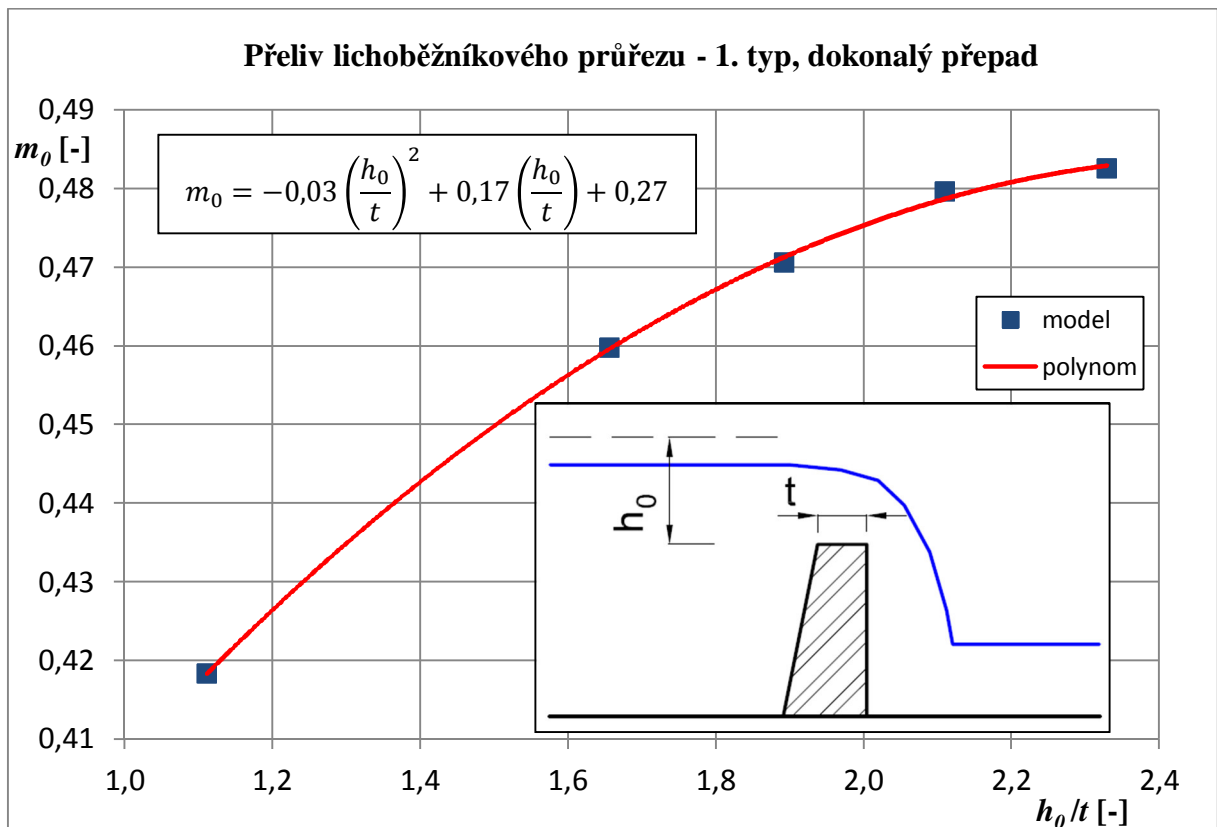
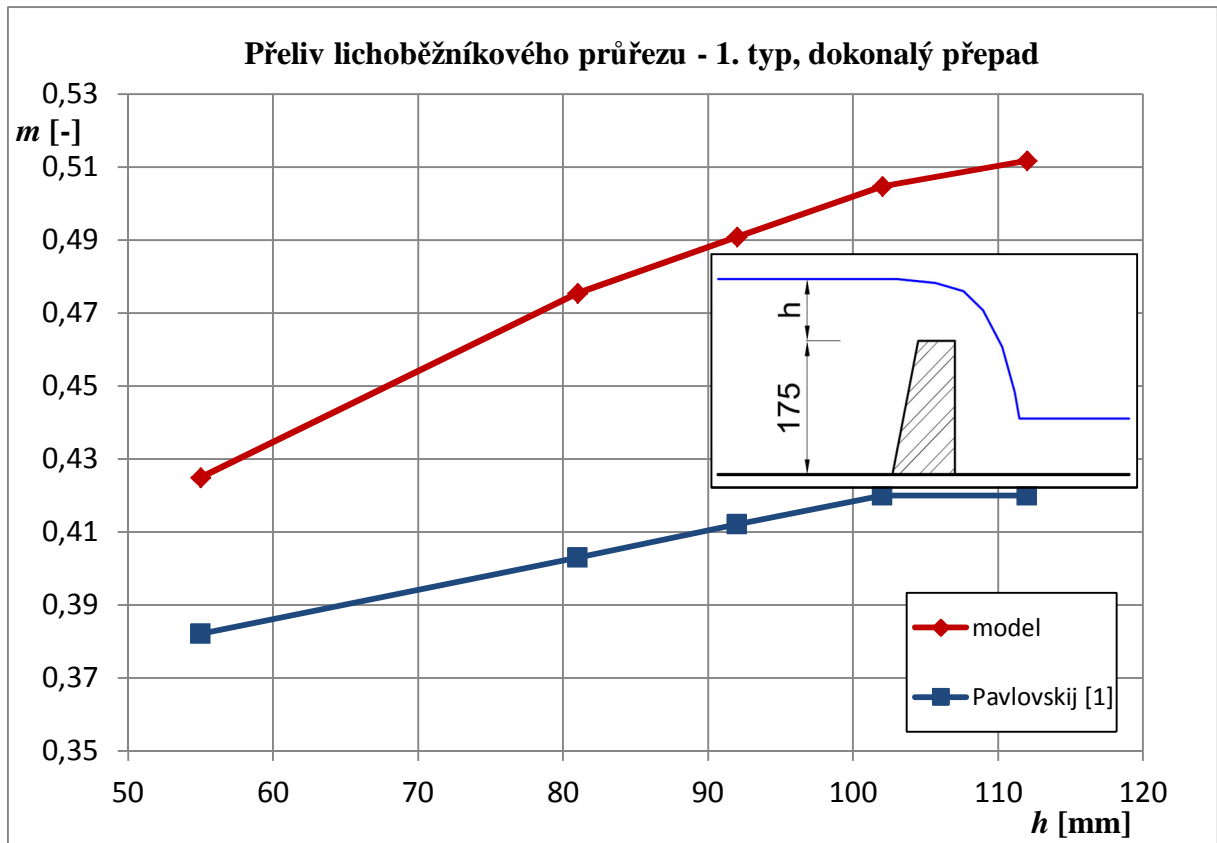


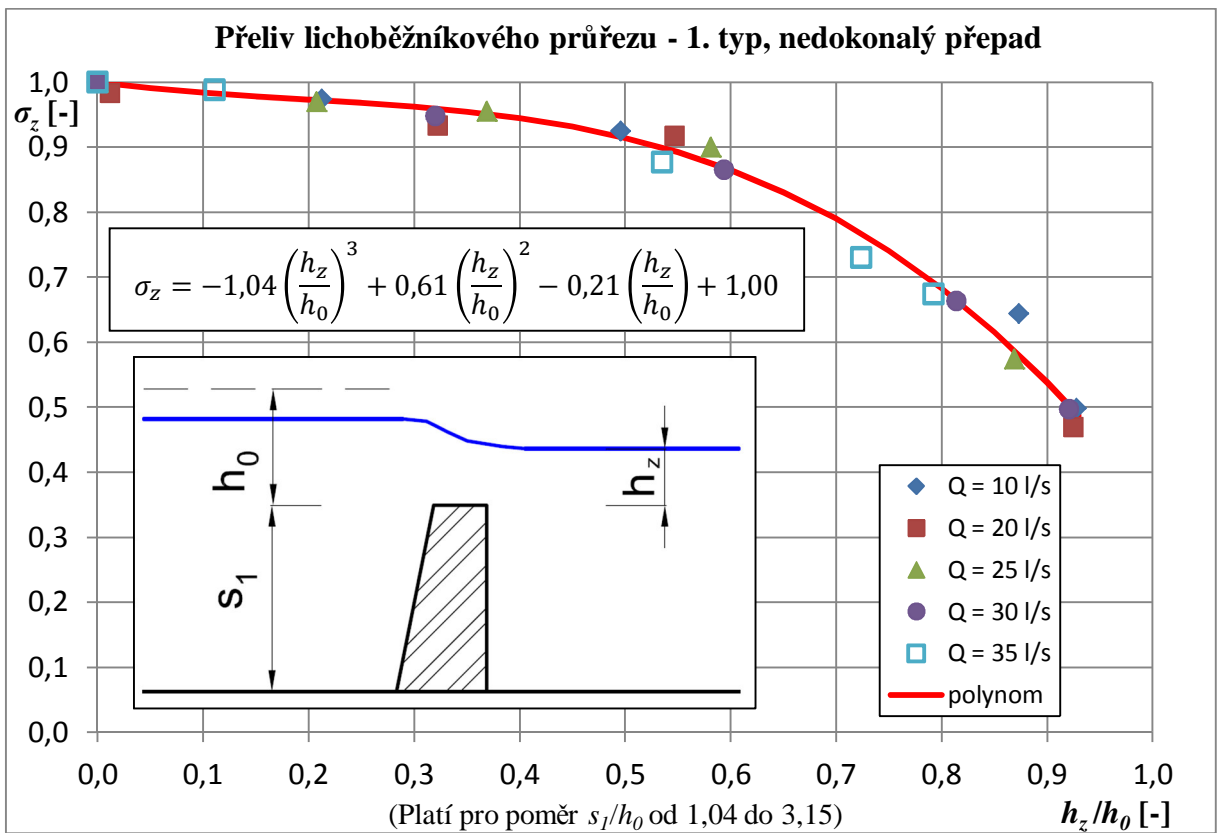
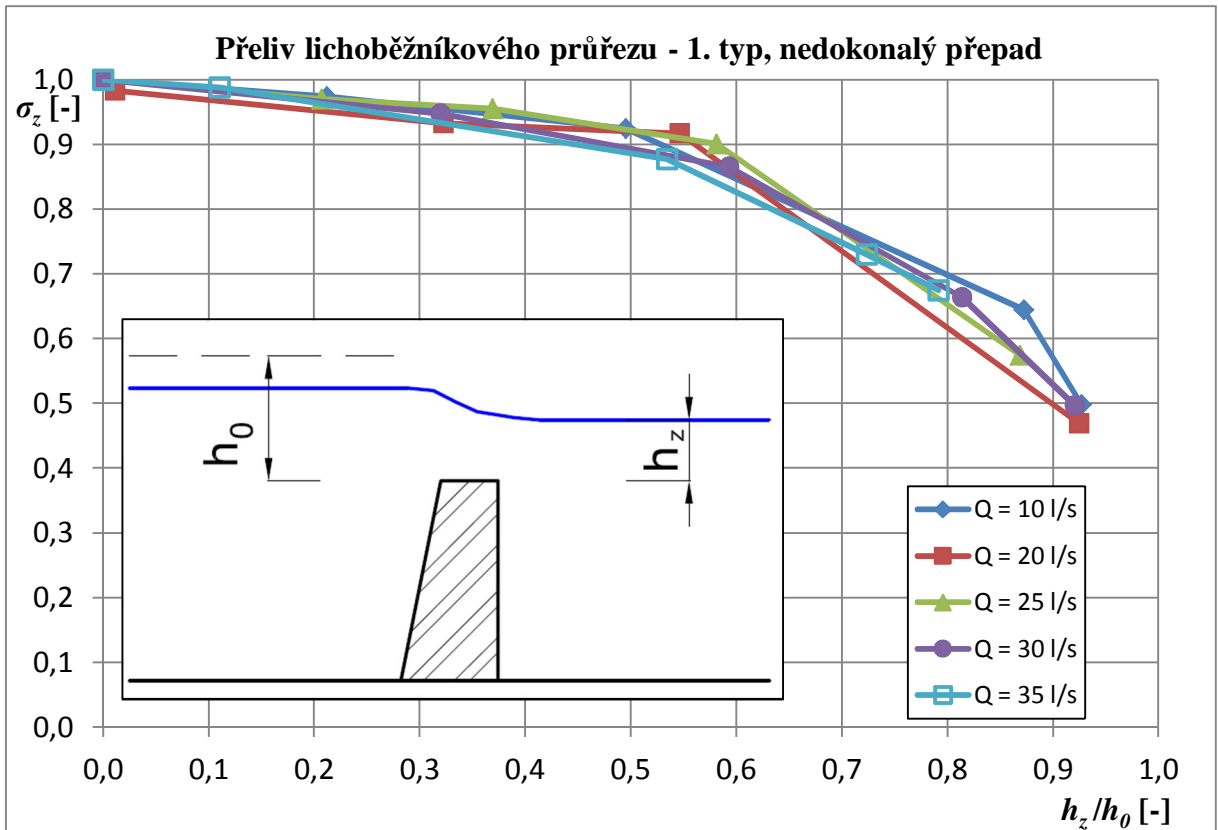
Obrázek 44 - $Q = 30 \text{ l/s}$, $h = 128 \text{ mm}$, $h_z = 101 \text{ mm}$



Obrázek 45 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 109 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$

9.4 Přebiv lichoběžníkového průřezu - 1. typ





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu lichoběžníkového průřezu - 1. typ

Z grafického vyhodnocení výstupů zkoušek a hodnot získanými dle Pavlovského tabulky [1] (Tab. 2) je patrné, že se hodnoty neshodují. Nejnižší rozdíl hodnot součinitelů přepadu činí 0,043 (tj. 10 %), nejvyšší 0,092 (tj. 17 %), což je velký rozdíl. Tento rozdíl by mohl být způsobený například podmínkami, při kterých Pavlovskij prováděl pokusy, z jejichž výstupů nakonec sestavil tabulku pro určení součinitele přepadu.

Hodnoty součinitele přepadu získané z měření na modelu mají rostoucí charakter. Součinitelé přepadu určené pro jednotlivé Q pomocí Pavlovského tabulky [1] rovněž. Ale při $Q = 30$ l/s a $Q = 35$ l/s nabývá m přibližně stejných hodnot.

V žádném z nastavených stavů nedošlo k odtržení paprsku od koruny přelivu (což by bylo očekávatelné, díky podobnosti s obdélníkovým přelivem s ostrými hranami).

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,03 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,17 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,27. \quad (38)$$

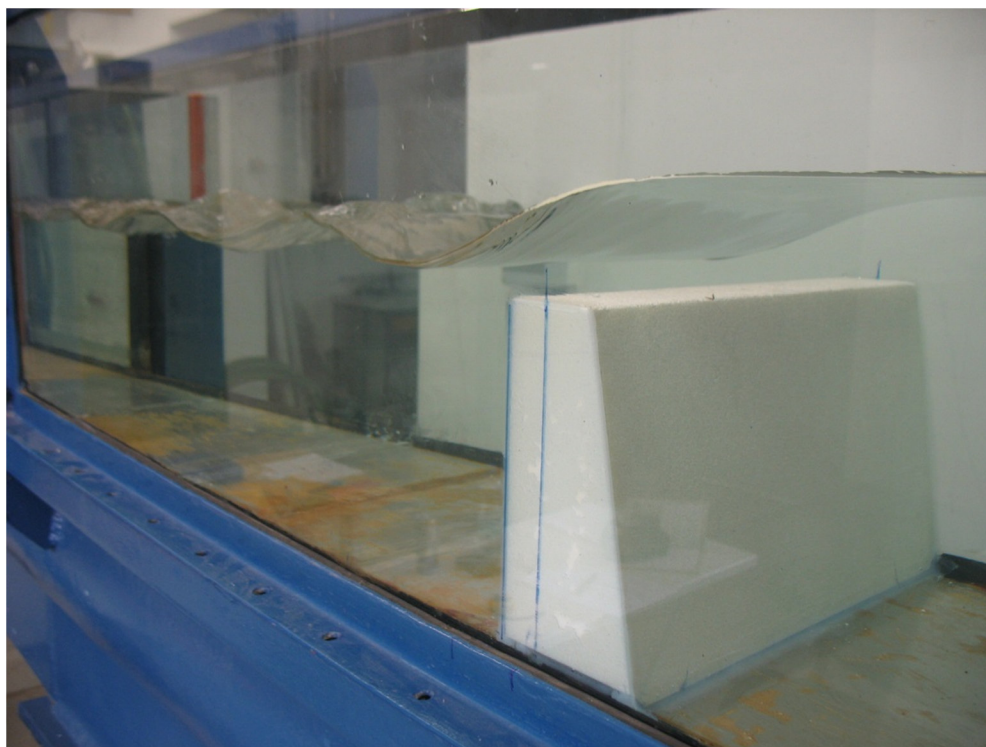
Počátky velkého ovlivnění přepadu, díky úrovni dolní hladiny se začnou projevovat při překročení poměru $h_z/h = 0,4$ ($\sigma_z = 0,9$).

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 3. stupně:

$$\sigma_z = -1,04 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 0,61 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,21 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (39)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 1,04 do 3,15.

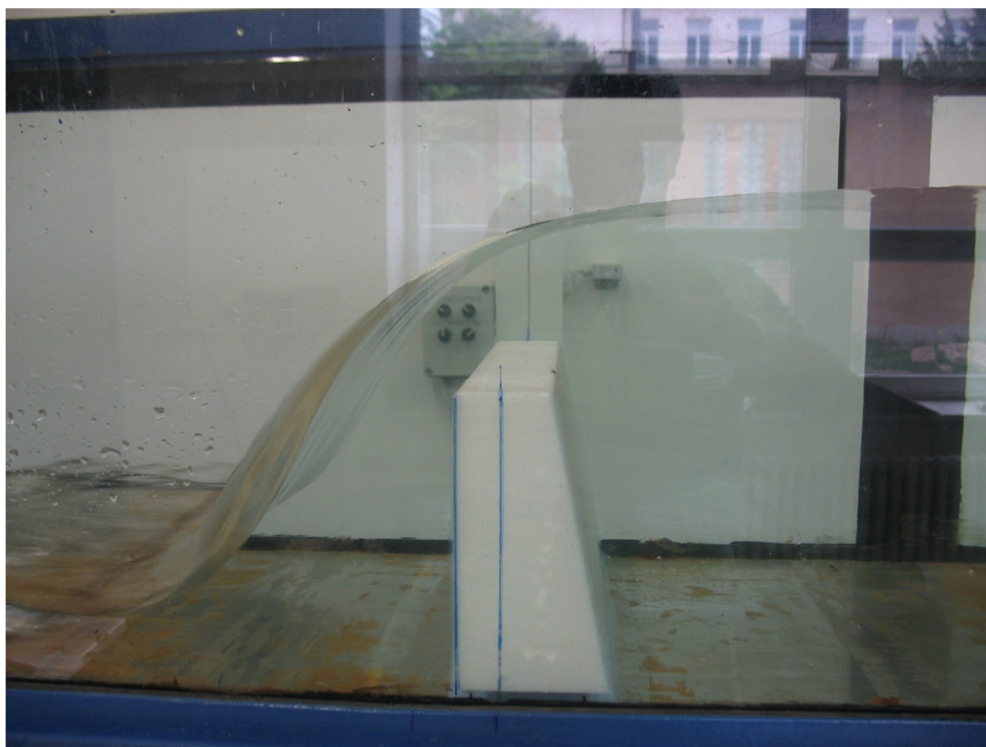
Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší, než hodnoty σ_z , které jsme vypočítali (viz Příloha P4). Shodu lze najít v posledních stavech, kdy byl přepad velmi ovlivněn (např. $Q = 20$ l/s). Avšak tuto shodu je nutno brát s rezervou, protože přesnější určení $\sigma_{z1} < 0,5$ z grafu je nemožné. Se zvyšujícím se Q rostou rozdíly mezi σ_z a σ_{z1} .



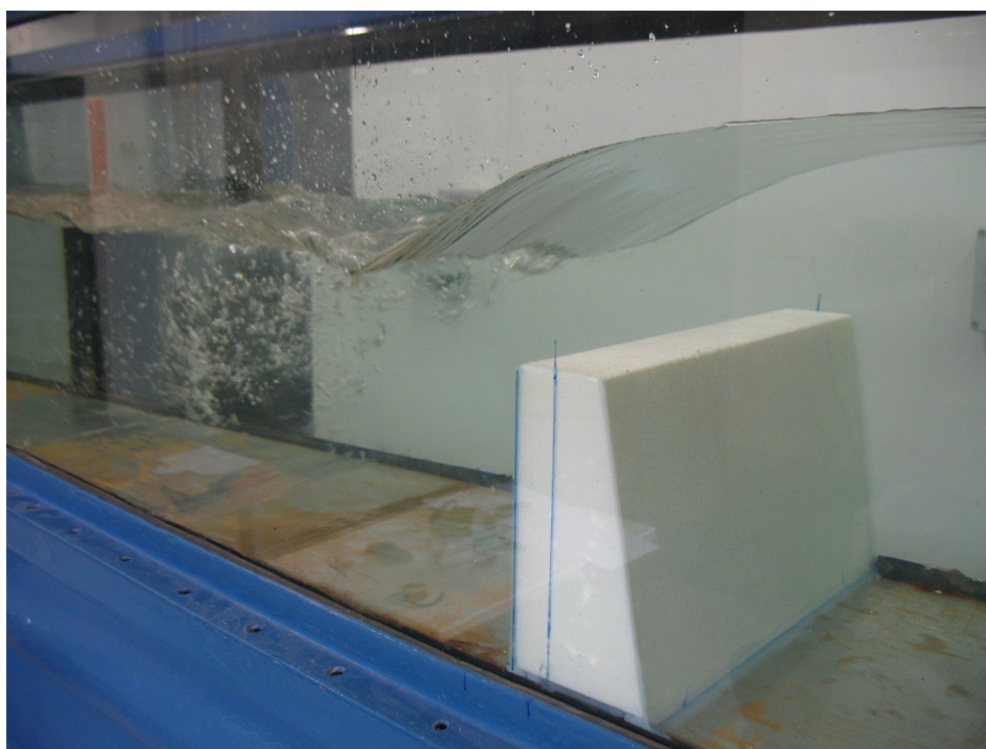
Obrázek 46 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 58 \text{ mm}$, $h_z = 29 \text{ mm}$



Obrázek 47 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 81 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$

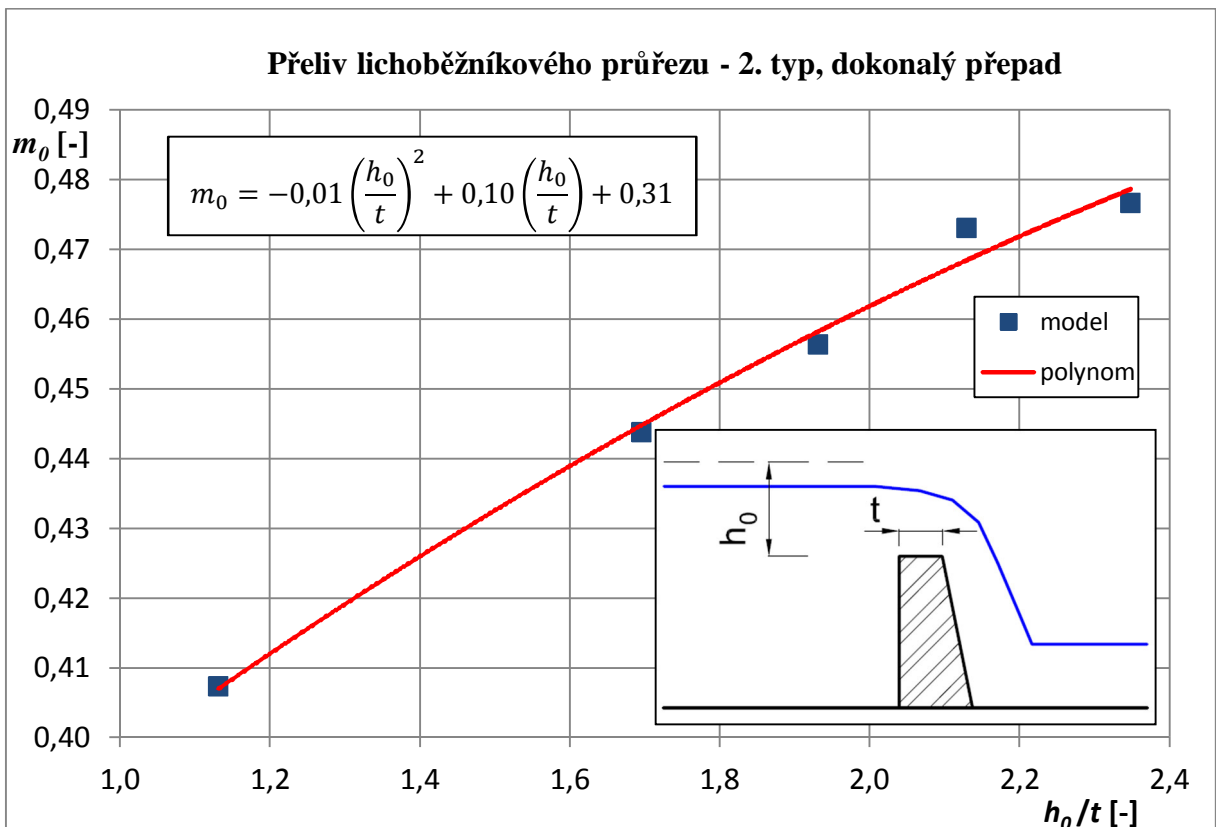
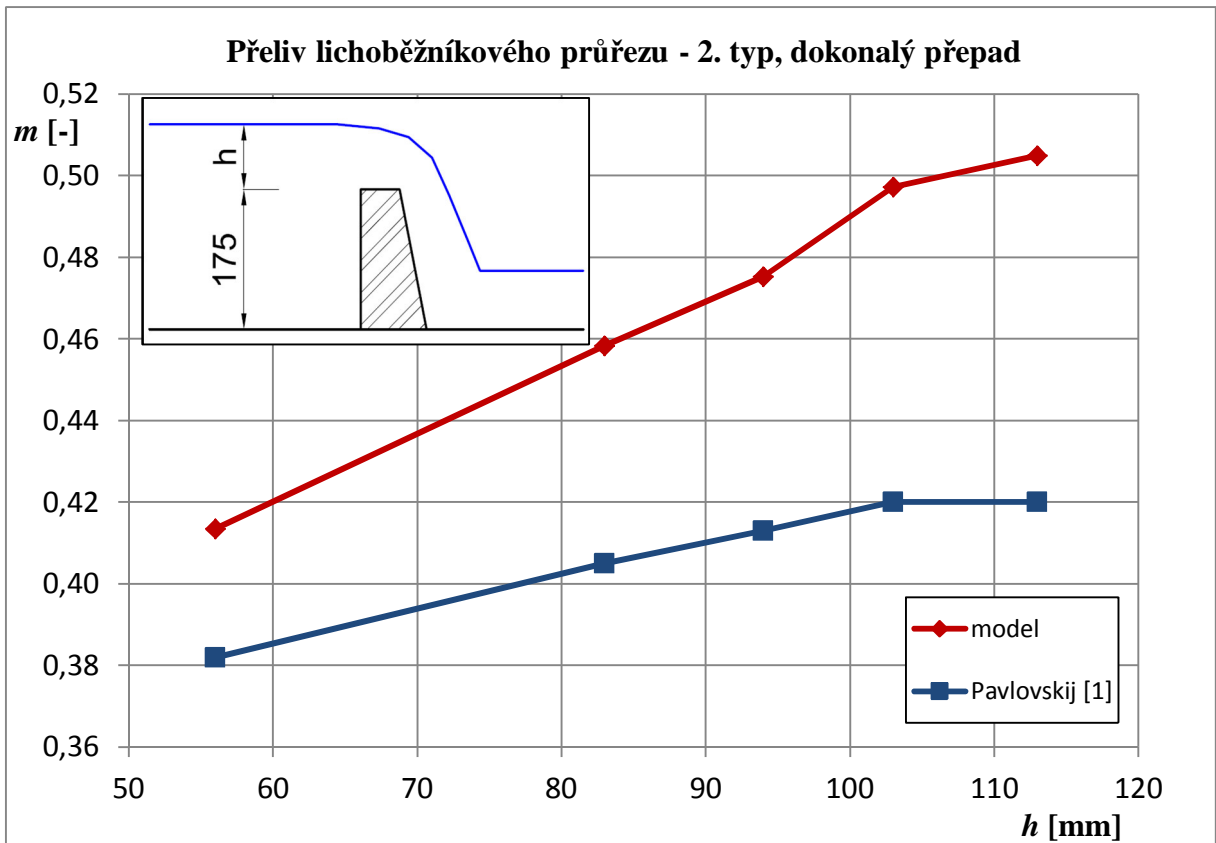


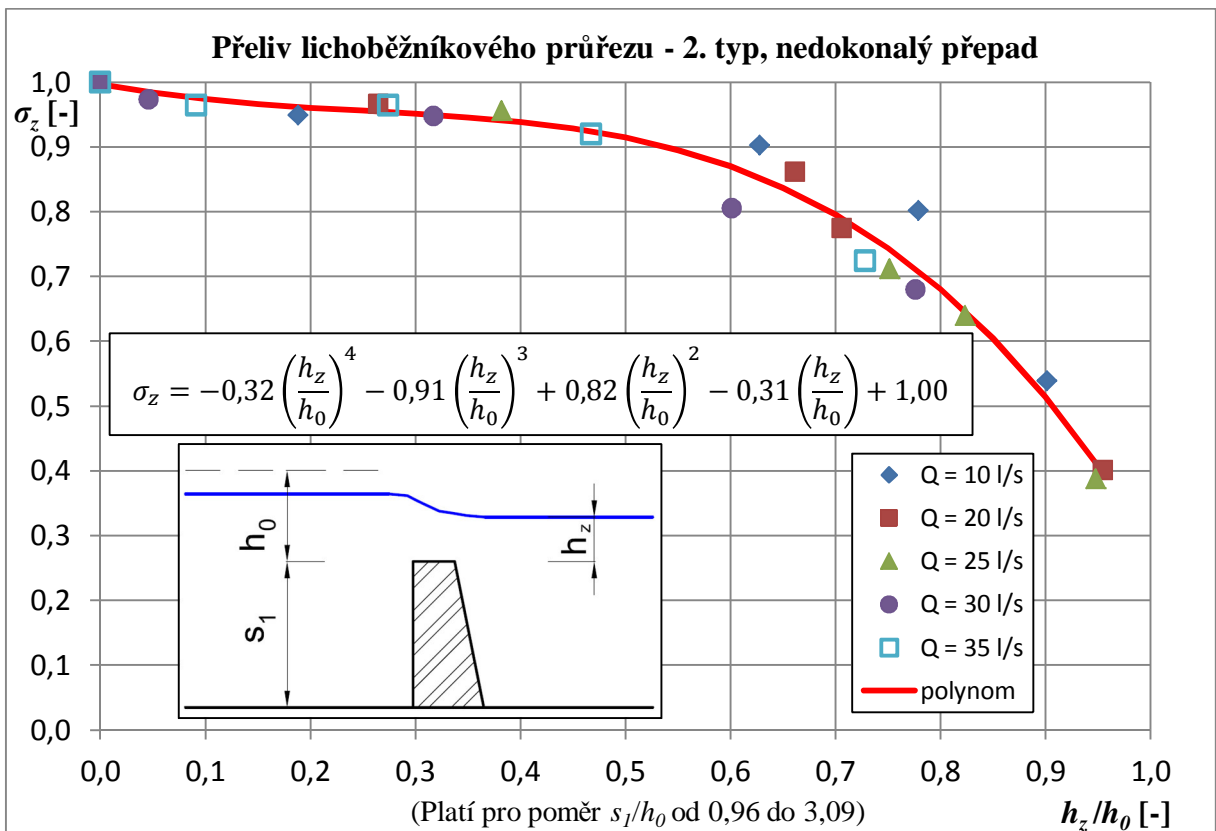
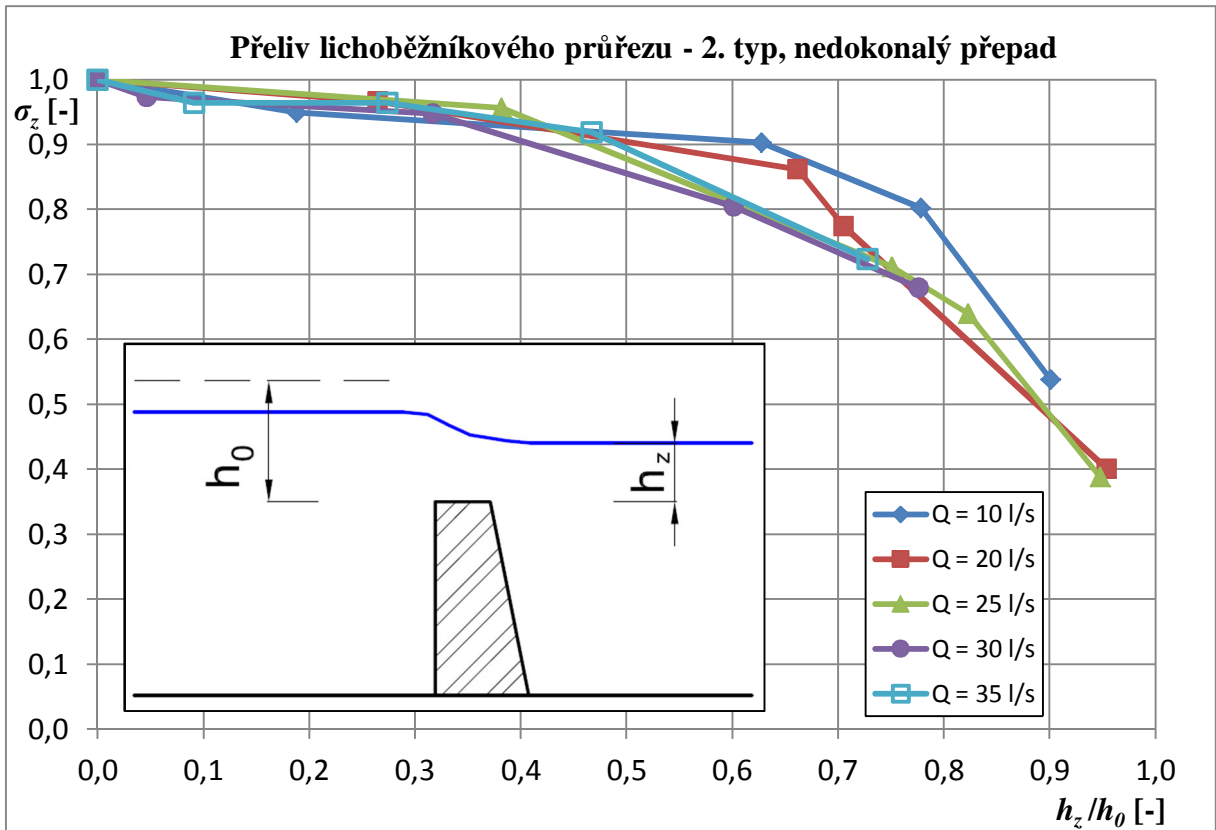
Obrázek 48 - $Q = 30 \text{ l/s}$, $h = 102 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 49 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 123 \text{ mm}$, $h_z = 68 \text{ mm}$

9.5 Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu lichoběžníkového průřezu - 2. typ

Graf závislostí z měření na modelu přelivu a hodnot získaných dle Pavlovského tabulky [1] (Tab. 2) nám opět ukazuje rozdílnost. Důvody rozdílnosti jsou zřejmě stejné jako při předcházejícím typu přelivu. Největší rozdíl mezi hodnotami činí 0,085 (tj. 17 %), nejnižší činí 0,031 (tj. 8 %).

Je možné předpokládat, že tento typ přelivu by mohl být hydraulicky vhodnější než např. obdélníkový přeliv s ostrými hranami (díky skloněné vzdušní straně přelivu), což bude možné posoudit při závěrečném grafickém porovnání všech typů přelivů. Během provádění zkoušek na modelu přelivu nebyl pozorován stav, kdy by došlo k odtržení paprsku vody od koruny přelivu.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,01 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,10 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,31. \quad (40)$$

Závislost ovlivnění přepadu na poměru zatopení (h_z/h) má mírný průběh ($\sigma_z = 0,9$ při $h_z/h = 0,5$). Při zvětšování tohoto poměru dochází k plynulému snižování hodnoty součinitele zatopení a z toho důvodu pak k růstu ovlivnění přepadu.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 4. stupně:

$$\sigma_z = -0,32 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^4 - 0,91 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 0,82 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,31 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (41)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 0,96 do 3,09.

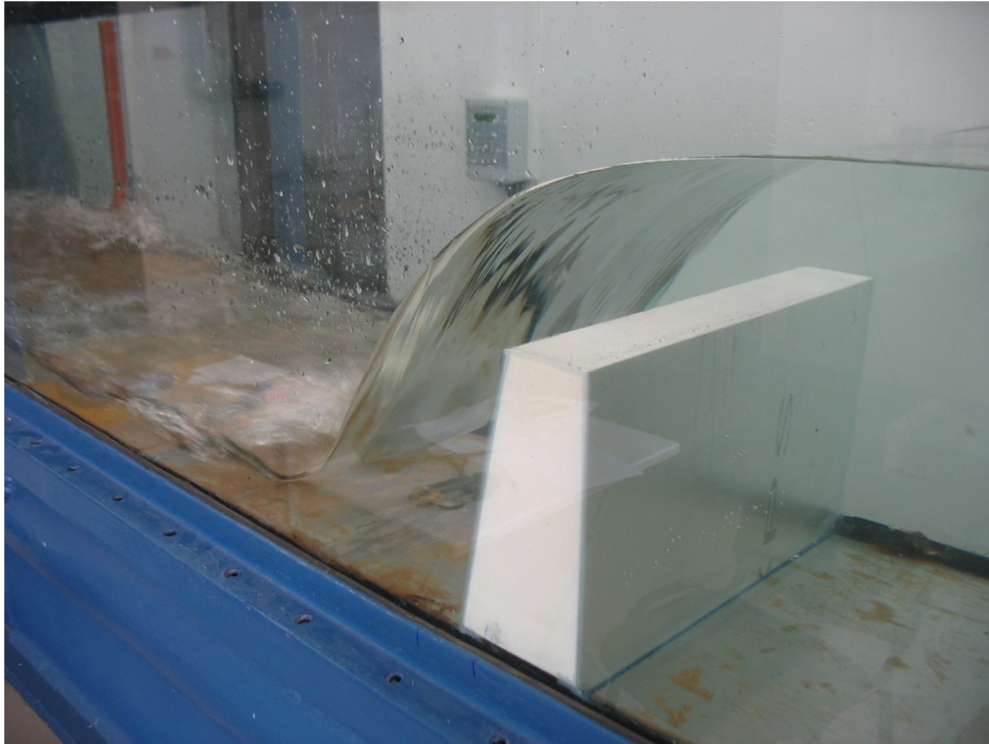
Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší, než hodnoty σ_z , které jsme vypočítali (viz Příloha P5). Shodu lze najít v posledních stavech, kdy byl přepad velmi ovlivněn (např. $Q = 10$ l/s). Avšak tuto shodu je nutno brát s rezervou, protože přesnější určení $\sigma_{z1} < 0,5$ z grafu je nemožné.



Obrázek 50 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 85 \text{ mm}$, $h_z = 23 \text{ mm}$



Obrázek 51 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 97 \text{ mm}$, $h_z = 38 \text{ mm}$

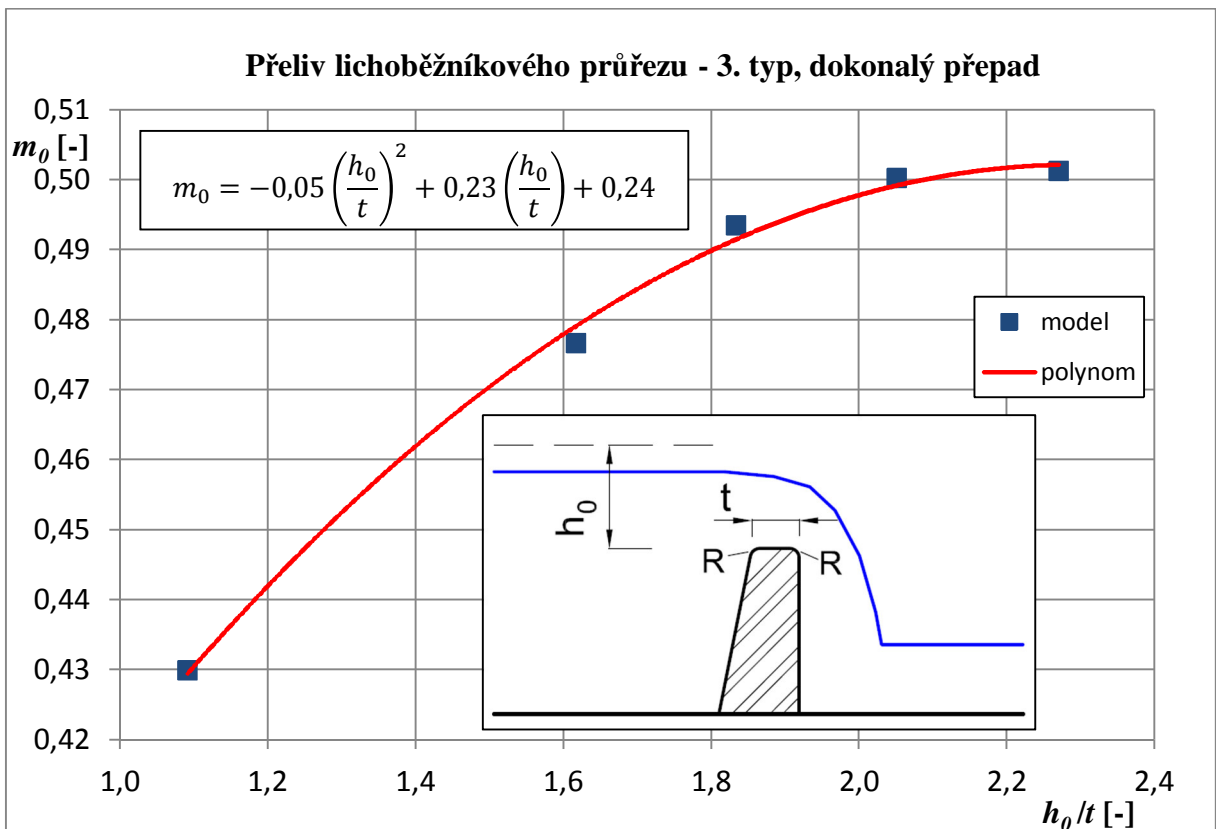
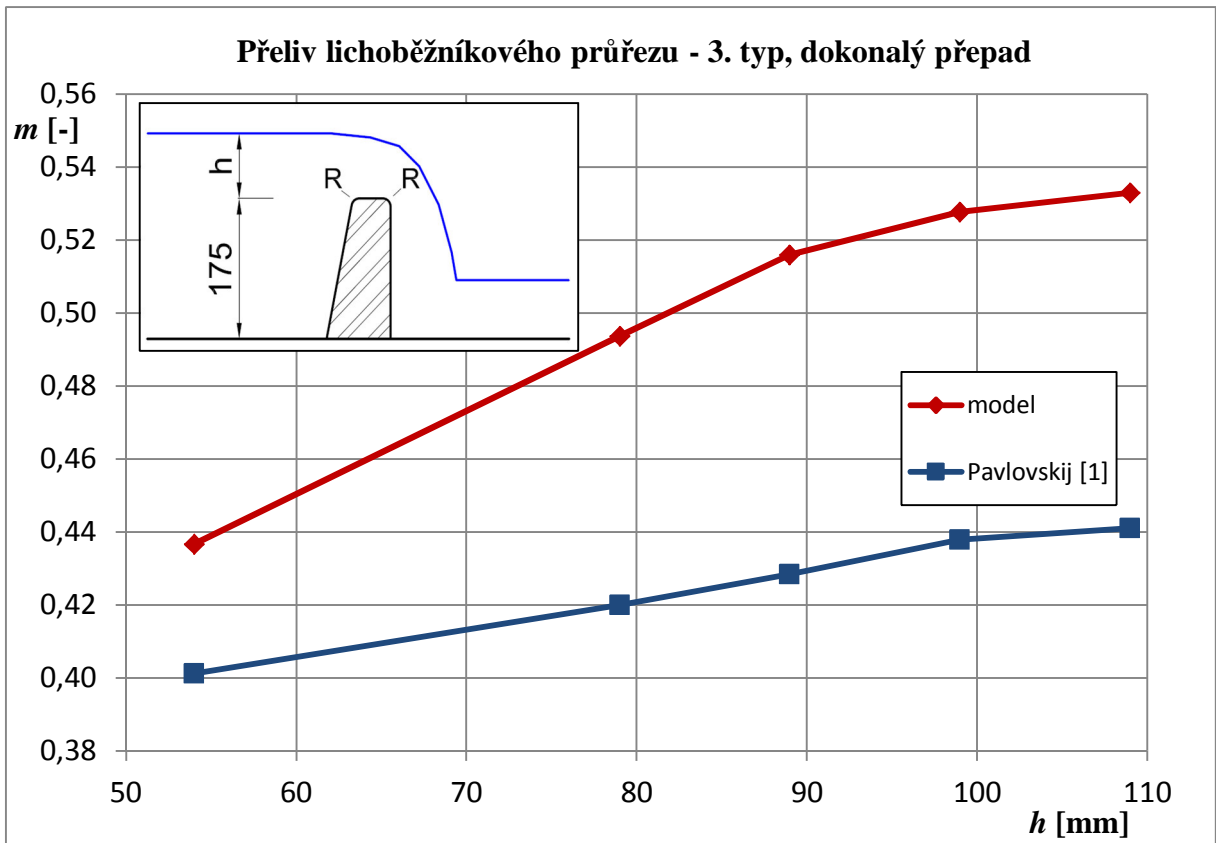


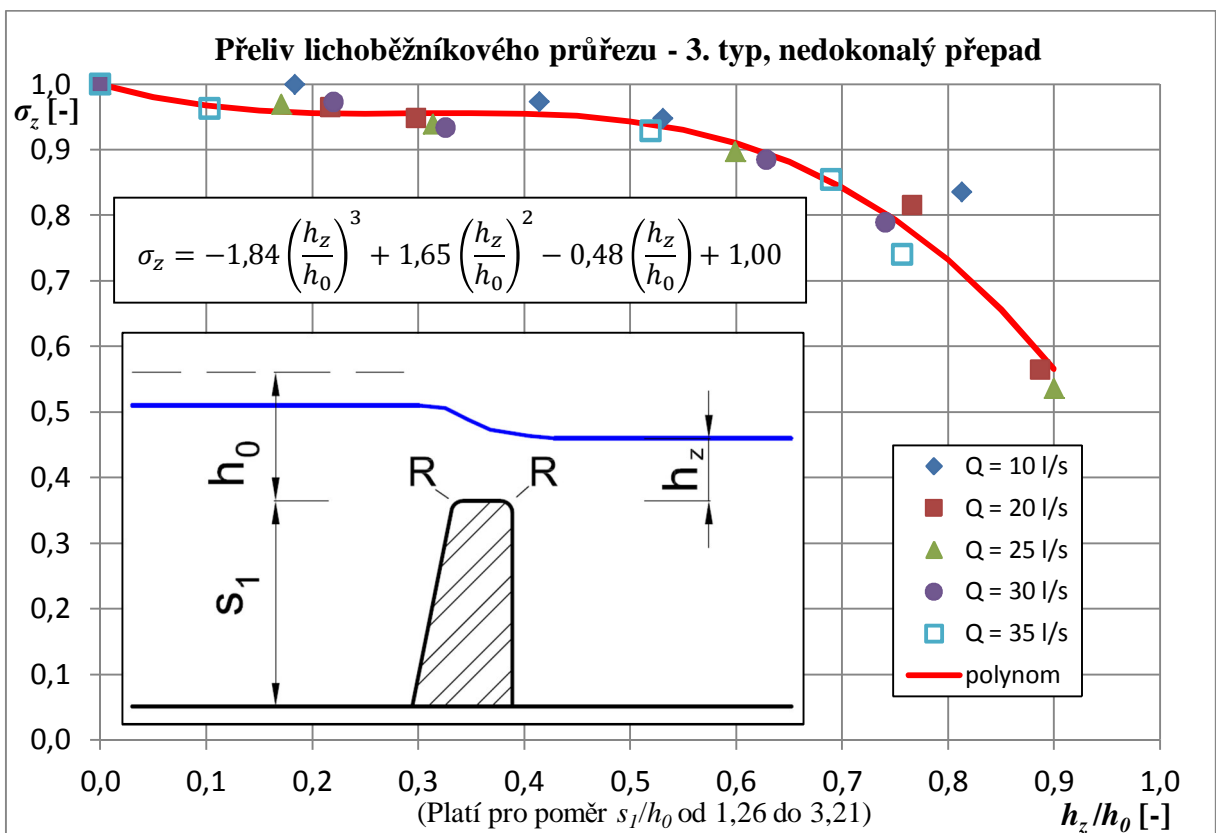
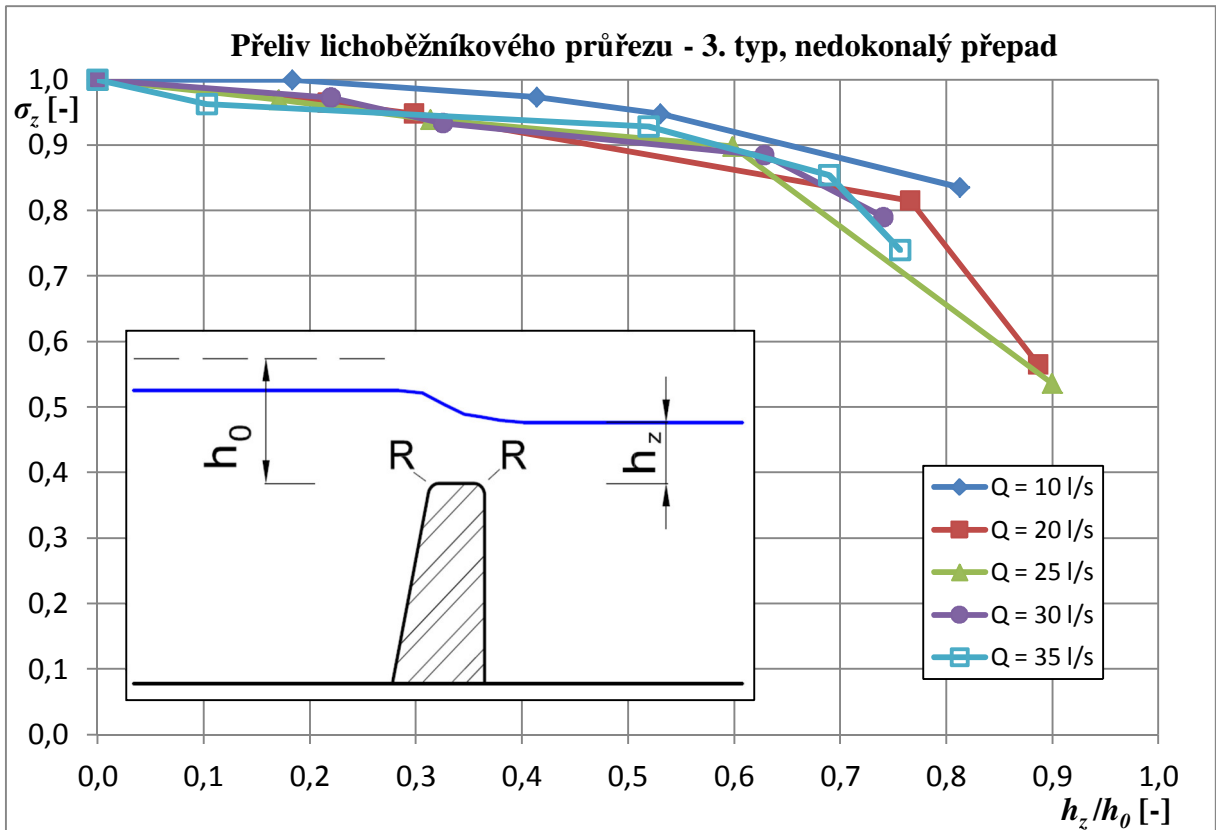
Obrázek 52 - $Q = 30 \text{ l/s}$, $h = 103 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 53 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 142 \text{ mm}$, $h_z = 106 \text{ mm}$

9.6 Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu lichoběžníkového průřezu - 3. typ

Grafické závislosti hodnot ze zkoušek a hodnot součinitele přepadu dle Pavlovského (Tab. 2) nemají shodu. Oba výsledky, které jsou představovány body a jejich spojnicemi, mají podobný trend. Výsledky z měření na modelu dosahují však vyšších hodnot. Růst hodnot získaných z Pavlovského tabulky [1] není tak strmý. Nejmenší rozdíl mezi hodnotami činí 0,036 (tj. 8 %), největší rozdíl je 0,092 (tj. 17 %).

Zaoblení hran tohoto přelivu nám umožňuje dle [1] navýšit hodnoty součinitelů přepadů dle Pavlovského tabulky o 5 %.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,05 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,23 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,24. \quad (42)$$

Trend ovlivnění přepadu na poměru zatopení je vcelku plynulý až do hodnoty poměru $h_z/h = 0,6$. Při překročení tohoto poměru dojde k růstu ovlivnění přepadu (dochází ke snižování σ_z).

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 3. stupně:

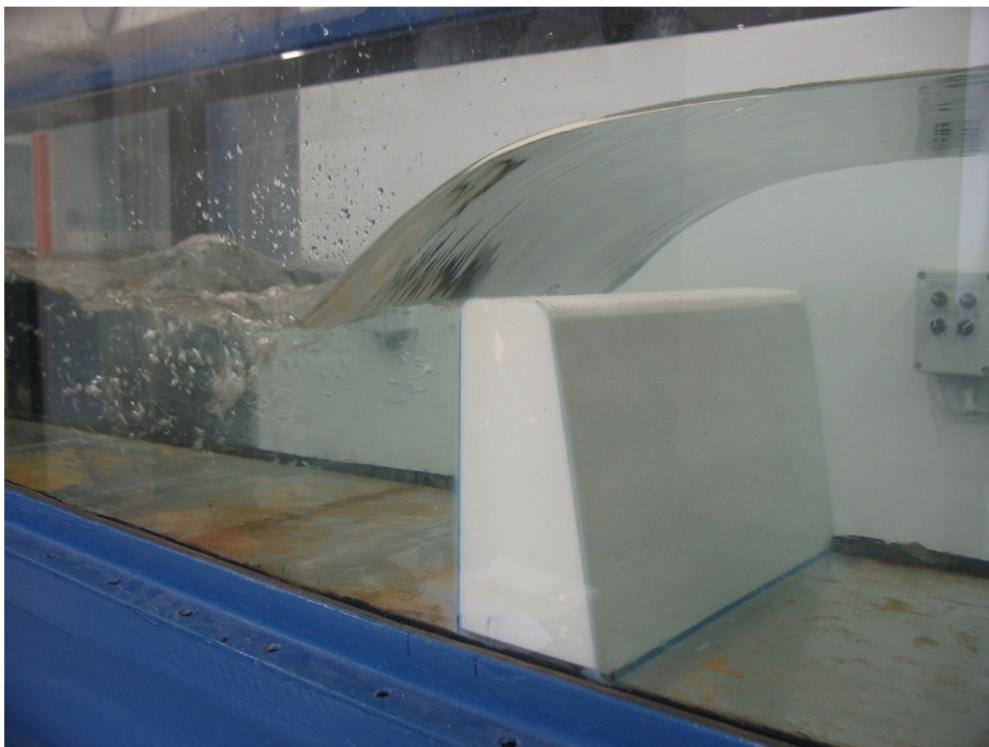
$$\sigma_z = -1,84 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 1,65 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,48 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (43)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 1,26 do 3,21.

Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší (viz Příloha P6), než hodnoty σ_z , které jsme si vypočítali. Přibližnou shodu lze najít v případě, kdy $Q = (10;20)$ l/s.



Obrázek 54 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 54 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 55 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 91 \text{ mm}$, $h_z = 16 \text{ mm}$

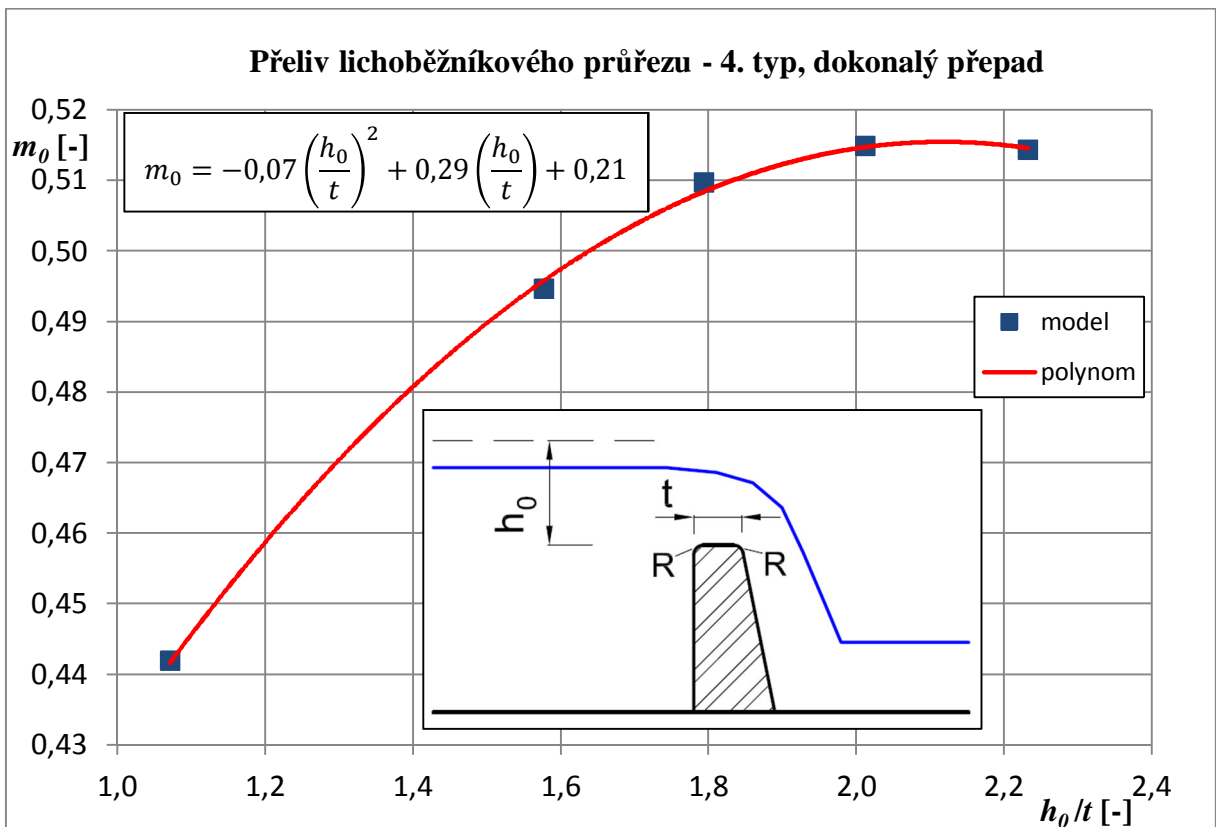
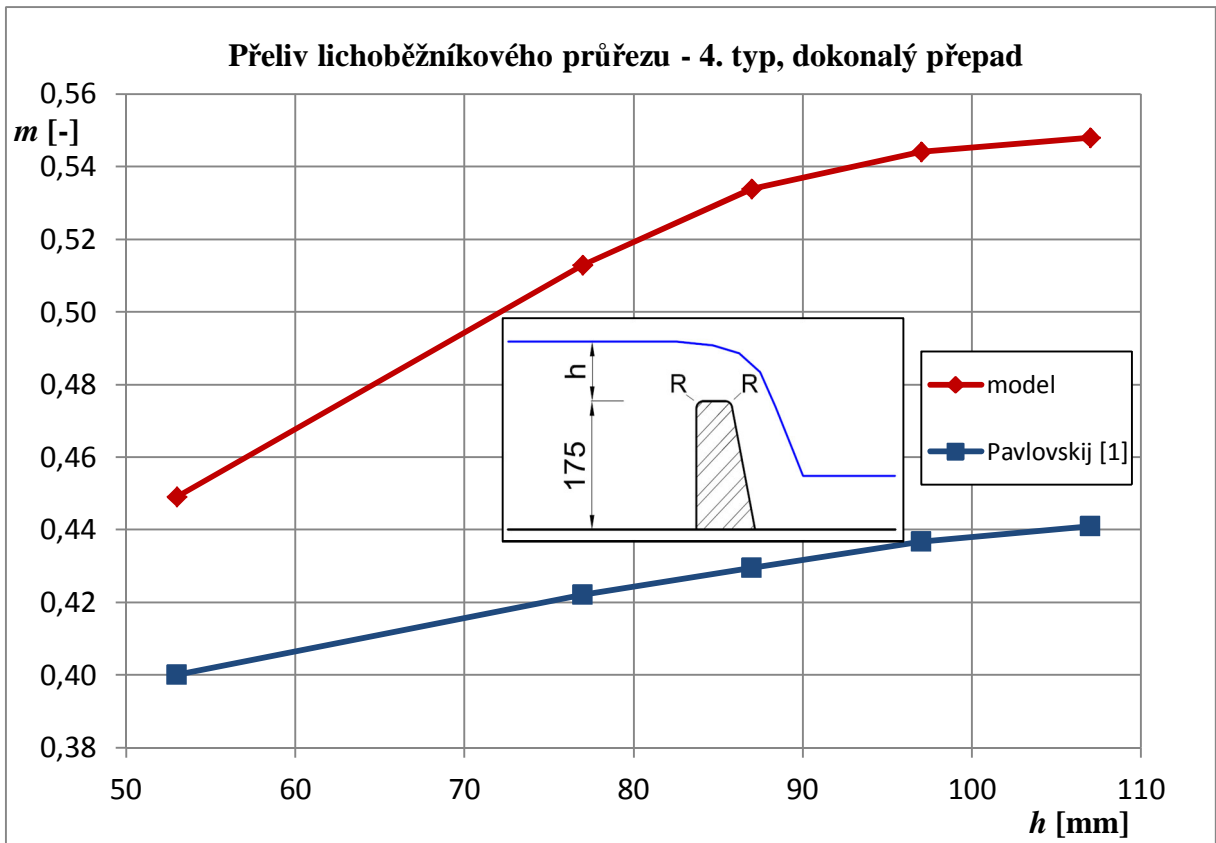


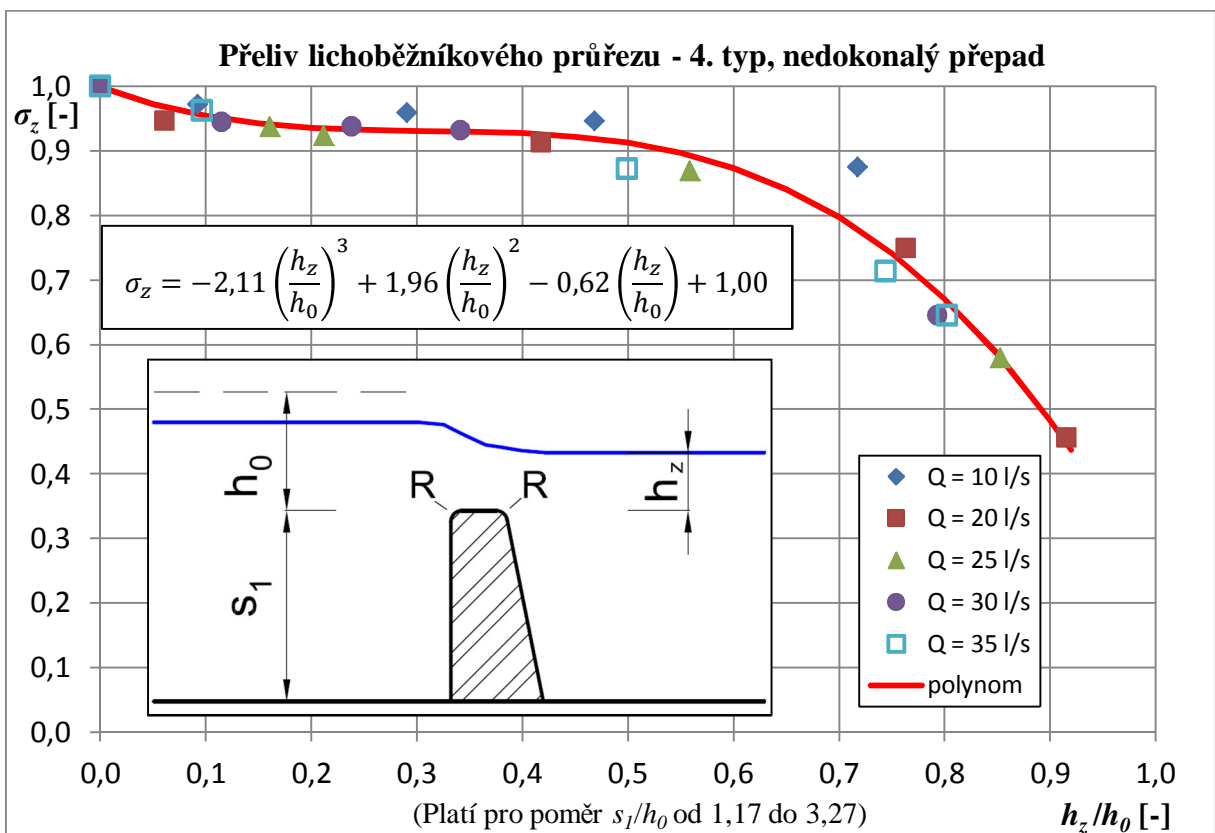
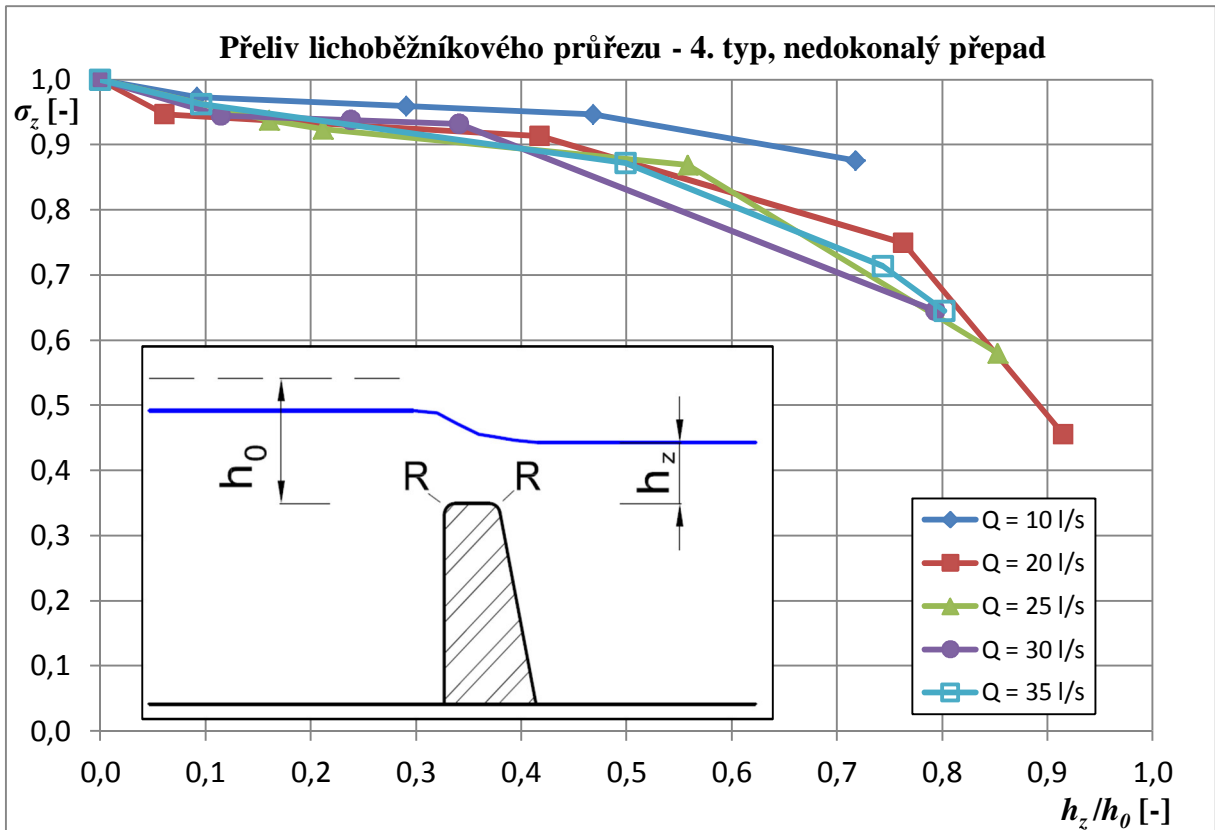
Obrázek 56 - $Q = 30$ l/s, $h = 108$ mm, $h_z = 70$ mm



Obrázek 57 - $Q = 35$ l/s, $h = 115$ mm, $h_z = 62$ mm

9.7 Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu lichoběžníkového přelivu - 4. typ

Stejně jako v předcházejících 3 typech přelivů (lichoběžníkových) dochází k výraznému rozdílu mezi hodnotami, které vyšly z měření na modelu přelivu a Pavlovského tabulky (Tab. 2). Nejmenší rozdíl je 0,049 (tj. 11 %), největší 0,107 (tj. 20 %).

Protože byla návodní hrana přelivu zaoblená, bylo možné navýšit hodnoty součinitele přepadu m dle Pavlovského tabulky [1] o 5 %.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/t a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,07 \left(\frac{h_0}{t}\right)^2 + 0,29 \left(\frac{h_0}{t}\right) + 0,21. \quad (44)$$

Ovlivnění přepadu se začíná silně projevovat při překročení hodnoty poměru $h_z/h_0 = 0,5$. Při následném nárůstu poměru zatopení začíná být přepad silně ovlivňován dolní vodou.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 3. stupně:

$$\sigma_z = -2,11 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 1,96 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,62 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (45)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 1,17 do 3,27.

Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší (viz Příloha P7), než hodnoty σ_z , které jsme si vypočítali.



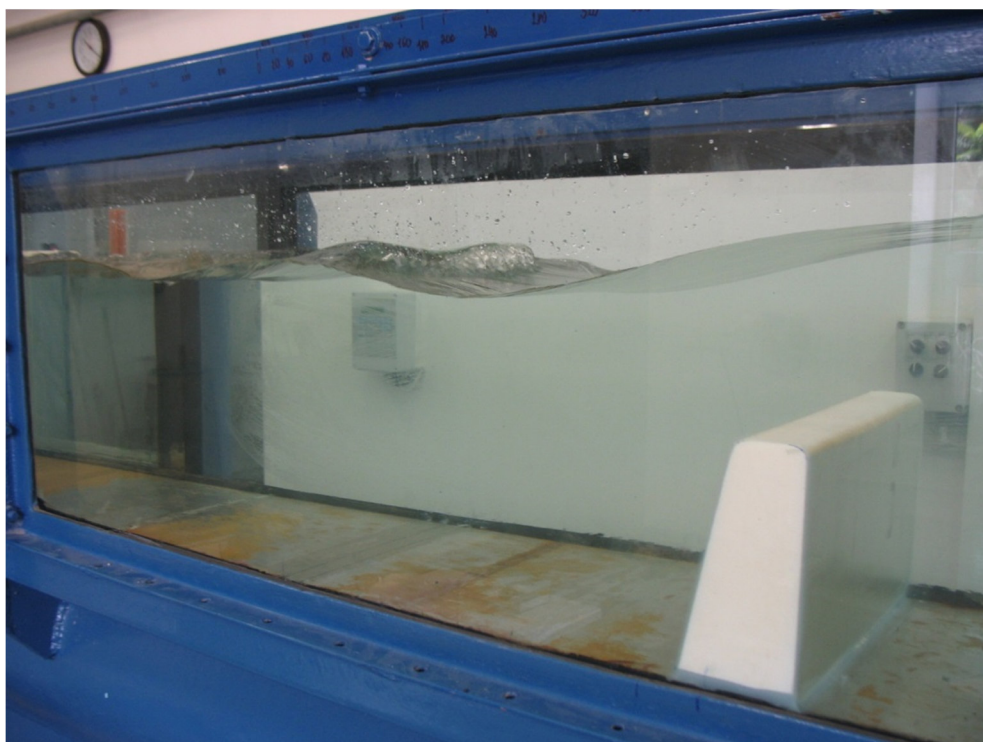
Obrázek 58 - $Q = 10$ l/s, $h = 55$ mm, $h_z = 26$ mm



Obrázek 59 - $Q = 20$ l/s, $h = 77$ mm, $h_z = 0$ mm

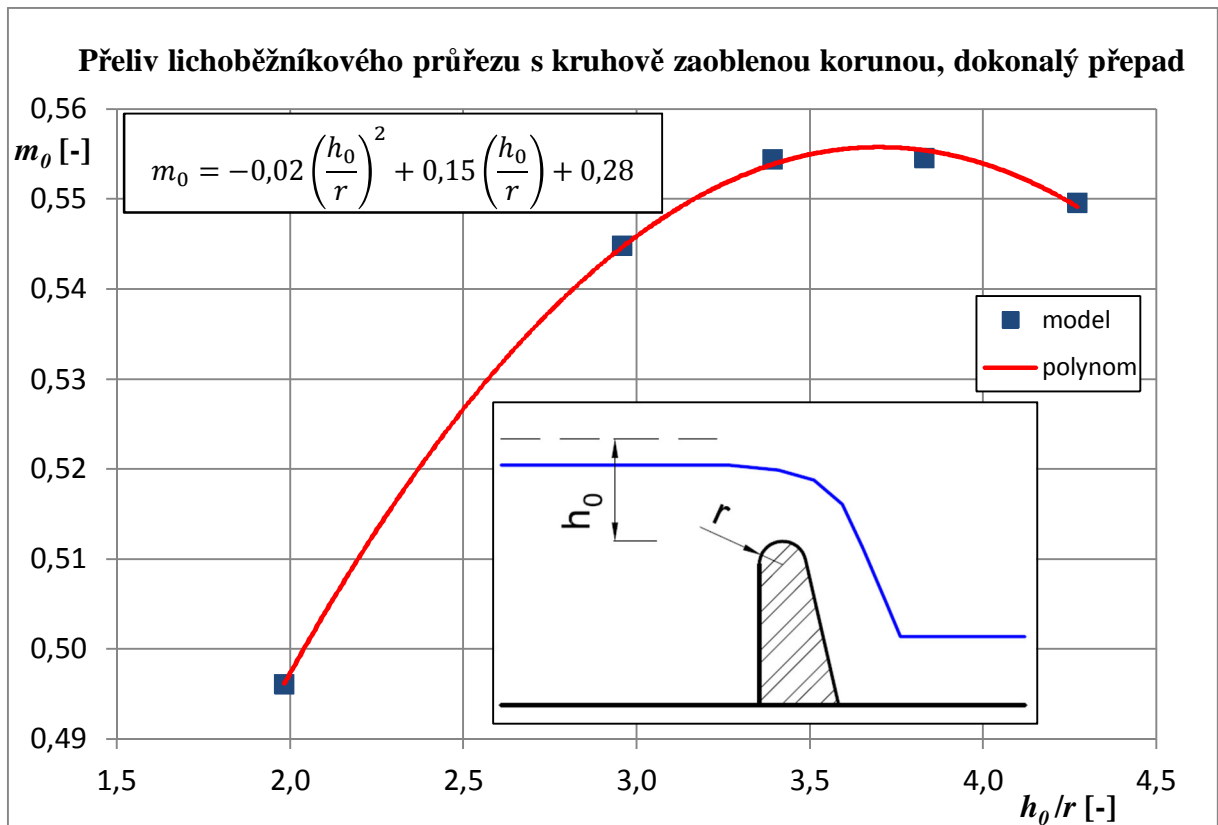
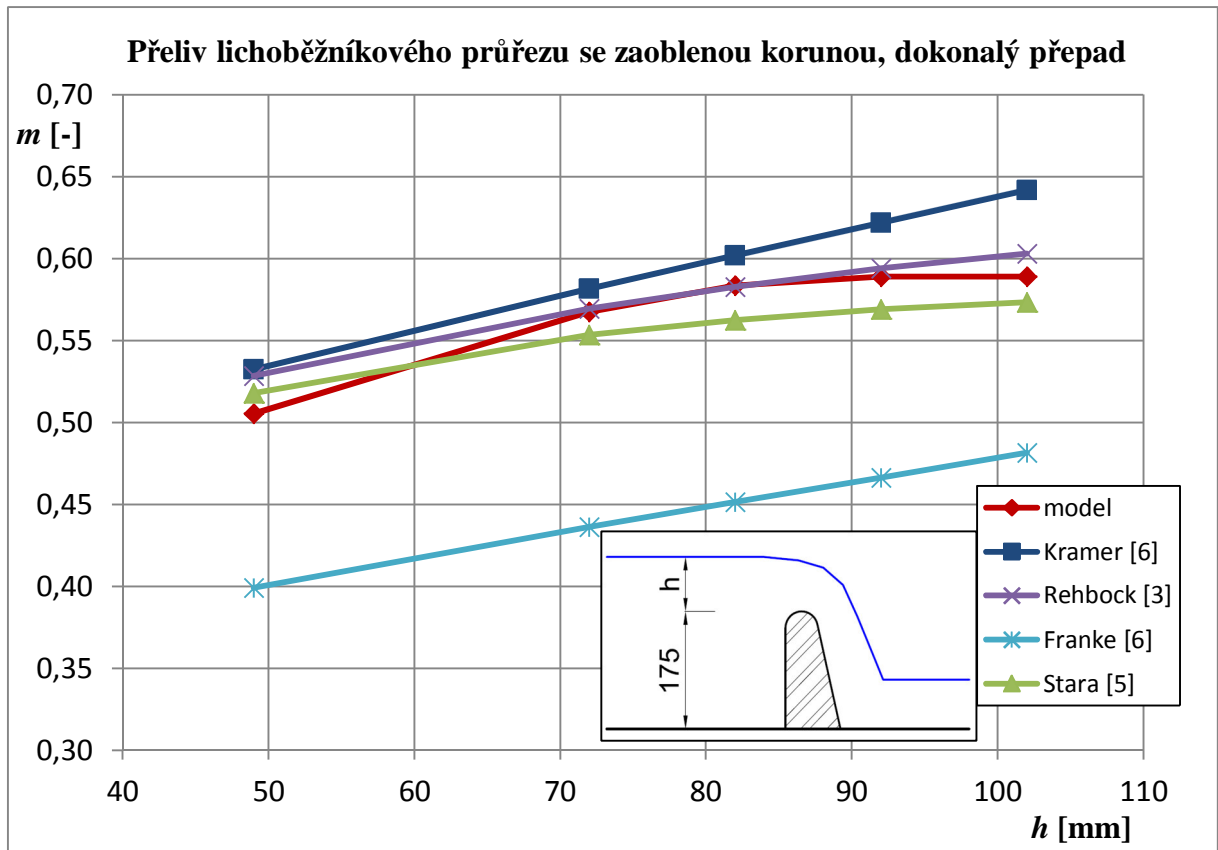


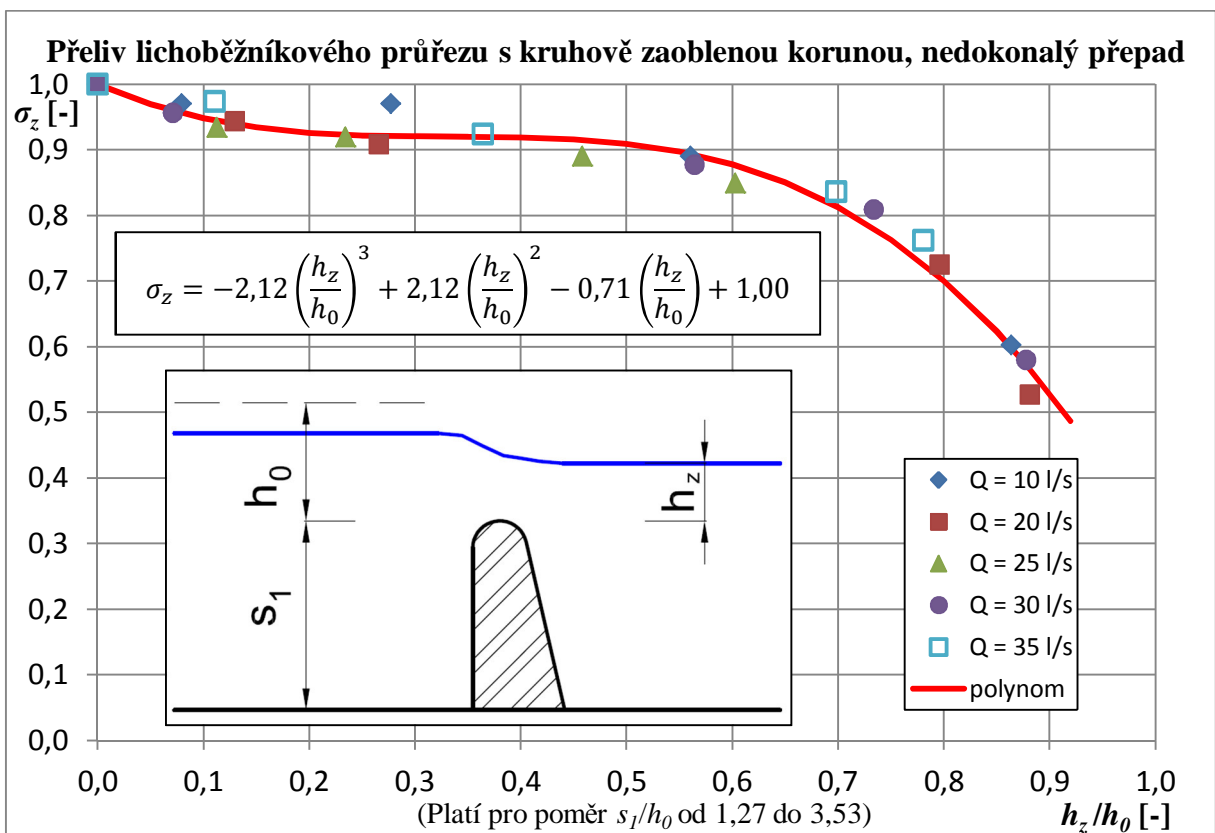
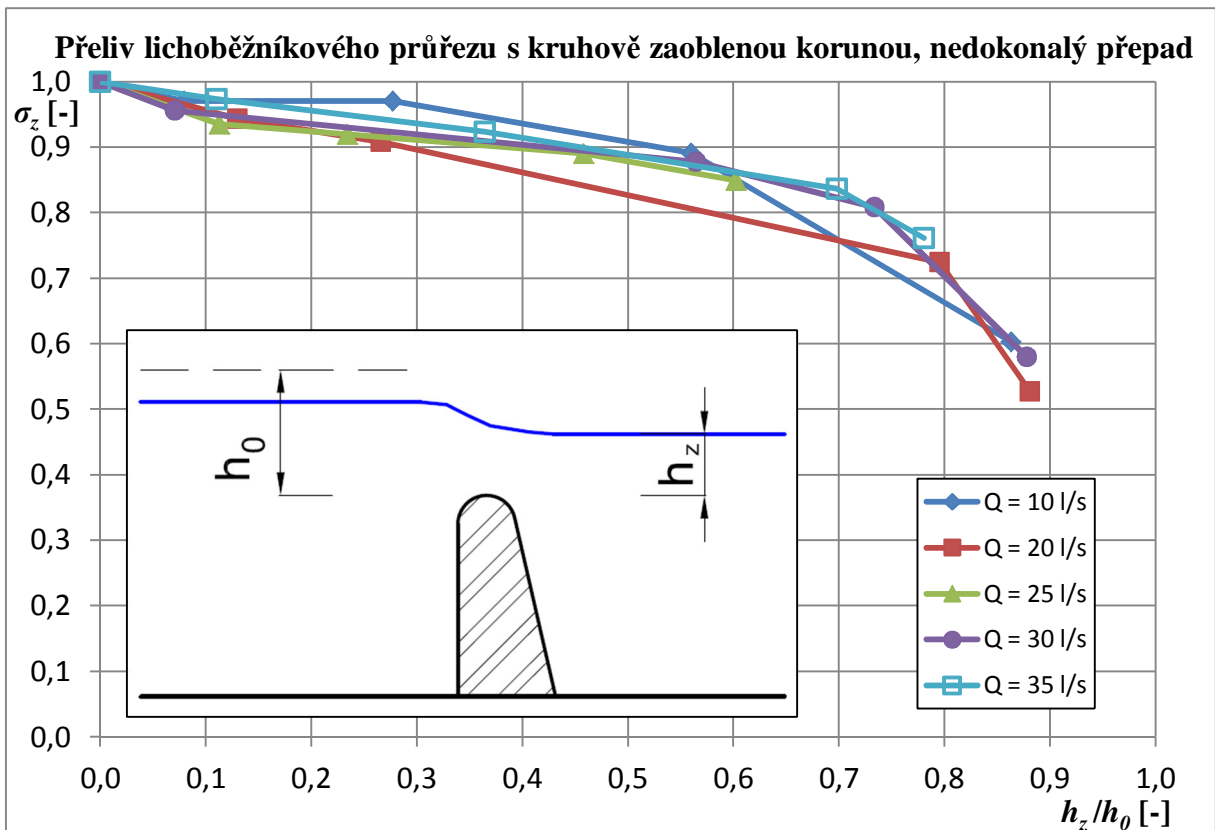
Obrázek 60 - $Q = 30 \text{ l/s}$, $h = 132 \text{ mm}$, $h_z = 107 \text{ mm}$



Obrázek 61 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 146 \text{ mm}$, $h_z = 120 \text{ mm}$

9.8 Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou





Vyhodnocení měření a výsledků přelivu lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Při srovnání výsledků z měření na modelu a výsledků dalších autorů je patrné, že výsledky získané dle Kramera [6] a Frankeho [6] mají lineární charakter. Hodnota součinitele přepadu m z měření na modelu od stavu kdy $Q = 25$ l/s se již nezvyšuje a dochází ke snížení hodnoty. Ve stavu kdy $Q = (20; 25; 30)$ l/s lze pozorovat shodu našich výsledků s výsledky dle Rehbocka [3].

Největší rozdíl mezi našimi výsledky a výsledky součinitele přepadu dle Rehbocka činí 0,023 (tj. 5 %). Největší rozdíl mezi výsledky získanými z měření a výsledky dle Stary [5] činí 0,021 (tj. 4 %).

Z porovnání výsledků je dále patrná nevelká shoda mezi našimi výsledky a výsledky dle Kramera a Frankeho. Tento stav je způsoben tím, že Kramer odvodil výpočetní vztah součinitele přepadu pro přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou. To stejné platí i pro Frankeho a Stary.

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/r a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = -0,02 \left(\frac{h_0}{r}\right)^2 + 0,15 \left(\frac{h_0}{r}\right) + 0,28. \quad (46)$$

Tento druh přelivu začne být ovlivněn polohou hladiny dolní vody od překročení poměru zatopení 0,5. Při dalším zvyšování tohoto poměru je přepad již silně ovlivněn.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 3. stupně:

$$\sigma_z = -2,12 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^3 + 2,12 \left(\frac{h_z}{h_0}\right)^2 - 0,71 \left(\frac{h_z}{h_0}\right) + 1,00. \quad (47)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 1,27 do 3,53.

Součinitelé zatopení dle Denverského grafu vycházejí vyšší, než hodnoty σ_z , které jsme vypočítali (viz Příloha P8).



Obrázek 62 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 49 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



Obrázek 63 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 77 \text{ mm}$, $h_z = 21 \text{ mm}$

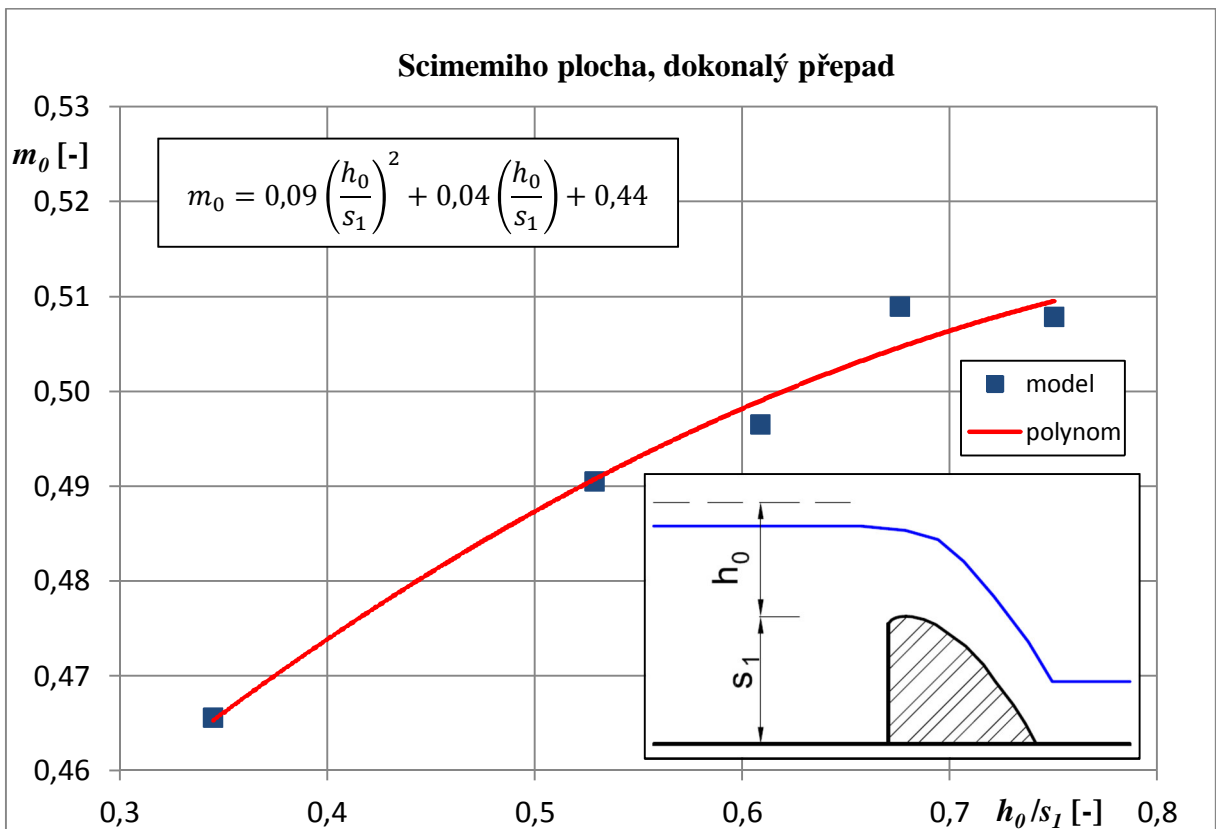
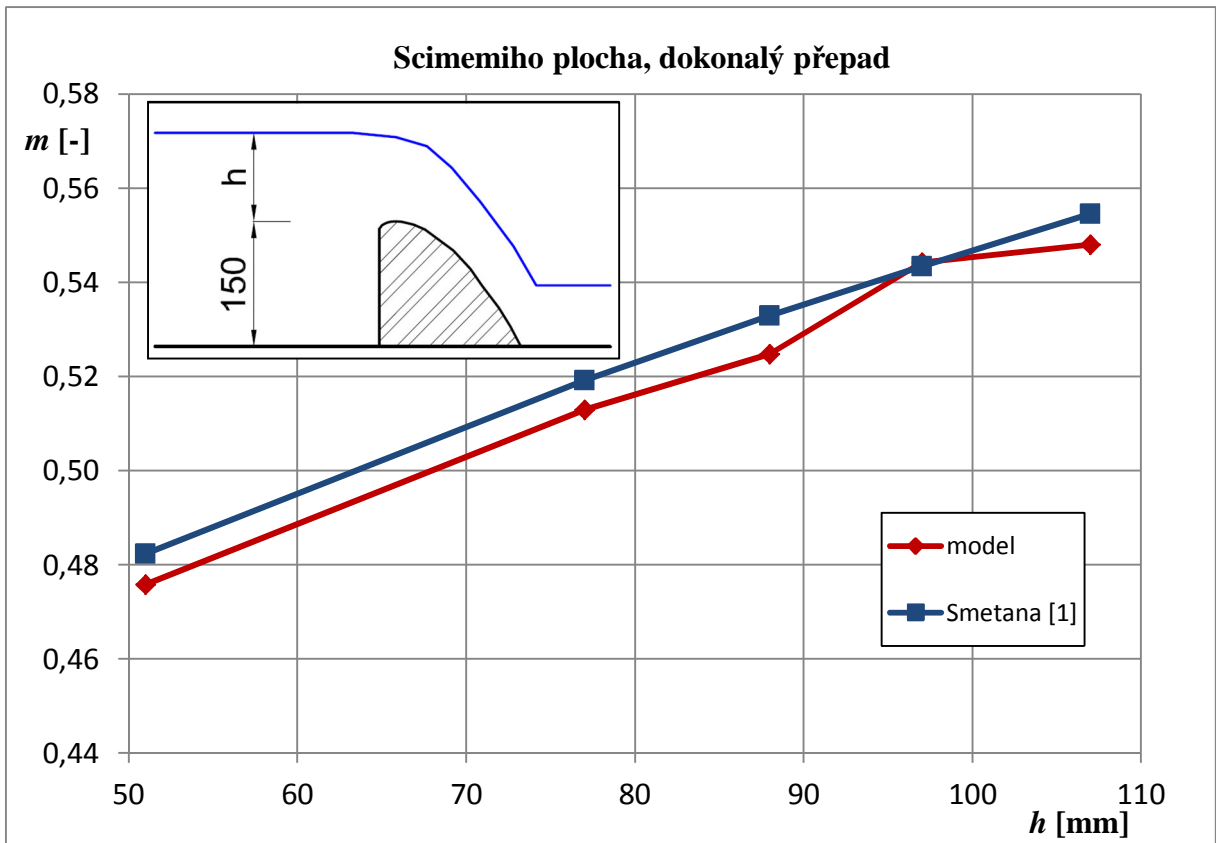


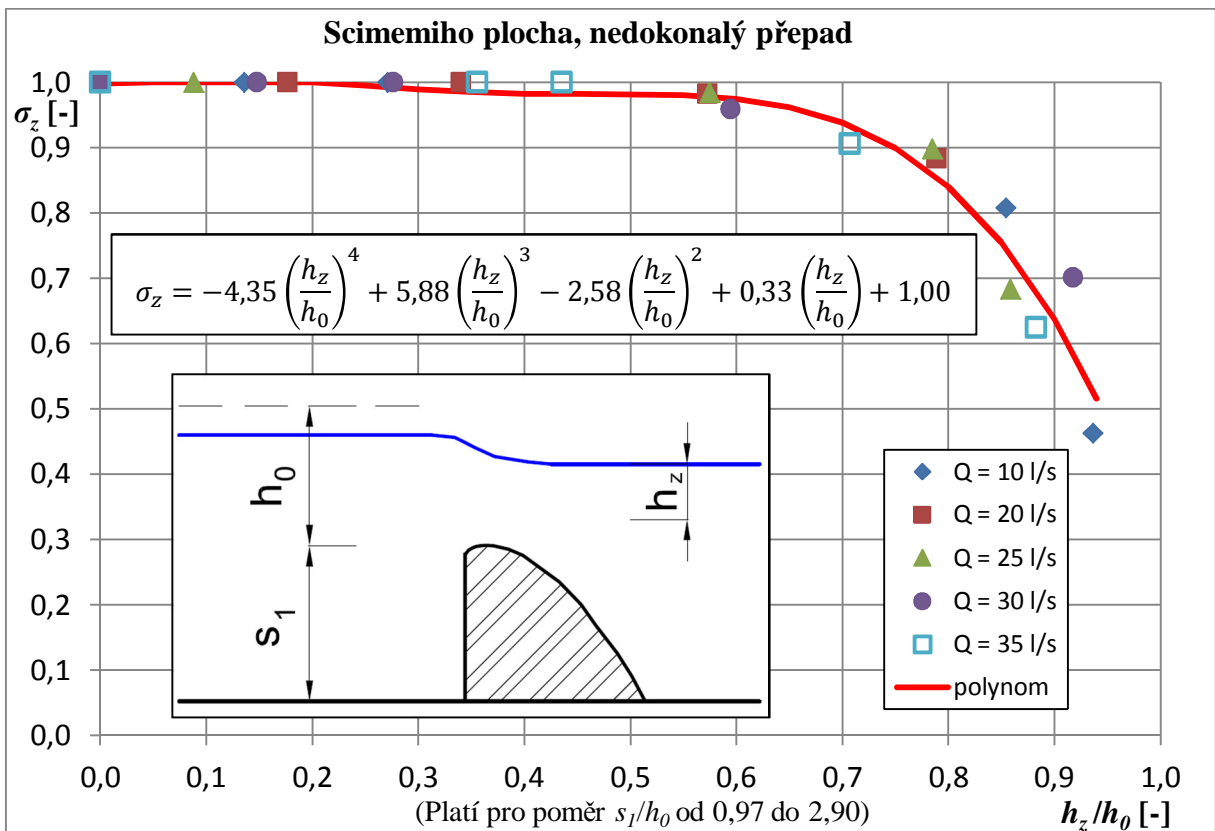
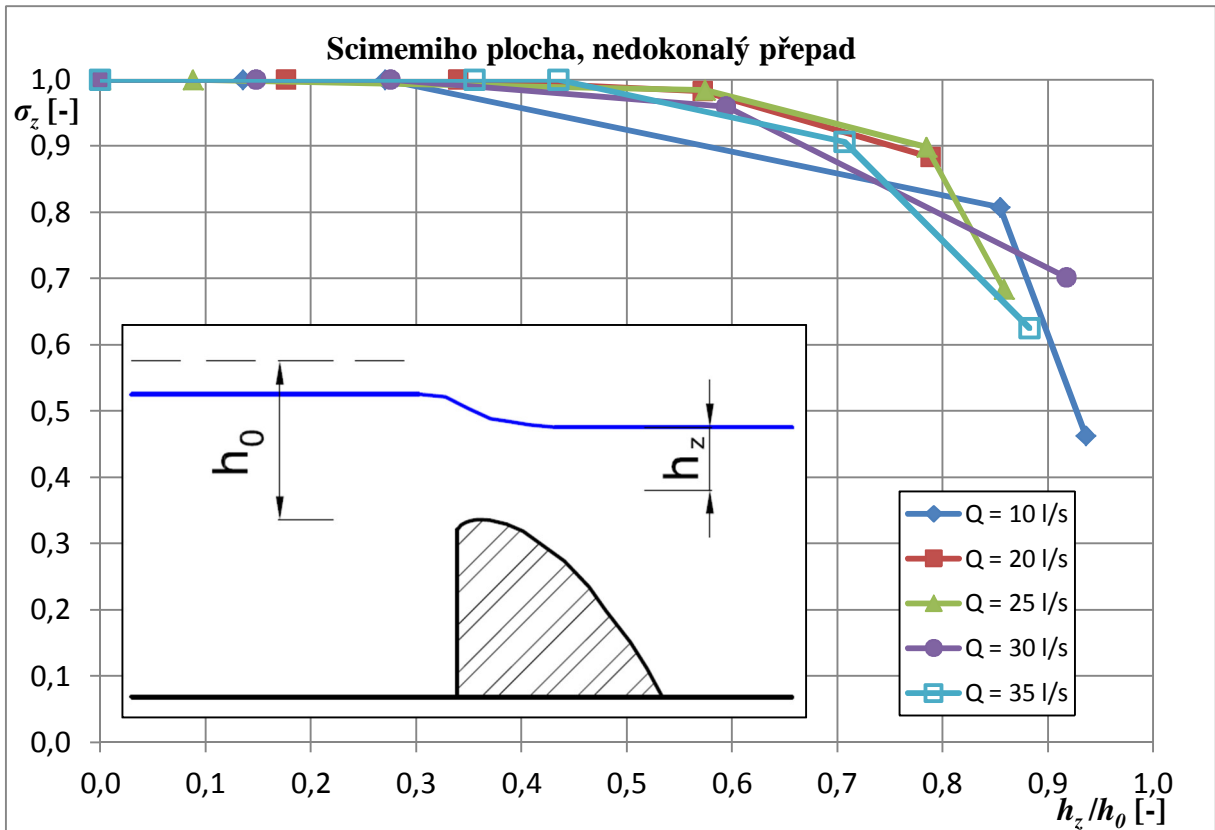
Obrázek 64 - $Q = 25$ l/s, $h = 82$ mm, $h_z = 0$ mm



Obrázek 65 - $Q = 30$ l/s, $h = 95$ mm, $h_z = 7$ mm

9.9 Scimemiho plocha





Vyhodnocení měření a výsledků Scimemiho plochy

Zkoušená Scimemiho plocha byla identická s přelivem, který byl použit v půdorysně zaoblené konfiguraci modelu bezpečnostního přelivu VD Boskovice (měřítko 1:20).

Návrhová přepadová výška (h_n) činí po přepočtu na model 70 mm.

Rozdíl mezi hodnotami plynoucími z měření na modelu přelivu Scimemiho plochy a hodnotami vypočtenými není větší než 0,01 (tj. 2 %). Takovýto rozdíl lze zanedbat a považovat za shodu. Avšak při stavu, kdy $Q = 30$ l/s jsou hodnoty součinitelů přepadu stejné. Při $Q = 35$ l/s se součinitel přepadu, dle výsledků z měření na modelu, výrazně nezvyšuje a je nižší než hodnota získaná dle upraveného vzorce dle Smetany (viz rovnice 12).

Hodnoty přepadového součinitele m_0 , které jsme získali z modelových zkoušek, jsou vyjádřeny jako funkce bezrozměrné veličiny h_0/s_1 a tato závislost je vyjádřena rovnicí polynomu 2. stupně:

$$m_0 = 0,09 \left(\frac{h_0}{s_1} \right)^2 + 0,04 \left(\frac{h_0}{s_1} \right) + 0,44. \quad (48)$$

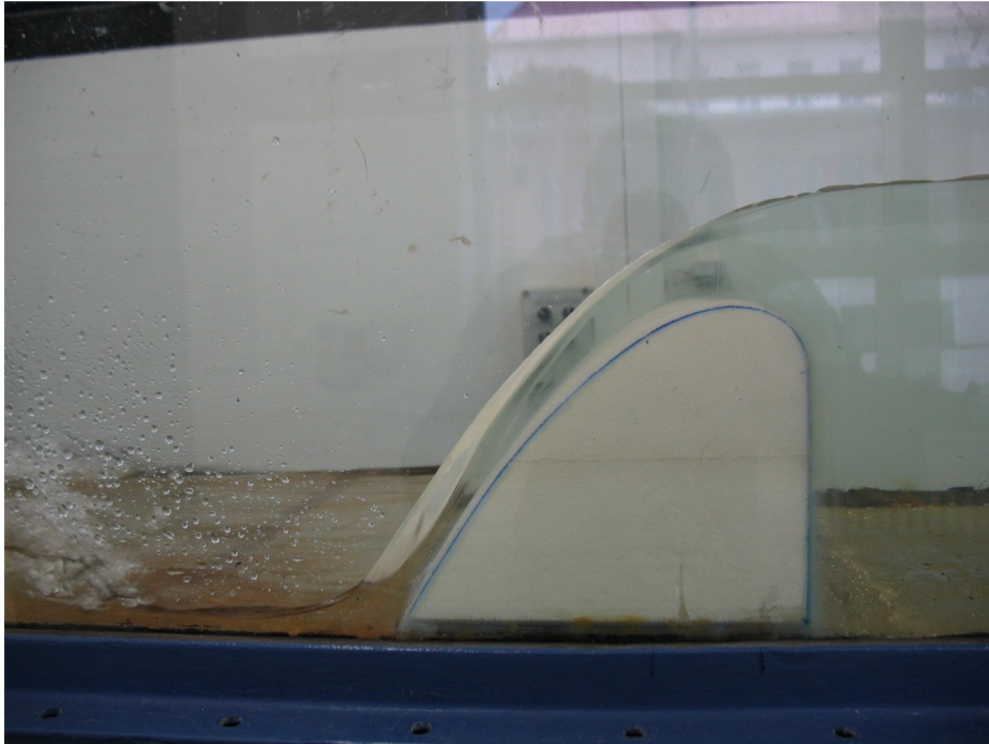
Je možné říci, že ovlivnění přepadu dolní vodou se začne silně projevovat až při překročení poměru zatopení 0,7. Tato skutečnost tedy řadí Scimemiho plochu do popředí všech zkoušených přelivů, co se týče ovlivnění přelivu polohou hladiny dolní vody.

Závislost hodnoty součinitele zatopení σ_z na poměru h_z/h_0 jsme vyjádřili pomocí polynomu 4. stupně:

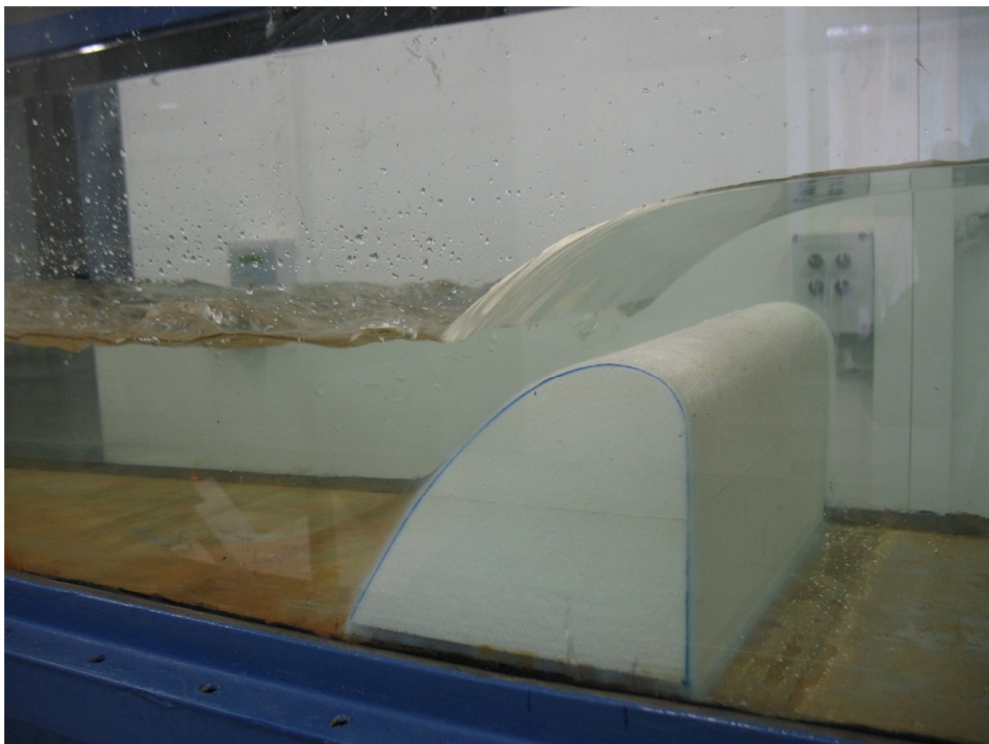
$$\sigma_z = -4,35 \left(\frac{h_z}{h_0} \right)^4 + 5,88 \left(\frac{h_z}{h_0} \right)^3 - 2,58 \left(\frac{h_z}{h_0} \right)^2 + 0,33 \left(\frac{h_z}{h_0} \right) + 1,00. \quad (49)$$

Tato závislost platí v rozmezí poměru s_1/h_0 od 0,97 do 2,90.

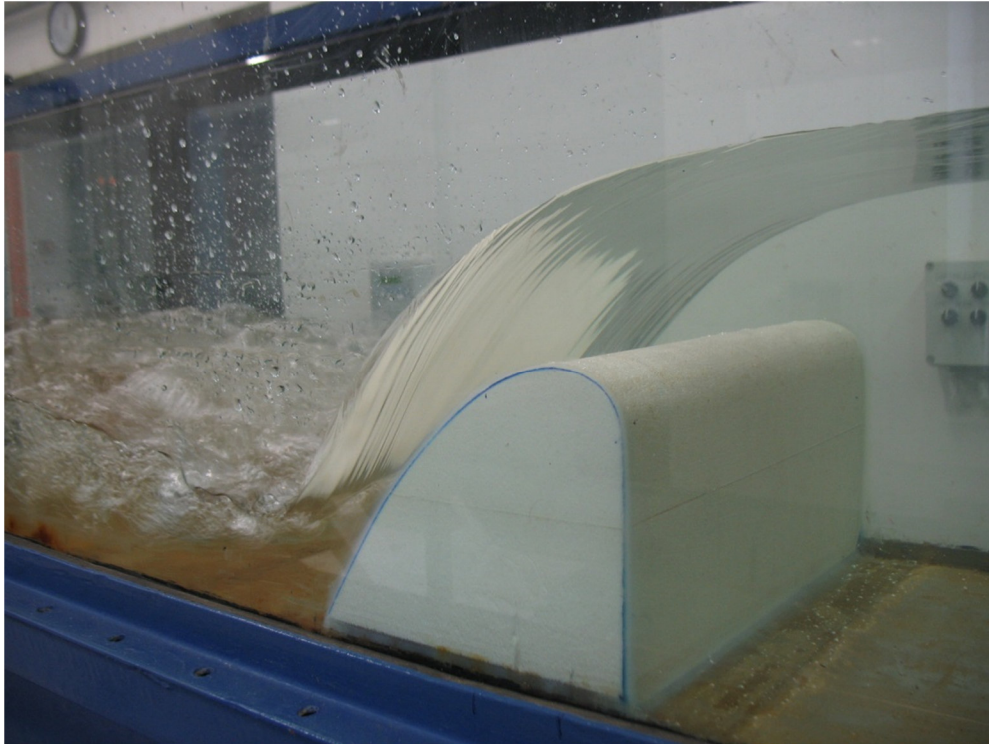
V tomto případě nastal opačný případ, oproti předcházejícím typům přelivů. Hodnoty součinitelů zatopení jsou si velice podobné (jen s velmi malými rozdíly, které lze zanedbat), (viz Příloha P9). Tato situace by potvrdila fakt, že Denverský graf byl odvozen z měření, které byly prováděny na proudnicové přelivné ploše.



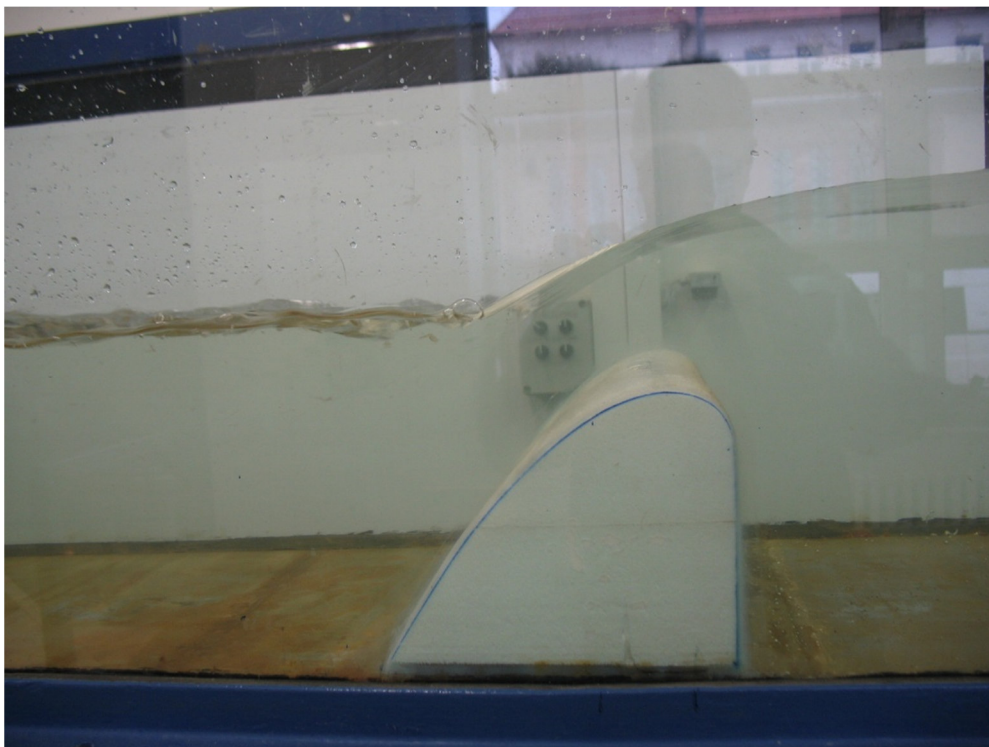
Obrázek 66 - $Q = 10$ l/s, $h = 51$ mm, $h_z = 0$ mm



Obrázek 67 - $Q = 20$ l/s, $h = 77$ mm, $h_z = 14$ mm



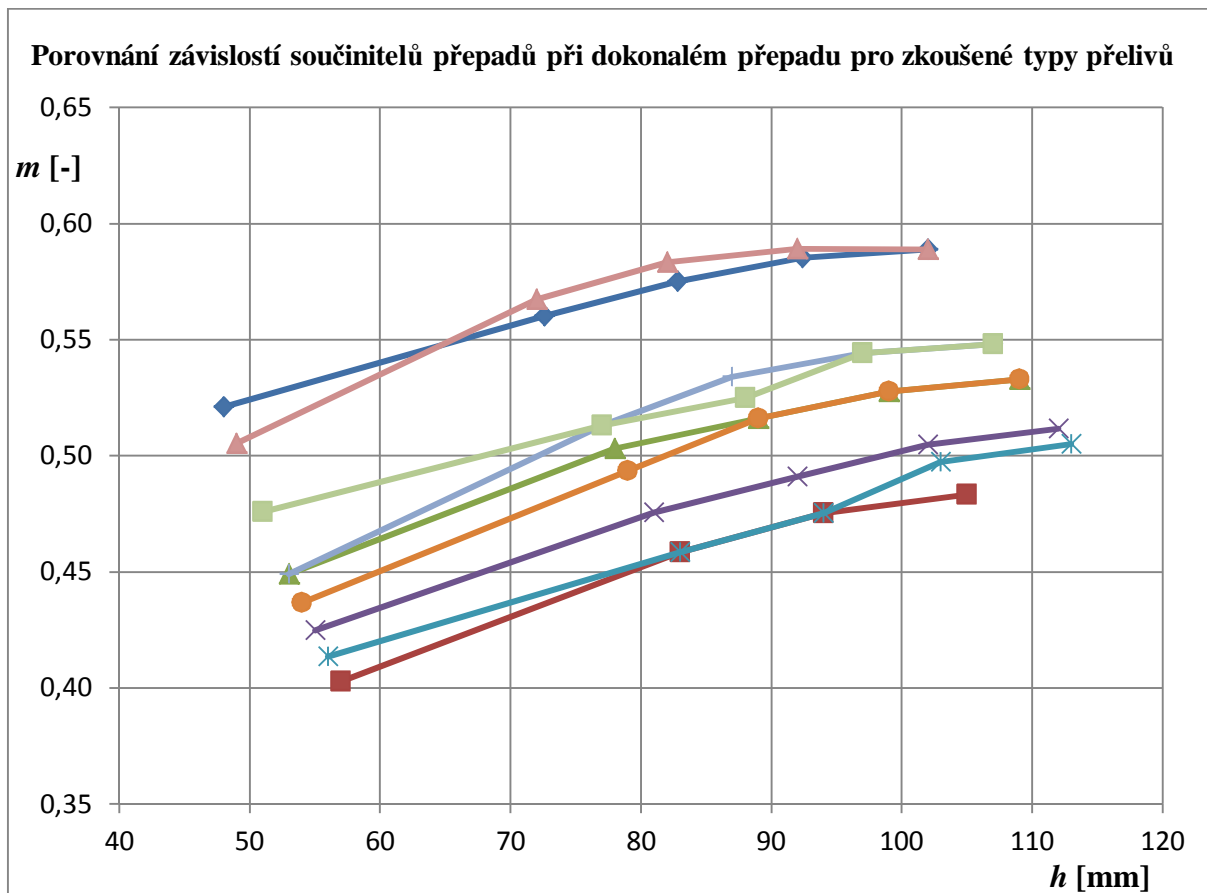
Obrázek 68 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 88 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$



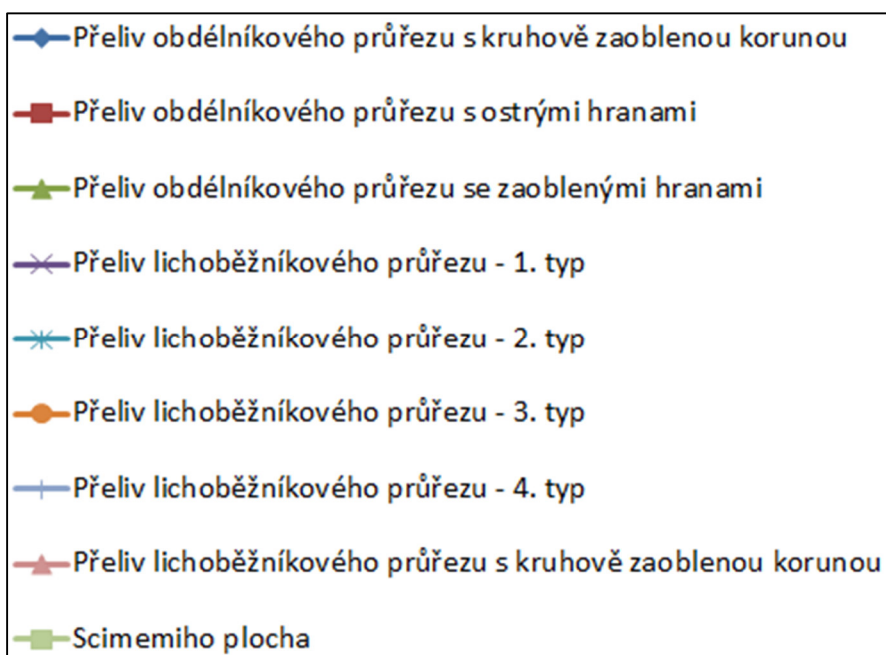
Obrázek 69 - $Q = 30 \text{ l/s}$, $h = 100 \text{ mm}$, $h_z = 62 \text{ mm}$

9.10 Vyhodnocení

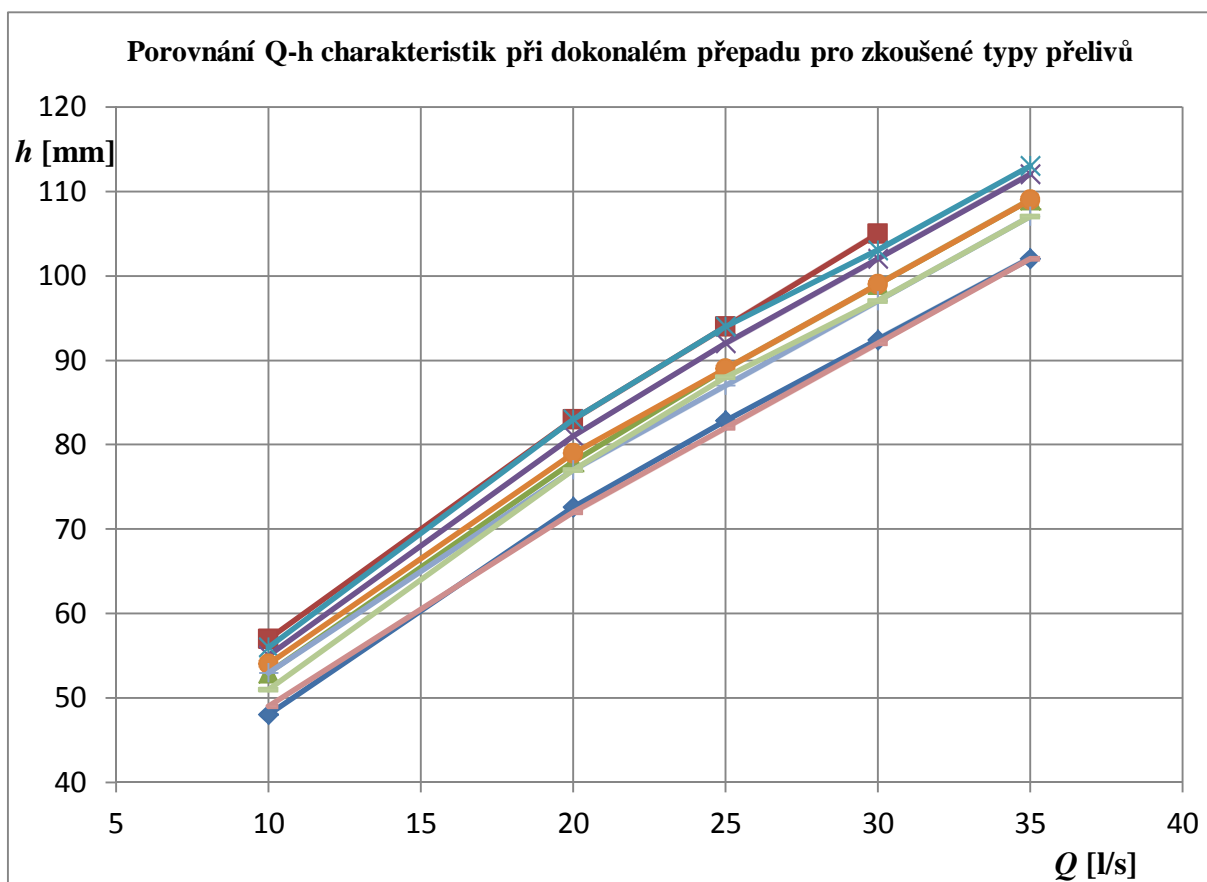
Graf 1



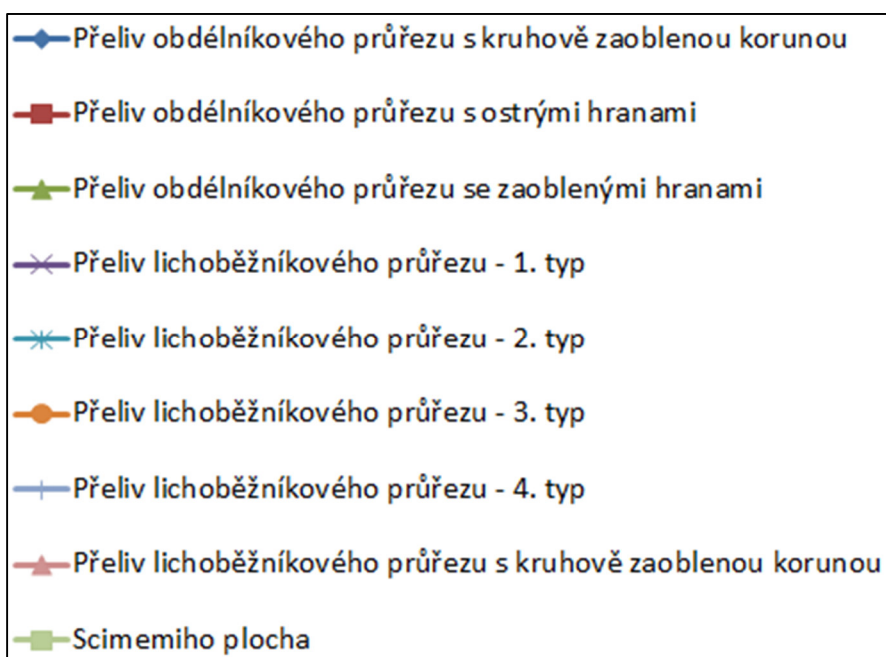
Legenda grafu:



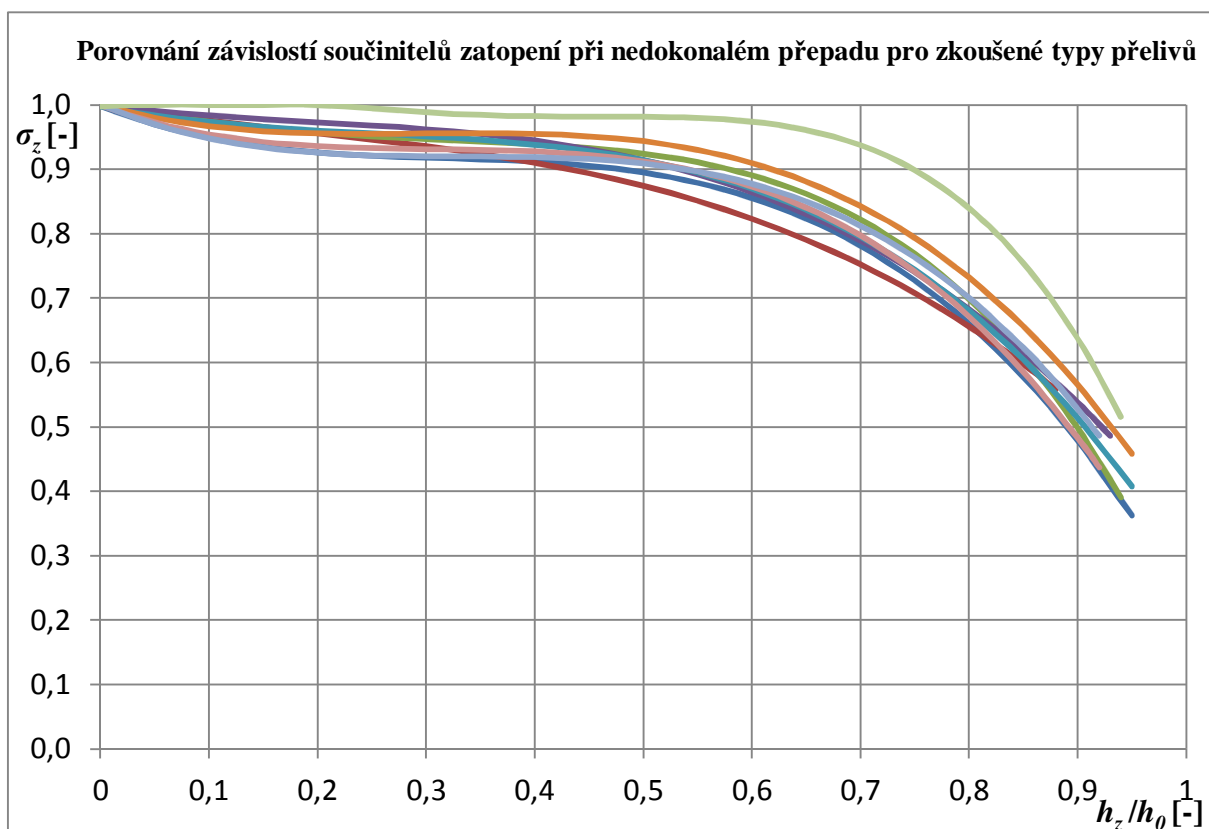
Graf 2



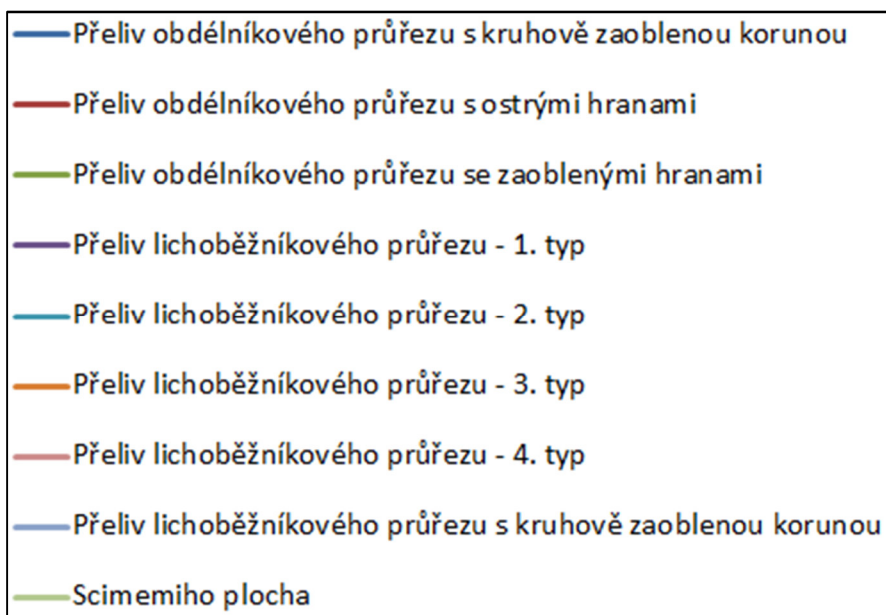
Legenda grafu



Graf 3



Legenda grafu



Z grafického vyhodnocení všech přelivů (Graf 1) je zřejmé, že nejvyšších hodnot součinitelů přepadu dosahuje přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou a přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou. Velice podobných výsledků dosáhl přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami a přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typu (se svislým vzdušným lícem). Tato shoda je zřejmě způsobena podobným tvarem vzdušní strany přelivu a zaoblením hran.

Dle grafického vyhodnocení $Q - h$ křivek všech zkoušených typů přelivů (Graf 2) je patrné, že stejný průtok převede nejnižší výškou přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou a přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou. Jsou tedy nejkapacitnější. Toto zkapacitnění se děje sníženými tlaky, zvýšenými podtlaky zejména v oblasti vzdušního líce u koruny přelivu.

Z posledního grafického výstupu (Graf 3) je jasné, že nejvyšší kapacity při ovlivnění hladinou vody za přelivem dosahuje Scimemiho plocha. ($\sigma_z > 0,9$) až do překročení hodnoty poměru zatopení $h_z/h_0 = 0,75$. Ostatní typy zkoušených přelivů jsou kapacitně ovlivněny při překročení nižšího poměru h_z/h_0 , přibližně hodnoty 0,5.

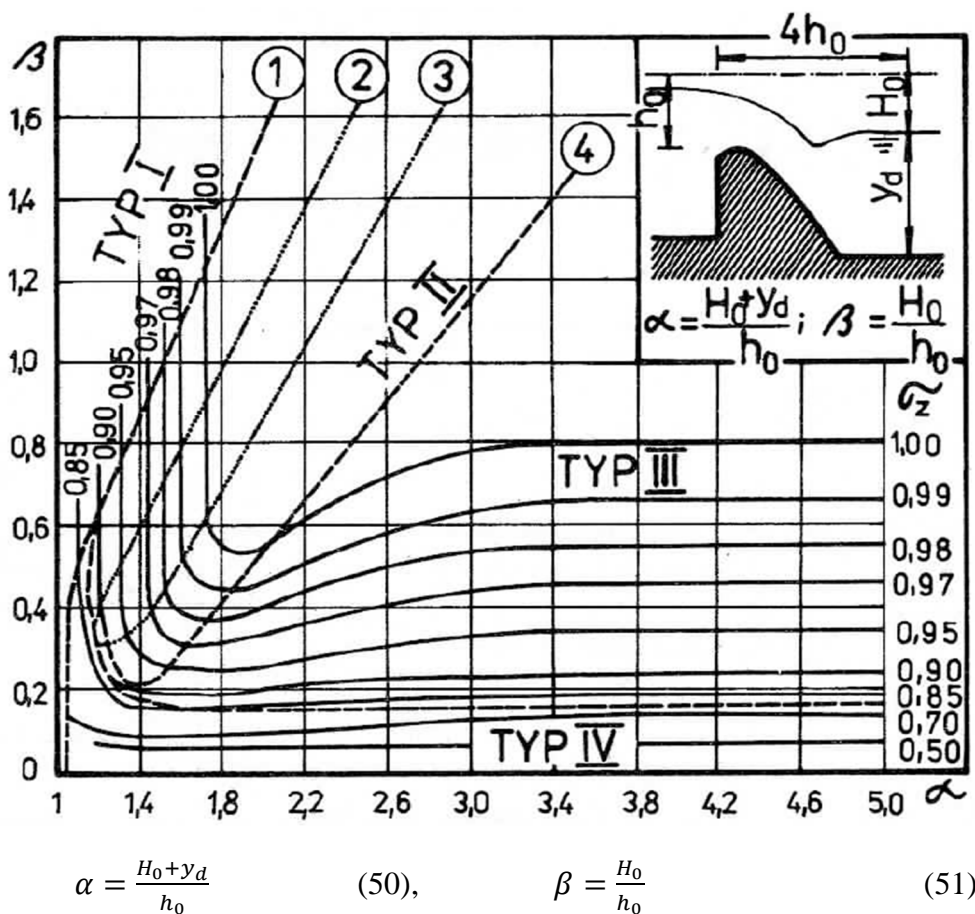
10 Denverský graf

Denverský graf představuje možnost určení typu přepadu přes přeliv (díky hodnotě σ_z) a určení polohy a typu vodního skoku, který se vytvoří pod přelivem, na základě hodnot dvou bezrozměrných veličin α a β (viz. rovnice 50, 51). O dokonalý přepad se jedná v případě, kdy průsečík hodnot α a β leží nad čarou, která představuje hodnotu $\sigma_z = 1,00$.

Plocha grafu je rozdělena na 4 dílčí oblasti. Každá oblast je charakterizována určitým druhem a polohou vodního skoku [4]:

- oblast I – bystrinné proudění pod přelivem,
- oblast II – pod přelivem vznikne prostý vodní skok, mezi čarami 1 a 3 vzdálený, mezi čarami 3 a 4 přilehlý vodní skok,
- oblast III – pod přelivem vznikne vzdutý vodní skok,
- oblast IV – pod přelivem vznikne vlnovitý vodní skok.

Denverský graf [4]:



10.1 Ověření platnosti Denverského grafu pro určení druhu vodního skoku

Na instalovaném modelu přelivu – Scimemiho ploše byly provedeny zkoušky ověření platnosti Denverského grafu pro určení druhu vodního skoku. Pro další typy zkoušených typů přelivů proběhlo ověření platnosti Denverského grafu zpětně. Výsledky určení druhu vodního skoku byly porovnávány s fotografiemi, které byly pořízeny během zkoušek pro diplomovou práci.

Scimemiho plocha byla zkoušena pro 5 průtoků, tj. $Q = (10; 20, 25; 30; 35)$ l/s. Postup zkoušek byl prakticky shodný jako v předchozích zkouškách, na různých typech přelivů. Jediný rozdíl byl, že pro jeden průtok proběhlo 10 měření. Měřila se hloubka vody před přelivem (hloubka horní vody) h_h a hloubka vody pod přelivem (hloubka dolní vody) h_d . Poloha úrovně hladiny dolní vody byla nastavována pomocí plastových dlužů tak, aby pokud možno, bylo dosaženo všech oblastí grafů (I až IV). Každé měření bylo vyfotografováno a zaznamenán druh vodního skoku. Následně byl druh vodního skoku vyhodnocen dle Denverského grafu.

10.1.1 Ověření platnosti – Scimemiho plocha

$Q = 10$ l/s

stav	h_h [mm]	h_d [mm]	h_o [mm]	H_o [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model
1	199	49	49,8	150,8	4,01	3,03	mimo obl.	-	oddálený
2	199	65	49,8	134,8	4,01	2,71	mimo obl.	-	oddálený
3	199	75	49,8	124,8	4,01	2,51	mimo obl.	-	přílehlý
4	199	88	49,8	111,8	4,01	2,25	mimo obl.	-	přílehlý
5	199	120	49,8	79,8	4,01	1,60	III	vzdutý	vzdutý
6	199	138	49,8	61,8	4,01	1,24	III	vzdutý	vzdutý
7	199	159	49,8	40,8	4,01	0,82	III	vzdutý	vzdutý
8	199	165	49,8	34,8	4,01	0,70	III	vzdutý	vzdutý
9	201	183	51,7	18,7	3,90	0,36	III	vzdutý	vzdutý
10	210	208	60,7	2,7	3,47	0,04	IV	vlnovitý	vlnovitý

$Q = 20$ l/s

stav	h_h [mm]	h_d [mm]	h_o [mm]	H_o [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model
1	224	75	76,4	151,4	2,96	1,98	mimo graf	-	oddálený
2	224	107	76,4	119,4	2,96	1,56	II, 3 - 4	přílehlý	přílehlý
3	224	122	76,4	104,4	2,96	1,37	II, 3 - 4	přílehlý	přílehlý
4	224	140	76,4	86,4	2,96	1,13	III	vzdutý	vzdutý
5	224	148	76,4	78,4	2,96	1,03	III	vzdutý	vzdutý
6	225	165	77,4	62,4	2,94	0,81	III	vzdutý	vzdutý
7	226	194	78,4	34,4	2,91	0,44	III	vzdutý	vzdutý
8	226	199	78,4	29,4	2,91	0,37	III	vzdutý	vzdutý
9	228	208	80,3	22,3	2,87	0,28	III	vzdutý	vzdutý
10	238	224	90,1	16,1	2,66	0,18	IV	vlnovitý	vlnovitý

$Q = 25 \text{ l/s}$

stav	h_h [mm]	h_d [mm]	h_o [mm]	H_o [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model
1	236	55	89,4	184,4	2,68	2,06	mimo graf	-	oddálený
2	236	125	89,4	114,4	2,68	1,28	II, 3 - 4	přilehlý	přilehlý
3	236	143	89,4	96,4	2,68	1,08	II, 3 - 4	přilehlý	přilehlý
4	236	159	89,4	80,4	2,68	0,90	III	vzdutý	vzdutý
5	237	177	90,3	63,3	2,66	0,70	III	vzdutý	vzdutý
6	238	184	91,3	57,3	2,64	0,63	III	vzdutý	vzdutý
7	238	192	91,3	49,3	2,64	0,54	III	vzdutý	vzdutý
8	238	202	91,3	39,3	2,64	0,43	III	vzdutý	vzdutý
9	250	227	103,0	26,0	2,46	0,25	III	vlnovitý	vlnovitý
10	287	275	139,3	14,3	2,08	0,10	IV	vlnovitý	vlnovitý

$Q = 30 \text{ l/s}$

stav	h_h [mm]	h_d [mm]	h_o [mm]	H_o [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model
1	246	40	100,5	210,5	2,49	2,09	mimo graf	-	oddálený
2	246	135	100,5	115,5	2,49	1,15	II, 3 - 4	přilehlý	oddálený
3	246	148	100,5	102,5	2,49	1,02	II, 3 - 4	přilehlý	přilehlý
4	246	162	100,5	88,5	2,49	0,88	II, 3 - 4	přilehlý	přilehlý
5	247	183	101,4	68,4	2,48	0,67	III	vzdutý	vzdutý
6	247	185	101,4	66,4	2,48	0,65	III	vzdutý	vzdutý
7	247	193	101,4	58,4	2,48	0,58	III	vzdutý	vzdutý
8	248	200	102,4	52,4	2,46	0,51	III	vzdutý	vzdutý
9	270	254	123,7	19,7	2,21	0,16	IV	vlnovitý	vlnovitý
10	281	266	134,4	18,4	2,12	0,14	IV	vlnovitý	vlnovitý

$Q = 35 \text{ l/s}$

stav	h_h [mm]	h_d [mm]	h_o [mm]	H_o [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model
1	256	77	111,6	184,6	2,34	1,65	II, 1 - 2	oddálený	oddálený
2	256	130	111,6	131,6	2,34	1,18	II, 2 - 3	oddálený	oddálený
3	256	160	111,6	101,6	2,34	0,91	II, 3 - 4	přilehlý	přilehlý
4	256	172	111,6	89,6	2,34	0,80	II, 3 - 5	přilehlý	vzdutý
5	256	186	111,6	75,6	2,34	0,68	III	vzdutý	vzdutý
6	256	197	111,6	64,6	2,34	0,58	III	vzdutý	vzdutý
7	257	225	112,6	37,6	2,33	0,33	III	vzdutý	vzdutý
8	264	240	119,3	29,3	2,26	0,25	III	vzdutý	vzdutý
9	272	253	127,0	24,0	2,18	0,19	III	vzdutý	vlnovitý
10	287	270	141,5	21,5	2,06	0,15	IV	vlnovitý	vlnovitý

10.1.2 Ověření platnosti – další zkoušené typy přelivů

Přeliv	Q [l/s]	h_n [mm]	h_d [mm]	α	β	Obl. dle grafu	Druh VS - graf	Druh VS - model	Obrázek
1	25	268	232	2,83	0,40	III	vzdutý	vlnovitý	36
1	35	284	207	2,54	0,72	III	vzdutý	vzdutý	37
2	20	260	197	3,02	0,75	III	vzdutý	vlnovitý	39
2	25	286	249	2,54	0,35	III	vzdutý	vlnovitý	40
3	20	258	213	3,06	0,55	III	vzdutý	vzdutý	43
3	30	303	276	2,34	0,23	III	vzdutý	vlnovitý	44
4	10	233	204	3,99	0,50	III	vzdutý	vlnovitý	46
4	35	298	243	2,38	0,47	III	vzdutý	vzdutý	49
5	20	260	198	3,02	0,73	III	vzdutý	vzdutý	50
5	25	272	213	2,76	0,62	III	vzdutý	vzdutý	51
5	35	317	281	2,20	0,27	III	vzdutý	vlnovitý	53
6	25	266	191	2,87	0,83	III	vzdutý	vzdutý	55
6	30	283	245	2,57	0,37	III	vzdutý	vlnovitý	56
6	35	290	237	2,47	0,48	III	vzdutý	vzdutý	57
7	10	230	201	4,15	0,53	III	vzdutý	vlnovitý	58
7	30	307	282	2,30	0,21	III	vzdutý	vlnovitý	60
7	35	321	295	2,17	0,20	III	vzdutý	vlnovitý	61
8	20	252	196	3,22	0,73	III	vzdutý	vzdutý	63
8	30	270	182	2,77	0,93	III	vzdutý	vzdutý	65

Přeliv:

- 1 - Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou
- 2 - Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami
- 3 - Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami
- 4 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ
- 5 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ
- 6 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ
- 7 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ
- 8 - Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

10.2 Vyhodnocení

Z výše uvedených tabulek jasně vyplývá, že Denverský graf může být používán při hydraulickém hodnocení Scimemiho plochy, i při nedokonalém přepadu.

Při zpětném zhodnocení použitelnosti Denverského grafu (určení polohy a typu vodního skoku) pro další typy zkoušených přelivů bylo zjištěno, že nedochází k takové shodě, jako v případě Scimemiho plochy. Shoda nastala jen v případech, kdy se jednalo o vodní skok vzdutý. Což je zřejmě způsobeno velikostí III. oblasti, kterou zaujímá v Denverském grafu. Např. v případě výskytu vlnovitého vodního skoku nedošlo vůbec ke shodě s Denverským grafem. Pro jiné typy přelivů by zřejmě oblast IV, která představuje výskyt vlnovitého vodního skoku, musela být širší.

Publikace [4] uvádí, že Denverský graf může být použit pro zjištění druhu přepadu přes jezová tělesa. Pro určení hodnoty součinitele zatopení, druhu a polohy vodního skoku. Avšak dle zdroje [7] byl Denverský graf vytvořen na základě podrobného měření na proudnicovém přelivu, což potvrzují výsledky našich modelových zkoušek, kdy bylo dosaženo shody pouze se Scimemiho plochou. Tímto byla tedy ověřena platnost Denverského grafu pro proudnicové přelivy.

11 Závěr

Z výsledků modelových zkoušek lze usoudit, že kapacitně nejvhodnějším typem přelivu pro převádění extrémních průtoků, při dokonalém přepadu, je typ přelivu obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou a přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou. Díky vysoké hodnotě součinitelů přepadu.

Jako nejkapacitnější typ přelivu pro převádění průtoků, při postupném ovlivňování přepadového množství úrovní hladiny dolní vody, vyšla Scimemiho plocha. Scimemiho plocha vykazuje poměrně nízkou ovlivnitelnost přepadu úrovní hladiny dolní vody a to až do překročení poměru zatopení $h_z/h_0 = 0,75$.

Při porovnávání hodnot součinitelů přepadu s výsledky z měření na modelu a výsledky, které byly vyjádřeny podle různých autorů, byly zjištěny jisté rozdíly. Zejména pokud se jednalo o relativně „řídce“ uváděné hodnoty v tabulkách (např. Pavlovskij). Při aplikaci všech hodnot je nutné vědět, za jakých geometrických i proudových podmínek byly hodnoty součinitelů přepadu stanoveny.

Další částí této práce bylo ověření platnosti Denverského grafu. Výsledky zkoušek jeho platnost potvrdily v plném rozsahu pro proudnicové plochy. Jak určení hodnoty součinitele zatopení, tak i polohu a typ vodního skoku. Pro použití na jiných druzích nízkých přelivů je třeba takto zjištěné údaje brát tedy spíše jako orientační.

12 Seznam použitých zdrojů

- [1] Jandora, J.; Šulc, J.: Hydraulika. Brno, 2006, str. 63 – 77, 125 – 135, 170 - 174
- [2] Šafář, R.; Šulc, J.: Experimentální výzkum přepadu přes přeliv s kruhově zaoblenou korunou. Vodní hospodářství 7/2012, str. 236 – 241.
- [3] Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968
- [4] Mäsiar, E.; Kamenský, J.: Hydraulika pre stavebných inžinierov (I). ALFA Bratislava, 1985
- [5] Stara, V; Koutková, H.: Součinitel přepadu přelivu s kruhově zaoblenou korunou z fyzikálních experimentů. Sborník ze 3. Vodohospodářské konference 2003. ECON Brno, 2003
- [6] Kolář, V; Patočka, C.; Bém, J.: Hydraulika. SNTL Praha, 1983
- [7] Hydraulic design criteria: Multivolume report of Corps of Engineers – manual handbook. Volume 1. USACE, 1987, dostupné z [http:// chl.erdc.usace.army.mil/hde](http://chl.erdc.usace.army.mil/hde)

13 Seznam použitých zkratk a symbolů

F	síla
Fr	Froudovo kritérium
H	výškový rozdíl úrovní hladin (spád)
H_0	výškový rozdíl mezi energetickou přepadovou výškou a hloubkou vody za přelivem
J_0	sklon dna
Q	průtok
R	poloměr zaoblení (hrany)
Re	Reynoldsovo kritérium
UZV	ultrazvuk
We	Weberovo kritérium
a	zrychlení
b	šířka přelivu
b_0	účinná šířka přelivu
d	hloubka vývaru
g	tíhové zrychlení
h	přepadová výška
h_d	hloubka vody za přelivem
h_n	návrhová přepadová výška
h_z	hloubka zatopení přelivu
h_0	energetická přepadová výška
i_k	kritický sklon dna (žlabu, toku)
i_0	sklon dna (toku, žlabu)
k	rychlostní výška
m	součinitel přepadu
r	poloměr

s	výška přelivu nade dnem odpadního koryta (žlabu)
s_I	výška přelivu nade dnem přívodního koryta (žlabu)
t	tloušťka
v	průřezová rychlost
v_0	přítoková rychlost
y_D	hloubka vody za přelivem
α	bezrozměrná veličina (Denverský graf)
β	bezrozměrná veličina (Denverský graf)
σ_z	součinitel zatopení
σ_s	součinitel šikmosti
μ_p	součinitel přepadu
ϑ	kinematická viskozita

IAHR International Association for Hydro – Environment Engineering and Research

14 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení přepadů a přelivů [1]	4
Obrázek 2 - Typy přelivů [1].....	5
Obrázek 3 – Ostrohranný měrný přeliv, pramen Jordánka, CHKO Český ráj.....	6
Obrázek 4 - MVE Sokolský ostrov a válcový jez v Českých Budějovicích	6
Obrázek 5 - Nedokonalý přepad přes jezové těleso [1]	8
Obrázek 6 - Bachmatěvův grafikon [1].....	8
Obrázek 7 - Boční kontrakce [1]	9
Obrázek 8 - Korunový bezpečnostní přeliv VD Vranov.....	11
Obrázek 9 - Bezpečnostní přeliv na levém břehu VD Slezská Harta	11
Obrázek 10 - Prostý vodní skok [1]	12
Obrázek 11 - Typy vodního skoku [1].....	13
Obrázek 12 - prostý VS.....	14
Obrázek 13 - vlnovitý VS.....	15
Obrázek 14 - vzdutý VS.....	15
Obrázek 15 - oddálený VS	16
Obrázek 16 - přilehlý VS	16
Obrázek 17 - Přeliv obdélníkové průřezu s kruhově zaoblenou korunou.....	17
Obrázek 18 - Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami.....	18
Obrázek 19 - Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami.....	19
Obrázek 20 - Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou.....	19
Obrázek 21 - Přeliv lichoběžníkového průřezu	20
Obrázek 22 - Přeliv lichoběžníkového průřezu (se zaoblenými hranami)	20
Obrázek 23 - Scimemiho plocha.....	21
Obrázek 24 - Hydraulický žlab v budově F	31
Obrázek 25 – Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou	32
Obrázek 26 – Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami	32
Obrázek 27 – Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami	33
Obrázek 28 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ.....	33
Obrázek 29 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ.....	34
Obrázek 30 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ.....	34
Obrázek 31 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ.....	35
Obrázek 32 – Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou.....	35
Obrázek 33 – Scimemiho plocha	36
Obrázek 34 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 48 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$	46
Obrázek 35 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 73 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$	46
Obrázek 36 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 93 \text{ mm}$, $h_z = 57 \text{ mm}$	47
Obrázek 37 - $Q = 35 \text{ l/s}$, $h = 109 \text{ mm}$, $h_z = 32 \text{ mm}$	47
Obrázek 38 - $Q = 10 \text{ l/s}$, $h = 57 \text{ mm}$, $h_z = 0 \text{ mm}$	51
Obrázek 39 - $Q = 20 \text{ l/s}$, $h = 85 \text{ mm}$, $h_z = 22 \text{ mm}$	51
Obrázek 40 - $Q = 25 \text{ l/s}$, $h = 111 \text{ mm}$, $h_z = 74 \text{ mm}$	52
Obrázek 41 - $Q = 35 \text{ l/s}$, odtržení přepadového paprsku od koruny přelivu	52

Obrázek 42 - $Q = 10$ l/s, $h = 53$ mm, $h_z = 0$ mm	56
Obrázek 43 - $Q = 20$ l/s, $h = 83$ mm, $h_z = 38$ mm.....	56
Obrázek 44 - $Q = 30$ l/s, $h = 128$ mm, $h_z = 101$ mm.....	57
Obrázek 45 - $Q = 35$ l/s, $h = 109$ mm, $h_z = 0$ mm.....	57
Obrázek 46 - $Q = 10$ l/s, $h = 58$ mm, $h_z = 29$ mm.....	61
Obrázek 47 - $Q = 20$ l/s, $h = 81$ mm, $h_z = 0$ mm	61
Obrázek 48 - $Q = 30$ l/s, $h = 102$ mm, $h_z = 0$ mm.....	62
Obrázek 49 - $Q = 35$ l/s, $h = 123$ mm, $h_z = 68$ mm.....	62
Obrázek 50 - $Q = 20$ l/s, $h = 85$ mm, $h_z = 23$ mm.....	66
Obrázek 51 - $Q = 25$ l/s, $h = 97$ mm, $h_z = 38$ mm.....	66
Obrázek 52 - $Q = 30$ l/s, $h = 103$ mm, $h_z = 0$ mm.....	67
Obrázek 53 - $Q = 35$ l/s, $h = 142$ mm, $h_z = 106$ mm.....	67
Obrázek 54 - $Q = 10$ l/s, $h = 54$ mm, $h_z = 0$ mm	71
Obrázek 55 - $Q = 25$ l/s, $h = 91$ mm, $h_z = 16$ mm.....	71
Obrázek 56 - $Q = 30$ l/s, $h = 108$ mm, $h_z = 70$ mm.....	72
Obrázek 57 - $Q = 35$ l/s, $h = 115$ mm, $h_z = 62$ mm.....	72
Obrázek 58 - $Q = 10$ l/s, $h = 55$ mm, $h_z = 26$ mm.....	76
Obrázek 59 - $Q = 20$ l/s, $h = 77$ mm, $h_z = 0$ mm	76
Obrázek 60 - $Q = 30$ l/s, $h = 132$ mm, $h_z = 107$ mm.....	77
Obrázek 61 - $Q = 35$ l/s, $h = 146$ mm, $h_z = 120$ mm.....	77
Obrázek 62 - $Q = 10$ l/s, $h = 49$ mm, $h_z = 0$ mm	81
Obrázek 63 - $Q = 20$ l/s, $h = 77$ mm, $h_z = 21$ mm.....	81
Obrázek 64 - $Q = 25$ l/s, $h = 82$ mm, $h_z = 0$ mm	82
Obrázek 65 - $Q = 30$ l/s, $h = 95$ mm, $h_z = 7$ mm	82
Obrázek 66 - $Q = 10$ l/s, $h = 51$ mm, $h_z = 0$ mm	86
Obrázek 67 - $Q = 20$ l/s, $h = 77$ mm, $h_z = 14$ mm.....	86
Obrázek 68 - $Q = 25$ l/s, $h = 88$ mm, $h_z = 0$ mm	87
Obrázek 69 - $Q = 30$ l/s, $h = 100$ mm, $h_z = 62$ mm.....	87

15 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Součinitel přepadu pro obdélníkové přelivy [3]	18
Tabulka 2 - Pavlovského tabulka pro přelivy lichoběžníkového průřezu [1]	21
Tabulka 3 - Tabulka Oficerova a Istominy [1]	22

16 Seznam příloh

P1 – Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

P2 – Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami

P3 – Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami

P4 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ

P5 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ

P6 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ

P7 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ

P8 – Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

P9 – Scimemiho plocha

17 Přílohy

P1 – Přeliv obdélníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet			
												Kramer [6]	Franke [6]	Stara [5]	Rehbock [3]
										[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]
10	48		0,11	49	1,000	1,000	1,000	0,00	3,60	0,511	0,521	0,531	0,398	0,516	0,526
	50	4	0,11	51	1,000	1,000	0,942	0,07	3,46	0,482	0,490				
	51	16	0,11	52	1,000	1,000	0,915	0,30	3,39	0,468	0,476				
	55	37	0,11	55	0,950	0,921	0,829	0,67	3,18	0,424	0,431				
	93	89	0,09	93	0,300	0,330	0,375	0,95	1,87	0,192	0,193				
20	73		0,20	75	1,000	1,000	1,000	0,00	2,35	0,538	0,560	0,587	0,440	0,554	0,570
	77	24	0,19	79	0,995	1,000	0,919	0,30	2,22	0,495	0,513				
	91	69	0,18	93	0,910	0,846	0,721	0,74	1,89	0,388	0,399				
	122	113	0,16	123	0,600	0,482	0,470	0,92	1,42	0,253	0,257				
	147	141	0,15	148	0,300	0,330	0,357	0,95	1,18	0,192	0,194				
25	83		0,24	86	1,000	1,000	1,000	0,00	2,04	0,547	0,575	0,609	0,457	0,563	0,584
	87	24	0,23	89	0,995	1,000	0,940	0,27	1,96	0,514	0,538				
	93	57	0,23	96	0,960	0,957	0,847	0,60	1,83	0,463	0,483				
	126	111	0,20	128	0,750	0,629	0,547	0,87	1,37	0,299	0,306				
	156	142	0,18	158	0,600	0,545	0,400	0,90	1,11	0,219	0,222				
30	92		0,27	96	1,000	1,000	1,000	0,00	1,82	0,551	0,585	0,630	0,473	0,569	0,594
	97	14	0,27	101	1,000	1,000	0,934	0,14	1,74	0,515	0,544				
	99	38	0,27	103	0,995	1,000	0,908	0,37	1,71	0,500	0,528				
	105	68	0,26	108	0,960	0,940	0,835	0,63	1,61	0,460	0,483				
	140	124	0,23	143	0,750	0,602	0,553	0,87	1,23	0,305	0,314				
35	102		0,31	107	1,000	1,000	1,000	0,00	1,64	0,550	0,589	0,651	0,489	0,573	0,603
	107	18	0,30	112	1,000	1,000	0,936	0,16	1,57	0,514	0,548				
	109	32	0,30	114	0,985	1,000	0,912	0,28	1,54	0,501	0,533				
	138	116	0,27	142	0,870	0,719	0,654	0,82	1,23	0,359	0,374				
	152	132	0,26	155	0,770	0,653	0,569	0,85	1,13	0,313	0,324				

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet

P2 – Přeliv obdélníkového průřezu s ostrými hranami

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet	
										m_o	m	Tab. 1 [3]	Bazin [1]
												m	m
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	57		0,10	58	1,000	1,000	1,000	0,00	3,04	0,397	0,403	0,380	0,419
	59	15	0,10	60	0,997	1,000	0,950	0,25	2,94	0,377	0,382		
	62	31	0,10	63	0,970	0,980	0,883	0,50	2,80	0,350	0,355		
	69	48	0,10	70	0,930	0,906	0,754	0,69	2,52	0,299	0,302		
	78	68	0,10	78	0,700	0,653	0,628	0,87	2,23	0,249	0,252		
20	83		0,19	85	1,000	1,000	1,000	0,00	2,06	0,444	0,458	0,414	0,428
	85	22	0,19	87	0,995	1,000	0,966	0,25	2,02	0,429	0,442		
	97	66	0,18	99	0,950	0,921	0,797	0,67	1,77	0,354	0,363		
	112	92	0,17	113	0,880	0,756	0,646	0,81	1,54	0,287	0,292		
	122	107	0,16	123	0,700	0,629	0,570	0,87	1,42	0,253	0,257		
25	94		0,23	97	1,000	1,000	1,000	0,00	1,81	0,456	0,475	0,418	0,432
	105	55	0,22	107	0,980	0,976	0,853	0,51	1,63	0,389	0,403		
	111	74	0,21	113	0,960	0,926	0,787	0,65	1,54	0,359	0,370		
	138	121	0,19	140	0,770	0,629	0,574	0,86	1,25	0,262	0,267		
	185	184	0,17	186	0,300	0,080	0,373	0,99	0,94	0,170	0,172		
30	105		0,26	108	1,000	1,000	1,000	0,00	1,61	0,460	0,483	0,420	0,436
	106	20	0,26	109	1,000	1,000	0,987	0,18	1,60	0,454	0,476		
	118	65	0,25	121	0,978	0,970	0,847	0,54	1,44	0,390	0,406		
	123	85	0,24	126	0,960	0,914	0,798	0,67	1,39	0,367	0,381		
	142	117	0,23	145	0,880	0,756	0,649	0,81	1,21	0,299	0,307		
35	104		0,30	109	1,000	1,000	1,000	0,00	1,61	0,53	0,57	0,420	0,436
	108	20	0,30	113	1,000	1,000	0,949	0,18	1,55	0,51	0,54		
	113	45	0,29	117	0,994	0,990	0,891	0,38	1,49	0,48	0,50		
	129	88	0,28	133	0,960	0,921	0,739	0,66	1,32	0,40	0,41		
	152	133	0,26	155	0,770	0,629	0,585	0,86	1,13	0,31	0,32		

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet

P3 – Přeliv obdélníkového průřezu se zaoblenými hranami

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet	
										m_o	m	m	m^*
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	53		0,11	54	1,000	1,000	1,000	0,00	3,27	0,442	0,449	0,375	0,394
	55	15	0,11	56	0,997	1,000	0,947	0,27	3,15	0,418	0,425		
	56	31	0,11	57	0,970	0,970	0,922	0,55	3,09	0,407	0,413		
	58	42	0,10	59	0,923	0,889	0,875	0,72	2,99	0,387	0,392		
	61	49	0,10	62	0,870	0,790	0,812	0,80	2,84	0,359	0,364		
20	78		0,19	80	1,000	1,000	1,000	0,00	2,19	0,485	0,503	0,412	0,433
	81	16	0,19	83	1,000	1,000	0,947	0,19	2,11	0,460	0,475		
	82	26	0,19	84	0,993	1,000	0,930	0,31	2,09	0,452	0,467		
	83	38	0,19	85	0,980	0,985	0,914	0,45	2,06	0,444	0,458		
	96	70	0,18	98	0,930	0,879	0,740	0,72	1,79	0,359	0,368		
25	89		0,23	92	1,000	1,000	1,000	0,00	1,91	0,493	0,516	0,416	0,437
	92	21	0,23	95	1,000	1,000	0,954	0,22	1,85	0,471	0,491		
	96	55	0,22	99	0,975	0,965	0,897	0,56	1,78	0,443	0,461		
	100	71	0,22	102	0,950	0,898	0,846	0,69	1,71	0,418	0,433		
	170	161	0,18	172	0,300	0,412	0,391	0,94	1,02	0,193	0,195		
30	99		0,27	103	1,000	1,000	1,000	0,00	1,71	0,500	0,528	0,420	0,441
	106	55	0,26	109	0,980	0,976	0,908	0,50	1,60	0,454	0,476		
	128	101	0,24	131	0,930	0,805	0,694	0,77	1,34	0,347	0,359		
	149	130	0,22	152	0,770	0,653	0,557	0,86	1,15	0,279	0,286		
	180	171	0,21	182	0,300	0,412	0,423	0,94	0,96	0,211	0,215		
35	109		0,30	114	1,000	1,000	1,000	0,00	1,54	0,50	0,53	0,42	0,441
	110	4	0,30	115	1,000	1,000	0,987	0,03	1,53	0,49	0,53		
	117	70	0,29	121	0,975	0,960	0,906	0,58	1,44	0,45	0,48		
	140	110	0,27	144	0,930	0,805	0,702	0,77	1,22	0,35	0,37		
	179	162	0,24	182	0,700	0,545	0,493	0,89	0,96	0,25	0,25		

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet, m^* - m zvýšené o 5 %

P4 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 1. typ

											model		výpočet
													Tab. 2 [1]
Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	m_o	m	m	
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
10	55		0,11	56	1,000	1,000	1,000	0,00	3,15	0,418	0,425	0,382	
	56	12	0,11	57	0,999	1,000	0,974	0,21	3,09	0,407	0,413		
	58	29	0,10	59	0,973	0,980	0,925	0,50	2,99	0,387	0,392		
	74	65	0,10	74	0,600	0,629	0,644	0,87	2,35	0,270	0,272		
	88	82	0,09	88	0,500	0,482	0,498	0,93	1,98	0,208	0,210		
20	81		0,19	83	1,000	1,000	1,000	0,00	2,11	0,460	0,475	0,403	
	82	1	0,19	84	1,000	1,000	0,982	0,01	2,09	0,452	0,467		
	85	28	0,19	87	0,995	1,000	0,933	0,32	2,02	0,429	0,442		
	86	48	0,19	88	0,973	0,968	0,917	0,55	1,99	0,422	0,435		
	136	127	0,16	137	0,500	0,482	0,469	0,93	1,28	0,216	0,219		
25	92		0,23	95	1,000	1,000	1,000	0,00	1,85	0,471	0,491	0,412	
	94	20	0,23	97	1,000	1,000	0,970	0,21	1,81	0,456	0,475		
	95	36	0,22	98	0,995	1,000	0,955	0,37	1,79	0,449	0,468		
	99	59	0,22	101	0,970	0,960	0,900	0,58	1,72	0,424	0,440		
	135	119	0,20	137	0,770	0,629	0,574	0,87	1,28	0,270	0,276		
30	102		0,26	106	1,000	1,000	1,000	0,00	1,66	0,480	0,505	0,420	
	106	35	0,26	109	0,995	1,000	0,947	0,32	1,60	0,454	0,476		
	113	69	0,25	116	0,973	0,956	0,865	0,59	1,51	0,415	0,433		
	136	113	0,23	139	0,870	0,709	0,663	0,81	1,26	0,318	0,328		
	166	155	0,21	168	0,500	0,431	0,496	0,92	1,04	0,238	0,243		
35	112		0,30	116	1,000	1,000	1,000	0,00	1,50	0,483	0,512	0,420	
	113	13	0,29	117	1,000	1,000	0,988	0,11	1,49	0,477	0,505		
	123	68	0,29	127	0,980	0,970	0,877	0,53	1,38	0,423	0,445		
	140	104	0,27	144	0,950	0,869	0,730	0,72	1,22	0,352	0,366		
	148	120	0,26	152	0,900	0,773	0,674	0,79	1,15	0,325	0,337		

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet

P5 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 2. typ

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet
										m_o	m	Tab. 2 [1]
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	56		0,11	57	1,000	1,000	1,000	0,00	3,09	0,407	0,413	0,382
	58	11	0,10	59	1,000	1,000	0,949	0,19	2,99	0,387	0,392	
	60	38	0,10	61	0,950	0,948	0,903	0,63	2,89	0,368	0,373	
	65	51	0,10	66	0,900	0,820	0,802	0,78	2,67	0,327	0,331	
	85	77	0,09	85	0,500	0,545	0,539	0,90	2,05	0,219	0,221	
20	83		0,19	85	1,000	1,000	1,000	0,00	2,06	0,444	0,458	0,405
	85	23	0,19	87	0,995	1,000	0,966	0,27	2,02	0,429	0,442	
	92	62	0,18	94	0,955	0,926	0,861	0,66	1,87	0,382	0,393	
	99	71	0,18	101	0,940	0,889	0,774	0,71	1,74	0,343	0,352	
	155	149	0,15	156	0,300	0,330	0,400	0,95	1,12	0,178	0,180	
25	94		0,23	97	1,000	1,000	1,000	0,00	1,81	0,456	0,475	0,413
	97	38	0,22	100	0,990	1,000	0,956	0,38	1,76	0,436	0,453	
	119	91	0,21	121	0,930	0,846	0,712	0,75	1,44	0,325	0,334	
	128	107	0,20	130	0,850	0,719	0,640	0,82	1,35	0,292	0,299	
	180	172	0,17	181	0,300	0,330	0,388	0,95	0,96	0,177	0,179	
30	103		0,26	106	1,000	1,000	1,000	0,00	1,64	0,473	0,497	0,420
	105	5	0,26	108	1,000	1,000	0,973	0,05	1,61	0,460	0,483	
	107	35	0,26	110	0,995	1,000	0,947	0,32	1,59	0,448	0,470	
	120	74	0,25	123	0,970	0,952	0,805	0,60	1,42	0,381	0,395	
	135	107	0,23	138	0,900	0,805	0,679	0,78	1,27	0,321	0,331	
35	113		0,29	117	1,000	1,000	1,000	0,00	1,49	0,477	0,505	0,420
	116	11	0,29	120	1,000	1,000	0,964	0,09	1,45	0,459	0,485	
	116	33	0,29	120	1,000	1,000	0,964	0,27	1,45	0,459	0,485	
	120	58	0,29	124	0,985	0,982	0,919	0,47	1,41	0,438	0,461	
	142	106	0,27	146	0,950	0,858	0,724	0,73	1,20	0,345	0,358	

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet

P6 - Přeliv lichoběžníkového průřezu - 3. typ

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet	
										m_o	m	m	m^*
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	54		0,11	55	1,000	1,000	1,000	0,00	3,21	0,430	0,437	0,380	0,401
	54	10	0,11	55	1,000	1,000	1,000	0,18	3,21	0,430	0,437		
	55	23	0,11	56	0,988	1,000	0,973	0,41	3,15	0,418	0,425		
	56	30	0,11	57	0,970	0,972	0,948	0,53	3,09	0,407	0,413		
	61	50	0,10	62	0,870	0,756	0,835	0,81	2,84	0,359	0,364		
20	79		0,19	81	1,000	1,000	1,000	0,00	2,16	0,477	0,494	0,400	0,420
	81	18	0,19	83	1,000	1,000	0,965	0,22	2,11	0,460	0,475		
	82	25	0,19	84	0,993	1,000	0,948	0,30	2,09	0,452	0,467		
	91	71	0,18	93	0,920	0,820	0,815	0,77	1,89	0,388	0,399		
	117	105	0,17	118	0,500	0,575	0,564	0,89	1,48	0,269	0,274		
25	89		0,23	92	1,000	1,000	1,000	0,00	1,91	0,493	0,516	0,408	0,428
	91	16	0,23	94	1,000	1,000	0,969	0,17	1,87	0,478	0,499		
	93	30	0,23	96	0,995	1,000	0,939	0,31	1,83	0,463	0,483		
	96	59	0,22	99	0,965	0,957	0,897	0,60	1,78	0,443	0,461		
	137	125	0,19	139	0,500	0,545	0,536	0,90	1,26	0,265	0,270		
30	99		0,27	103	1,000	1,000	1,000	0,00	1,71	0,500	0,528	0,417	0,438
	101	23	0,26	105	1,000	1,000	0,972	0,22	1,67	0,486	0,512		
	104	35	0,26	107	0,995	1,000	0,933	0,33	1,63	0,467	0,490		
	108	70	0,26	111	0,980	0,940	0,884	0,63	1,57	0,442	0,463		
	117	89	0,25	120	0,925	0,846	0,789	0,74	1,46	0,395	0,411		
35	109		0,30	114	1,000	1,000	1,000	0,00	1,54	0,501	0,533	0,420	0,441
	112	12	0,30	116	1,000	1,000	0,963	0,10	1,50	0,483	0,512		
	115	62	0,29	119	0,980	0,972	0,928	0,52	1,47	0,465	0,492		
	122	87	0,29	126	0,950	0,898	0,854	0,69	1,39	0,428	0,450		
	135	105	0,27	139	0,930	0,820	0,740	0,76	1,26	0,371	0,387		

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet, m^* - m zvýšené o 5 %

P7 – Přeliv lichoběžníkového průřezu - 4. typ

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet	
										m_o	m	m	m^*
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	53		0,11	54	1,000	1,000	1,000	0,00	3,27	0,442	0,449	0,381	0,400
	54	5	0,11	55	1,000	1,000	0,973	0,09	3,21	0,430	0,437		
	55	16	0,11	55	0,993	1,000	0,960	0,29	3,18	0,424	0,431		
	55	26	0,11	56	0,977	0,984	0,947	0,47	3,15	0,418	0,425		
	58	42	0,10	59	0,920	0,889	0,875	0,72	2,99	0,387	0,392		
20	77		0,19	79	1,000	1,000	1,000	0,00	2,22	0,495	0,513	0,402	0,422
	80	5	0,19	82	1,000	1,000	0,946	0,06	2,14	0,468	0,484		
	82	35	0,19	84	0,985	0,988	0,913	0,42	2,09	0,452	0,467		
	94	73	0,18	96	0,930	0,820	0,749	0,76	1,83	0,370	0,380		
	132	122	0,16	133	0,500	0,515	0,455	0,92	1,31	0,225	0,229		
25	87		0,23	90	1,000	1,000	1,000	0,00	1,95	0,510	0,534	0,409	0,429
	91	15	0,23	94	1,000	1,000	0,938	0,16	1,87	0,478	0,499		
	92	20	0,23	95	1,000	1,000	0,923	0,21	1,85	0,471	0,491		
	96	55	0,22	99	0,960	0,966	0,869	0,56	1,78	0,443	0,461		
	127	110	0,20	129	0,770	0,653	0,580	0,85	1,36	0,295	0,303		
30	97		0,27	101	1,000	1,000	1,000	0,00	1,74	0,515	0,544	0,416	0,437
	101	12	0,26	105	1,000	1,000	0,945	0,11	1,67	0,486	0,512		
	102	25	0,26	105	1,000	1,000	0,938	0,24	1,67	0,483	0,508		
	102	36	0,26	106	0,995	1,000	0,932	0,34	1,66	0,480	0,505		
	132	107	0,24	135	0,900	0,773	0,645	0,79	1,30	0,332	0,343		
35	107		0,30	112	1,000	1,000	1,000	0,00	1,57	0,514	0,548	0,420	0,441
	110	11	0,30	115	1,000	1,000	0,962	0,10	1,53	0,495	0,526		
	118	61	0,29	122	0,983	0,978	0,872	0,50	1,43	0,449	0,473		
	136	104	0,27	140	0,930	0,846	0,713	0,74	1,25	0,367	0,382		
	146	120	0,26	150	0,900	0,756	0,645	0,80	1,17	0,332	0,344		

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet, m^* - m zvýšené o 5 %

P8 – Přeliv lichoběžníkového průřezu s kruhově zaoblenou korunou

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet			
										m	m_o	Rehbock [3]	Kramer [6]	Franke [6]	Stara [5]
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	m	m	m	m
10	49		0,11	50	1,000	1,000	1,000	0,00	3,53	0,505	0,496	0,529	0,532	0,399	0,518
	50	4	0,11	51	1,000	1,000	0,971	0,08	3,46	0,490	0,482				
	50	14	0,11	51	0,995	1,000	0,971	0,28	3,46	0,490	0,482				
	53	30	0,11	54	0,970	0,966	0,891	0,56	3,27	0,449	0,442				
	69	60	0,10	70	0,700	0,653	0,603	0,86	2,52	0,302	0,299				
20	72		0,20	74	1,000	1,000	1,000	0,00	2,37	0,567	0,545	0,569	0,582	0,436	0,553
	75	10	0,19	77	1,000	1,000	0,943	0,13	2,28	0,534	0,514				
	77	21	0,19	79	0,995	1,000	0,908	0,27	2,22	0,513	0,495				
	90	73	0,18	92	0,870	0,773	0,724	0,80	1,91	0,406	0,395				
	112	100	0,17	113	0,600	0,602	0,526	0,88	1,54	0,292	0,287				
25	82		0,24	85	1,000	1,000	1,000	0,00	2,06	0,583	0,554	0,583	0,602	0,451	0,563
	86	10	0,23	89	1,000	1,000	0,935	0,11	1,97	0,543	0,518				
	87	21	0,23	90	0,998	1,000	0,919	0,23	1,95	0,534	0,510				
	89	42	0,23	92	0,983	0,984	0,890	0,46	1,91	0,516	0,493				
	92	57	0,23	95	0,960	0,955	0,849	0,60	1,85	0,491	0,471				
30	92		0,27	96	1,000	1,000	1,000	0,00	1,83	0,589	0,554	0,594	0,622	0,466	0,569
	95	7	0,27	99	1,000	1,000	0,956	0,07	1,77	0,561	0,530				
	101	59	0,26	105	0,975	0,964	0,877	0,56	1,67	0,512	0,486				
	107	81	0,26	110	0,930	0,846	0,808	0,73	1,59	0,470	0,448				
	135	121	0,23	138	0,600	0,575	0,580	0,88	1,27	0,331	0,321				
35	102		0,31	107	1,000	1,000	1,000	0,00	1,64	0,589	0,550	0,603	0,642	0,481	0,573
	104	12	0,30	109	1,000	1,000	0,973	0,11	1,61	0,572	0,535				
	108	41	0,30	113	0,995	0,990	0,924	0,36	1,55	0,540	0,508				
	116	84	0,29	120	0,950	0,889	0,836	0,70	1,45	0,485	0,459				
	124	100	0,28	128	0,900	0,773	0,761	0,78	1,37	0,439	0,418				

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet

P9 – Scimemiho plocha

Q	h	h_z	v_0	h_0	σ_{z1}	σ_{z2}	σ_z	h_z/h_0	s_1/h_0	model		výpočet
										m	m_o	dle Smetany [1]
[l/s]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	51		0,12	52	1,000	1,000	1,000	0,00	2,90	0,476	0,466	0,482
	51	7	0,12	52	1,000	1,000	1,000	0,14	2,90	0,476	0,466	
	51	14	0,12	52	0,995	1,000	1,000	0,27	2,90	0,476	0,466	
	59	51	0,12	60	0,700	0,677	0,807	0,85	2,51	0,382	0,376	
	86	81	0,10	87	0,400	0,449	0,462	0,94	1,73	0,217	0,215	
20	77		0,21	79	1,000	1,000	1,000	0,00	1,89	0,513	0,490	0,519
	77	14	0,21	79	1,000	1,000	1,000	0,18	1,89	0,513	0,490	
	77	27	0,21	79	0,993	1,000	1,000	0,34	1,89	0,513	0,490	
	78	46	0,21	80	0,970	0,962	0,982	0,57	1,87	0,503	0,482	
	84	68	0,21	86	0,890	0,790	0,883	0,79	1,74	0,450	0,433	
25	88		0,25	91	1,000	1,000	1,000	0,00	1,64	0,525	0,496	0,533
	88	8	0,25	91	1,000	1,000	1,000	0,09	1,64	0,525	0,496	
	89	53	0,25	92	0,975	0,962	0,984	0,57	1,63	0,516	0,489	
	95	77	0,25	98	0,900	0,984	0,898	0,78	1,53	0,468	0,446	
	115	101	0,23	118	0,850	0,773	0,684	0,86	1,27	0,351	0,339	
30	97		0,29	101	1,000	1,000	1,000	0,00	1,48	0,544	0,509	0,543
	97	15	0,29	101	1,000	1,000	1,000	0,15	1,48	0,544	0,509	
	97	28	0,29	101	1,000	1,000	1,000	0,28	1,48	0,544	0,509	
	100	62	0,29	104	0,973	0,955	0,959	0,59	1,44	0,520	0,488	
	125	118	0,26	129	0,500	0,449	0,701	0,92	1,17	0,372	0,357	
35	107		0,33	113	1,000	1,000	1,000	0,00	1,33	0,548	0,508	0,555
	107	40	0,33	113	1,000	1,000	1,000	0,36	1,33	0,548	0,508	
	107	49	0,33	113	0,990	0,985	1,000	0,44	1,33	0,548	0,508	
	115	85	0,32	120	0,920	0,869	0,906	0,71	1,25	0,492	0,460	
	150	136	0,28	154	0,700	0,926	0,624	0,88	0,97	0,330	0,317	

Pozn.: σ_{z1} – dle Denverského grafu [4], σ_{z2} – dle tabulky Oficerova a Istominy [1], σ_z - výpočet