

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

STANOVENÍ PRŮTOČNÝCH A ZATĚŽOVACÍCH
CHARAKTERISTIK HLADINOVÝCH KLAPKOVÝCH
UZÁVĚRŮ POMOCÍ FYZIKÁLNÍHO A NUMERICKÉHO
MODELOVÁNÍ

DETERMINATION OF FLOW AND LOAD CHARACTERISTICS OF SURFACE
FLAP GATES THROUGH PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING.

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

OBOR

Vodní hospodářství a vodní stavby

AUTOR PRÁCE

Ing. DANIEL PICKA

ŠKOLITEL

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Klíčová slova

Klapkový jez, fyzikální a matematické modelování, CFD, průtočná kapacita, zatížení od hydrodynamického účinku proudu, zatěžovací charakteristiky, automodelovost, proudění.

Keywords

Flap gate weir, physical and mathematical modeling, CFD, flow capacity, load from hydrodynamic effect of a flow, load characteristics, similarity bounds, flow.

Disertační práce je uložena v Knihovnickém informačním centru Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	POSTUP TVORBY DIZERTAČNÍ PRÁCE A JEJÍ CÍLE.....	6
3	STRUČNÝ POPIS HRADICÍ HLADINOVÉ KLAPKY	7
4	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	9
4.1	Zásady modelové podobnosti u obtékaných pohyblivých přelivných konstrukcí	9
4.2	Vliv dolní vody na průtočné charakteristiky	10
4.3	Vliv dolní vody na zatěžovací charakteristiky	13
5	EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM	15
5.1	Popis fyzikálních modelů	15
6	NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ - CFD	20
7	PRŮTOČNÉ CHARAKTERISTIKY PŘI OVLIVNĚNÍ DOLNÍ VODOU.....	22
8	ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY PŘI OVLIVNĚNÍ DOLNÍ VODOU	27
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	28
10	PUBLIKACE AUTORA.....	29
11	AUTOROVO CURRICULUM VITAE.....	30

1 ÚVOD

V současné době se stále častěji setkáváme se zvýšenými stavy hladin vodních toků. Jmenujme zejména extrémní povodně na Moravě v roce 1997, v Čechách 2002, při jarních táních v letech 2006 a 2011 či v letních obdobích v roce 2009 a 2013. Jako reakce na časté povodně se zvyšují v souladu s legislativními požadavky návrhové průtoky, dochází k zpřesňování hydrologických dat. To klade požadavky na vyšší převáděné průtoky a tím i vyšší zatížení hladinových klapek jak při provozních podmínkách, tak při extrémních případech vodních stavů, kdy dochází často k selhání jejich pohonů. Modelování těchto extrémních zatěžovacích stavů je z důvodů bezpečnosti a stability hradičních konstrukcí stále předmětem zájmu projektantů a vědeckých pracovníků.

Pomocí modelování zkoumané konstrukce dokážeme předcházet kritickým stavům, při kterých dochází ke ztrátě stability konstrukce či určit kapacitu přelivu při různých stavech hladin horní a dolní vody. Tím dokážeme s velkou přesností předpovědět, jak se bude daná konstrukce chovat v reálném provozu.

Modelování hydrodynamických jevů a řešení úloh hydrodynamiky lze rozdělit na metody matematické (matematické modelování pomocí numerických metod) a na metody experimentální (fyzikální modelování).

Matematické modelování je v současné době realizováno pomocí numerických simulací proudění tekutin známých pod zkratkou CFD (Computational Fluid Dynamics). Simulace CFD jsou v současné době zpravidla založeny na metodě konečných objemů.

Využitelnost CFD se zvyšuje s rostoucí výpočetní kapacitou a výkonem současných počítačů. Možnosti výpočetní techniky a numerických metod začínají dosahovat úrovně potřebné k řešení složitých úloh, které teorie proudění prostřednictvím soustav diferenciálních rovnic nabízí. Nutností využití této metody pro potřeby hydrotechnických výpočtů je potřeba dostatečně kvalitního výpočetního zázemí a odpovídající rozsah znalostí z oboru CFD. Náročnost metody se odvíjí od charakteru modelu a konkrétních okrajových a omezujících podmínek. Nevýhodou matematických modelů je potřeba počáteční kalibrace a následné validace modelu nejlépe fyzikálním či již s ověřeným numerickým modelem.

Fyzikální modelování je experimentální metoda, pomocí které je možné zkoumat fyzikální jevy na zpravidla zmenšených modelech. Fyzikální modelování v hydrotechnickém výzkumu je založeno na teorii mechanické podobnosti hydrodynamických jevů. Jedná se o dlouhá léta nejrozšířenější a nejvšestrannější metodu řešení hydraulických problémů. Výhodou je možnost řešení i prostorově složitých hydraulických jevů. Nevýhodou jsou prostorová a finanční náročnost, požadavky na kvalifikovaný řešitelský kolektiv a menší variabilita modelu oproti matematickému modelování.

Klapka v podmínkách neovlivněného proudění již byla podrobně prozkoumána na fyzikálním modelu a výsledky popsány ve výzkumných zprávách. Jeden výzkum byl nalezen i pro CFD simulaci. Výzkum zaměřený na chování klapkové konstrukce při ovlivnění dolní vodou nebyl nalezen. Poslední výzkum věnovaný proudění přes klapkovou konstrukci byl nalezen z roku 2011.

Předkládaná práce je primárně zaměřena na vyšetření a bližší poznání vlivu dolní vody na průtočné a tlakové charakteristiky hladinové klapky Čábelkova typu ($R = 2,25H$).

2 POSTUP TVORBY DIZERTAČNÍ PRÁCE A JEJÍ CÍLE

Předložená dizertační práce je tematicky zaměřena na fyzikální a numerické modelování proudění (CFD) přes pohyblivý přeliv - klapkový uzávěr při ovlivnění hladinou dolní vody. Konkrétním zkoumaným objektem byla hladinová klapka s poloměrem návodního líce $R = 2,25H$, typ který navrhl a modelově ověřil Čábelka [1]. Toto uspořádání představovalo v 80. a 90. letech minulého století typizovanou konstrukci v ČR.

Postup lze shrnout do následujících bodů:

- Rešerše dostupné literatury a zajištění podkladů o provedených výzkumech hladinového klapkového uzávěru.
- Vypracování teoretického postupu pro návrh a výstavbu rodiny fyzikálních modelů. Celkem byly postaveny tři modelově podobné objekty, první prototypový, druhý byl zmenšený v měřítku 1:2 a třetí 1:2,5 vůči prototypu.
- Vypracování postupu měření pro získání směrodatných hodnot - zatěžovacích a proudových charakteristik za různých okrajových podmínek.
- Měření na fyzikálních modelech.
- Zpracování a vyhodnocení dat získaných z měření na fyzikálních modelech.
- Vyhledání vhodného softwaru pro řešení úloh numerického modelování CFD.
- Sestavení numerického modelu, porovnání různých přístupů pro řešení turbulentního proudění, testování vhodných turbulentních modelů.
- Numerické modelování vybraných stavů při aplikaci výsledků z fyzikálního modelování, validace a kalibrace numerických modelů.
- Porovnání výstupů z fyzikálního a numerického modelu.
- Praktická aplikace poznatků, zhodnocení numerických modelů.

Cíle práce:

Hlavní:

- Prozkoumat a kvantifikovat vliv dolní vody v podjezí na průtočné a zatěžovací charakteristiky jezové klapky.

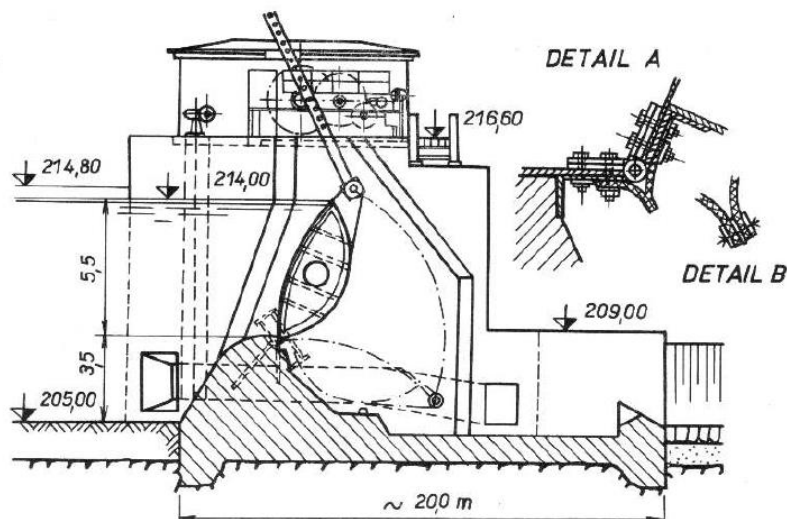
Dílčí:

- Navrhnout a postavit výsekové fyzikální modely klapkového uzávěru.
- Naměřit charakteristické veličiny na fyzikálním modelu.
- Realizovat výpočty při aplikování metody CFD, sestavit numerický model.
- Najít vhodný turbulentní model pro výpočty CFD.
- Numericky modelovat vybrané stavy.
- Porovnat výsledky z fyzikálního a CFD modelování.
- Učinit závěry a doporučení pro fyzikální a numerické modelování a další výzkum v oblasti hladinových klapek.

3 STRUČNÝ POPIS HRADICÍ HLADINOVÉ KLAPKY

Dutá klapka do hradicí výšky přibližně 5,0 m je u nás i v zahraničí nejčastěji používaným uzávěrem na pohyblivých jezích. Má čochovitý tvar a je tvořena ze dvou zaoblených plechů. Na návodní stěně je hradicí plech poloměru R a na straně vzdušní vyztužený plech menšího poloměru R_1 . Příčně se klapka vyztužuje diafragami, tj. příčnými plechy připojenými k oběma válcovým stěnám. Uzavřený prostor mezi oběma plechy je opatřen průlezným otvorem pro kontrolu těsnosti a spolehlivosti konstrukce. V tomto prostoru jsou umístěny i malé vypouštěcí otvory sloužící pro odtok vody a otvory pro zavzdušnění prostoru. Bez nich by se klapka chovala ve sklopené poloze jako velký plovák.

Ke spodní stavbě je dutá klapka připojena buď závěsnými a nebo častěji čepovými ložisky. Pohyb bývá jednostranný pomocí cévové tyče (dřívější mechanické řešení) anebo v současnosti často navrhovaným hydromotorem.



Obr. 1 Zavěšená dutá klapka [2], v detailu jsou uvedeny typy těsnění, dnes se využívá typ B – těsnění ze dvou pryžových pásů.

Tvar příčného řezu dutých klapek se navrhuje tak, aby byla hradicí konstrukce namáhána co nejméně hydrodynamickým zatížením. Ve sklopené poloze má mít ocelová konstrukce takový tvar, aby se pro návrhový průtok vytvořila beztlaková plocha. Při průtocích vyšších než návrhový průtok se přelivná plocha stává podtlakovou a výhodně se zvětšuje její průtočná kapacita. Naopak při menších průtocích než je návrhový, je přelivná plocha tlaková a snižuje se její kapacita, což u regulačního orgánu není na závadu.

V ČR je nejčastěji používaný tvar klapky podle prof. Čábelky o poloměru návodního líce $R = 2,25H$, kde H je návrhová hradicí výška přelivné konstrukce. V západoevropských zemích se setkáváme s klapkovými uzávěry s větším poloměrem zakřivení, v některých případech až $R \approx \infty$. Pokud přechází přes klapkovou konstrukci průtok větší, než návrhový můžeme se setkat s chvěním konstrukce, což může vést v konečném důsledku k havárii.

Také podtlak pod přepadovým paprskem má velký vliv na stabilitu konstrukce hladinové klapky. Jak uvádí Šulc [3] velikost podtlaku je nejobtížněji stanovitelná veličina ze všech dílčích zatížení a to jak z pohledu přepočtu modelových výsledků, tak i z hlediska teoretických výpočtů. Pokud bychom chtěli zjistit maximální hodnoty podtlaků, bylo by nutné je naměřit na skutečné klapkové konstrukci. To je v praxi však neschůdné a to hlavně z bezpečnostních důvodů.

Různí autoři uvádějí odlišné hodnoty podtlaků, které mohou vzniknout pod klapkovou konstrukcí v zavzdušněném prostoru. Autoři v publikaci [4] uvádějí hodnoty podtlaků 200 – 500 Pa. Levin v publikaci [5] uvažuje s hodnotami 500 až 1000 Pa. Prachař [6] uvádí ve svém příspěvku maximální přípustný podtlak do 5000 Pa. Všechny zde vyjmenované hodnoty podtlaků jsou uvažovány jako maximální přípustné při dimenzování zavzdušňovacího potrubí.

Klapky bez zavzdušněného prostoru pod přepadovým paprskem jsou přirozeně daleko více zatíženy podtlakem než v případě prostoru zavzdušněného. V literatuře [7] jsou uvedeny dvě opravdu extrémní hodnoty, 18500 Pa a dokonce 25600 Pa. Pro představu je dobré uvést i hodnotu podtlaku pro klapku provozovanou v našich podmínkách. Jak je uvedeno v [3], měření na klapkové konstrukci v Terezíně na Ohři (hradicí výška $H = 2,3$ m, šířka $b = 22$ m, výška přepadového paprsku $h = 0,99$ m a úhel sklopení $\alpha = 45^\circ$) prokázalo při zakrytí zavzdušňovacího potrubí podtlak 1500 Pa.

Na základě zkušeností s hydraulickým výzkumem došlo k doporučenému návrhu příčného řezu v ČR typizované jezové klapky. Rozměry jednotlivých částí klapky jsou stanoveny na základě poznatků z dosud realizovaných konstrukcí a jejich chování.

4 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

4.1 ZÁSADY MODELOVÉ PODOBNOSTI U OBTÉKANÝCH POHYBLIVÝCH PŘELIVNÝCH KONSTRUKCÍ

Při obtékání klapkového uzávěru vodním proudem o volné hladině působí více sil současně. Podle [8] je možné vyšetřovat na fyzikálním modelu bez velkých problémů takové hydraulické jevy, u kterých naprosto převládá (dominuje) pouze jedna síla.

Abychom omezili vliv sil vnitřního tření, je nutné na fyzikálním modelu zachovat bezpečnou hranici přepadové výšky pro zaoblené koruny:

$$h \geq 50 \text{ mm.} \quad (4.1)$$

Tato hodnota je doporučena v odborné literatuře [9]. Upřesnění této hodnoty pro zaoblené tvary bylo dílčí částí této práce.

Z tohoto výzkumu, bylo zjištěno, že mez přepadové výšky pro omezení vlivu vnitřního tření je podstatným způsobem závislá na úhlu sklopení klapky α , kdy v některých pozicích při vztyčení se proud odtrhává od odtokové hrany.

Podle Levina [5], abychom omezili vliv vnitřního tření při proudění o volné hladině, nesmí hodnota Reynoldsova kritéria klesnout pod uvedenou mez:

$$\text{Re}_{\text{krit}} = \frac{q}{\gamma} = 5000, \quad (4.2)$$

kde

Re_{krit} - kritická hodnota Reynoldsova kritéria [-],

q - specifický průtok [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

γ - kinematická viskozita vody [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], která se používá při fyzikálním modelování, je závislá na teplotě vody.

Pokud současně dodržíme podmínky (4.1) a (4.2) můžeme si být jisti, že na fyzikální model působí převážně síly gravitační. Účinky dalších sil (kapilární, objemové, třením) jsou v poměru k silám gravitačním zanedbatelné a proto

můžeme modelovat podle Froudova zákona mechanické podobnosti (někdy též nazýván Reechův - Froudův zákon) [8].

Pro Froudovo kritérium platí vztah:

$$Fr = \frac{v^2}{gh} = idem., \quad (4.3)$$

kde

v - vztažná rychlost (ve vztažném profilu) [$m \cdot s^{-1}$],

h - charakteristický rozměr, zde hloubka proudu [m],

g - gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$], uvažováno $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$.

Froudův zákon mechanické podobnosti vyjadřuje, že kinematicky podobné jevy, jež jsou ovlivňovány výhradně gravitačními silami jsou si i dynamicky podobné, jestliže se v sobě vzájemných vztažných profilech obou těchto jevů budou stejné hodnoty Froudova kritéria [8].

4.2 VLV DOLNÍ VODY NA PRŮTOČNÉ CHARAKTERISTIKY

Průtok přes přeliv se stanoví podle obecně známé tzv. přepadové rovnice:

$$Q = \sigma_z m b \sqrt{2g} h_o^{1,5} \quad (4.4)$$

σ_z - součinitel zatopení [-], u dokonalého přepadu (nezatopeného) platí

$$\sigma_z = 1,0,$$

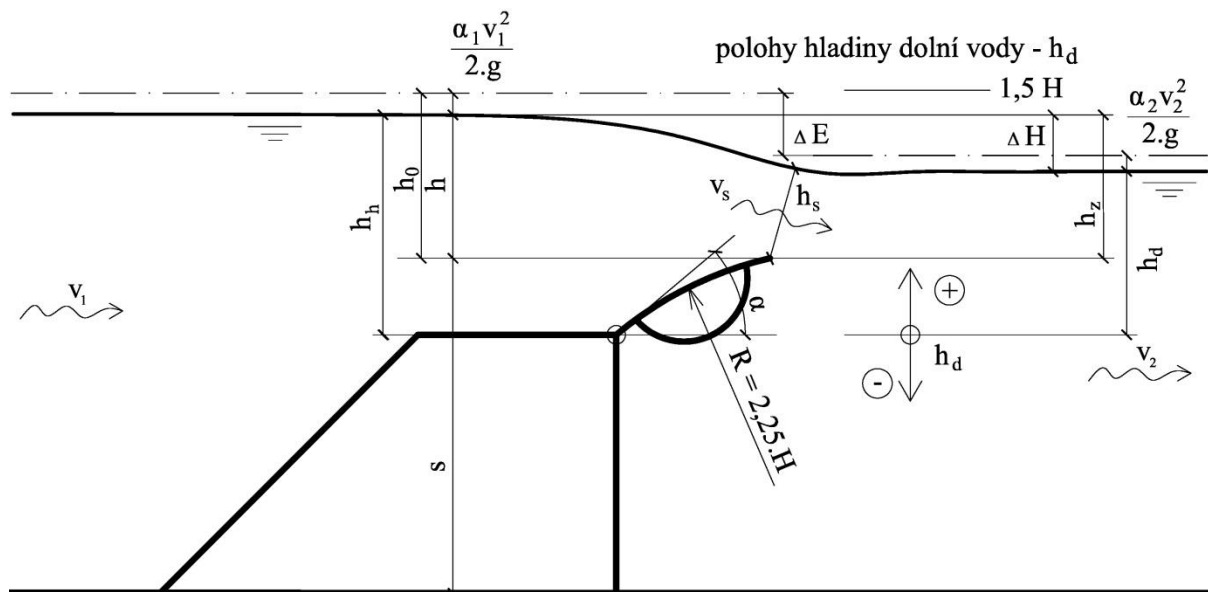
m - přepadový součinitel nezatopeného přelivu [-],

b - účinná délka přelivné hrany [m],

g - gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

h_o - výška přepadového paprsku zvětšená o rychlostní výšku přítokové

rychlosti v_1 [m], platí $h_o = h + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$.



Obr. 2 Schéma pro výpočet průtočné kapacity.

Lze konstatovat, že průtok přes jezové těleso může nabývat při zatopení dolní vodou tří forem. Při úrovních hladiny dolní vody definovaných nerovností (4.8):

$$h_z / h_0 < 0,75, \quad (4.5)$$

kde

h_z - hloubka zatopení dolní vodou [m],

jedná se o tzv. **první fázi** zatopení dolní vodou, např. [12].

V této fázi hladina dolní vody ovlivňuje proudové charakteristiky nad korunou přelivu a v některých případech i hladinu horní vody.

Při dosažení či překročení poměru 0,75 ve vztahu (4.8) nastává **druhá fáze** zatopení dolní vodou, která je provázena nestabilitou jevu. Může vzniknout vodní skok se střídavě horním i dolním válcem nebo s oběma válci zároveň či dokonce vlnovitý vodní skok (platí pro sklopenou klapku).

Třetí fáze zatopení je charakterizována tzv. říčním prouděním ($Fr < 1$), kdy již nevzniká přechod z bystřinného proudění do říčního. Hloubka dolní vody je podstatně větší než hloubka kritická. Spád mezi hladinami v nadjezí a podjezí je minimální. Tato forma podle Knappa [13] bezpečně nastane při překročení hranice zatopení:

$$h_z \geq 2 \cdot h_k, \quad (4.6)$$

kde

h_k - kritická hloubka v profilu nad korunou přelivu (kontrakce) [m].

Výše zmíněné fáze zatopení platí pro dynamicky tvarované konstrukce, v našem případě při sklopení klapkového uzávěru.

Pro stanovení režimu proudění se používá bezrozměrné Froudovo kritérium (4.10), které bude aplikováno na profil koruny či hranu klapky:

$$Fr = \frac{v_s}{\sqrt{gh_s}}, \quad (4.7)$$

kde

v_s - průřezová rychlost v profilu hrany (koruny) [$m \cdot s^{-1}$], viz Obr. 2,

g - gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

h_s - výška paprsku v profilu hrany (koruny) [m] kolmo k hladině.

Pro Froudovo kritérium platí:

$Fr = 1$ - kritický režim,

$Fr < 1$ - říční proudění,

$Fr > 1$ - bystrinné proudění.

Podle Bachmětěva [14] je přepad nedokonalý pokud zároveň platí tyto dvě podmínky:

$$h_d > s, \quad (4.8)$$

$$\Delta H/s < (\Delta H/s)^*, \quad (4.9)$$

kde

h_d - hloubka dolní vody v podjezí [m] (převýšení hladiny nad úrovní hrany nebo čepu klapky),

s - výškový rozdíl úrovní dna v podjezí a přelivné hrany [m],

ΔH - výškový rozdíl úrovní hladin v nadjezí a podjezí [m],

Význam symbolů je patrný z Obr. 2.

Mezní hodnoty $\Delta H/s$ pro zatopený přepad pro obecné jezové těleso závisí na poměru přepadové výšky k výšce konstrukce nade dnem a na součiniteli přepadu m . Mezní hodnoty přímo pro klapkový hladinový uzávěr nebyly v dostupné literatuře nalezeny. Proto lze považovat zjednodušeně přepad za nedokonalý, pokud hladina dolní vody dosahuje či převyšuje výšku hrany či koruny přelivu. U pohyblivých hradicích konstrukcí je vyjádření mezní hodnoty poměrně obtížné. Její přesná znalost však z důvodů sledování zatížení a modelování hladinových poloh není nezbytná.

Zmenšení průtočné kapacity přelivu se nejčastěji vyjadřuje pomocí součinitele zatopení σ_z , který má hodnotu menší než 1,0. Součinitel zatopení m_σ je závislý na míře zatopení dolní vodou, tvaru přelivné konstrukce, tvaru vzdušného líce spodní stavby a její poloze (u pohyblivých přelivů).

Pro přepadový součinitel zatopeného přelivu platí:

$$m_\sigma = m \cdot \sigma_z. \quad (4.10)$$

4.3 VLIV DOLNÍ VODY NA ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY

Vliv zatížení od hydrodynamického účinku proudu na klapkový hladinový uzávěr bez ovlivnění zatěžovacích charakteristik dolní vodou byl již podrobně zkoumán a rozebrán několika autory, jak u nás [1], [15], tak v zahraničí [16], [17]. Vlivem dolní vody na silové a tím i momentové charakteristiky se zabývalo podstatně menší množství publikací. Z tehdejších československých jmenujme [18], [19], [20]. Ze zahraničí je nám dostupná literatura [16]. Poznatky o vlivu dolní vody jsou shrnuty v publikaci [22].

Podstatným zatížením pro dimenzování klapek je tlak vyvozený hydrodynamickým účinkem proudu vody. Potřebné hodnoty tlaku je možno stanovit přibližně výpočtem anebo přesněji experimentálním výzkumem na fyzikálním modelu hradičícího tělesa.

Výsledky sil a momentů působících na klapkový hladinový uzávěr jsou ovlivněny hladinou horní vody (h_h), hladinou dolní vody (h_d), tvarem a hloubkou dna v podjezí, poloměrem klapky a její polohou. Naopak tvar pevné stavby v nadjezí má jen minimální vliv na zatěžovací charakteristiky. Pak můžeme psát při využití superpozičního principu podle [21]:

$$M = M_h + M_d + M_p, \quad (4.11)$$

kde

M - celkový moment vyvozený na klapkový uzávěr,

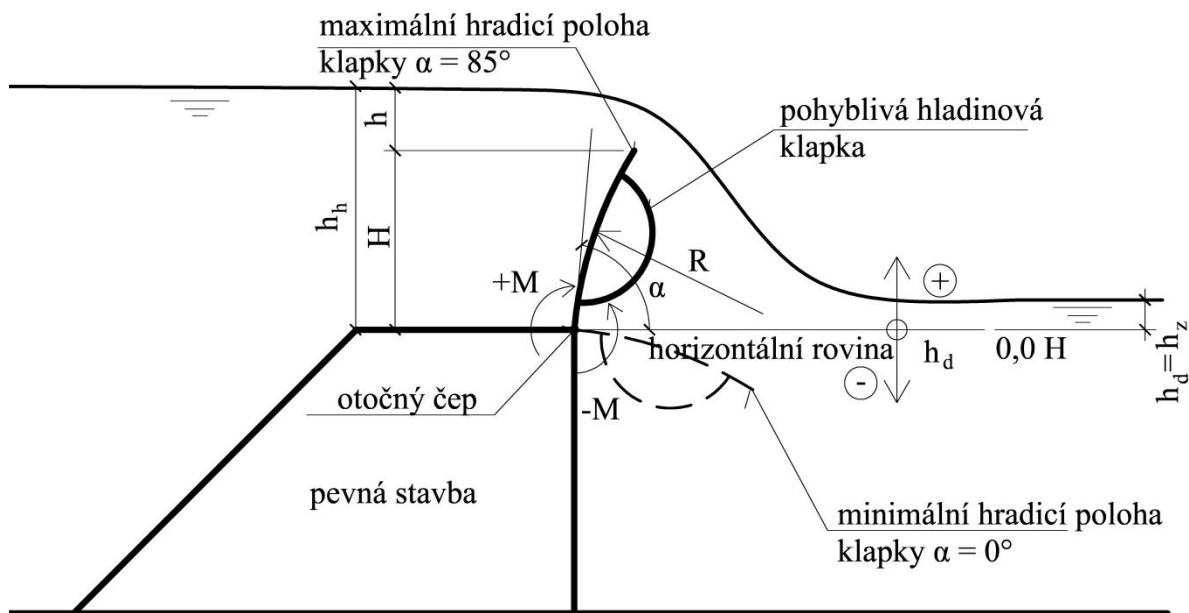
M_h - moment vyvozený na klapkový uzávěr od účinků horní vody,

M_d - moment vyvozený na klapkový uzávěr od účinků dolní vody,

M_p - moment vyvozený na klapkový uzávěr od podtlaku.

Zmíněný superpoziční princip v rovnici (4.14) nelze použít ve všech případech. Superpoziční řešení je v dnešní době vhodné použít pouze v těch případech, kdy hladina dolní vody neovlivňuje konstrukci klapky (jedná se o dokonalý přepad). Již v první fázi ovlivnění dolní vodou, uvádí článek [12], dochází ke změně rozdělení tlaků na návodním líci a tím i ovlivnění průtoku a úrovně hladiny horní vody.

V případech, kdy je přeliv ovlivněn dolní vodou bylo zjišťováno modelovým měřením zatížení celkové, tzn. od účinků horní i dolní vody. Vliv podtlaku v prostoru pod přepadovým paprskem se při zatopení dolní vodou neprojevuje. Na Obr. 3 je znázorněno schéma značení momentů a ostatních proměnných nutných k jednoznačné identifikaci problematiky.



Obr. 3 Výpočtové schéma pro stanovení zatížení klapkového uzávěru.

Dílčí zatížení od dolní vody je podle dostupné literatury např. [17] či [21] závislé na těchto aspektech:

- poloze hladiny horní vody,
- poloze hladiny dolní vody,
- tvaru podjezí (spodní stavby),
- tvaru konstrukce klapky - zejména je rozhodující tvar návodního líce a uspořádání vzdušního líce (s otvory či uzavřené plovákové).

Ve zprávě [22] jsou rozlišeny dvě oblasti provozu klapkových jezů s účinkem dolní vody na pohyblivou konstrukci.

První případ nastává, když hladina dolní vody dosahuje úrovně pohyblivé konstrukce - je ve stejné výškové úrovni jako otočný čep, či vyšší. Hladina horní vody h_h může být manipulací konstrukce udržována na potřebné úrovni.

Platí tedy:

$$h_h \approx H \quad (4.12)$$

a zároveň

$$0 < h_d < H. \quad (4.13)$$

Druhý případ nastává nejčastěji při plně sklopené klapce, v našem případě $\alpha = 0^\circ$, kdy hladina dolní vody ovlivňuje poměry v nadjezí.

Platí:

$$h_h > H \quad (4.14)$$

a zároveň

$$0 < h_d < h_h.$$

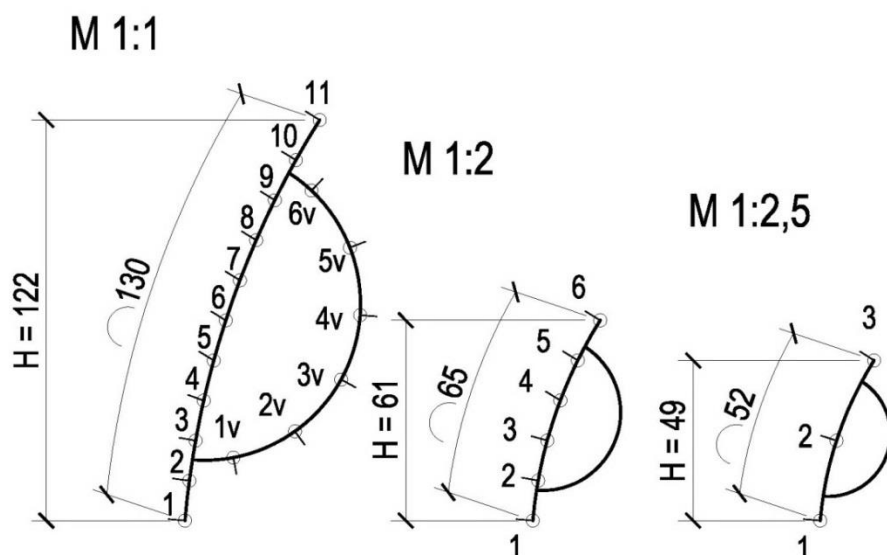
V některých případech při vzniku říčního proudění přes přelivnou konstrukci, kdy je $Fr < 1$, se výškové úrovně horní vody h_h a dolní vody h_d velmi přibližují a mohou být v extrému téměř totožné.

Dostupné literatury uvádějí, že při plném sklopení klapky ($\alpha = 0^\circ$) je podstatný vliv poloměru klapky na **vznik a velikost zatěžovacích minim** (mohou vznikat velké záporné momenty $-M$). Dále se uvádí, že záporné momenty lze výrazně snížit (snížit zatěžovací minimum) zvětšením poloměru klapky. Podstatně méně výrazně ovlivňuje tento poloměr velikost zatěžovacích maxim.

5 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

5.1 POPIS FYZIKÁLNÍCH MODELŮ

Pro účely této práce byly postaveny celkem tři fyzikální modely (tzv. rodina modelů) hladinové klapky. Termínem rodina modelů se označuje více modelů stejných tvarů zmenšených podle geometrického měřítka tak, abychom díky jejich postupnému zmenšení mohli sledovat vliv třecích sil a povrchového napětí na proudové charakteristiky. Blíže je tento termín popsán v publikaci [8]. Největší objekt klapkové konstrukce byl realizován s hradicí výškou $H = 122$ mm označujeme jej jako M_1 1:1 (považován za prototyp) a dále modely zmenšené, oproti prototypu v měřítku délek M_1 1:2 a M_1 1:2,5. Rozhodujícím pro návrh měřítek modelů bylo Froudovo kritérium modelové podobnosti. Poloměr návodního líce $R = 2,25H$ byl zvolen tak, aby odpovídal typizační směrnici [15], podle které se nejčastěji v ČR navrhují tyto typy klapky. Poloměr vzdušního líce byl navržen $R_1 = 0,39H$. Rozsah úhlů sklopení uzávěrů byl zvolen v rozmezí $\alpha = 0^\circ \div 85^\circ$ od vodorovné roviny a reaguje tak na trend zvyšování úhlů při maximálním vztyčení přelivné konstrukce. Základní rozměry a rozmístění piezodběrů na jednotlivých modelech je schematicky znázorněno na Obr. 4.



Obr. 4 Schéma realizované „rodiny modelů“ s rozmístěním odběrů k měření tlaků.

Nastavení úhlů sklopení α probíhalo pomocí aretace v otočném čepu klapky. Klapky byly umístěny na pevný podstavec (tzv. spodní stavbu). Klapkové uzávěry byly vyrobeny z nerezového plechu tl. 1,0 mm. Spodní stavba a boční svislá stěna byly vyrobeny z vodostavební překližky. Modely byly vestavěny postupně do žlabu šířky 412 mm a délky 12,5 m.



Obr. 5 Fotografie fyzikálních modelů v měřítku 1:1; 1:2 a 1:2,5.

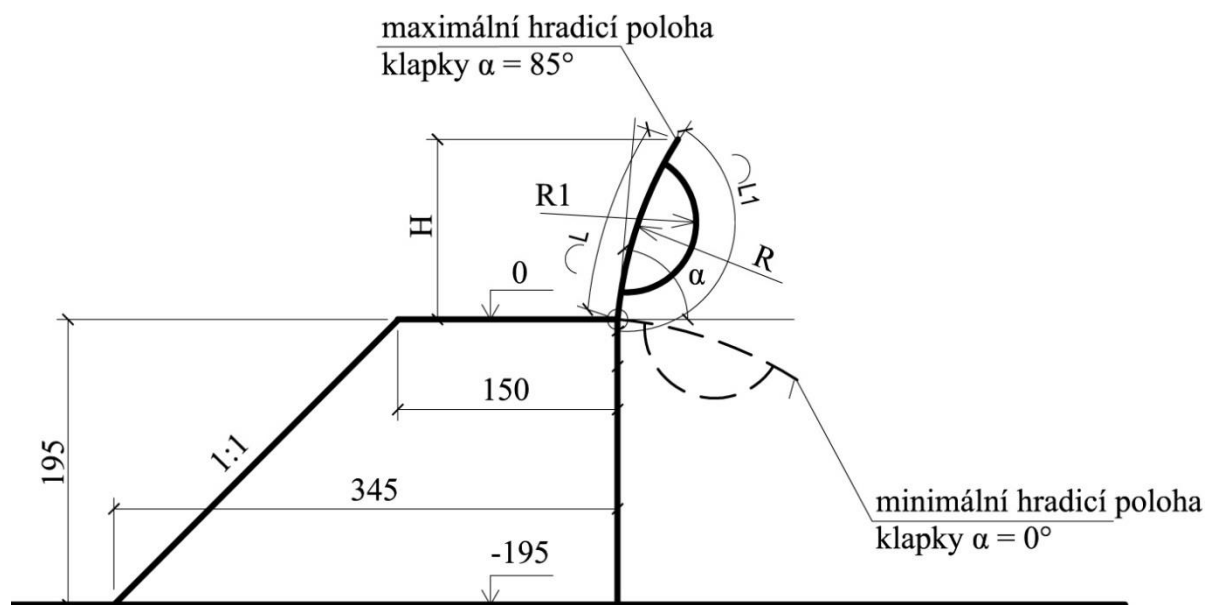
Největší z modelů (prototyp M_1 1:1) měl hrací výšku $H = 122$ mm. Na návodním líci byly umístěny piezoodběry pro měření statického tlaku vyvozeného od hydrodynamického účinku vodního proudu. Na prototypu jich je celkem 11, na zmenšeném modelu M_1 1:2 je 6 odběrů a na nejmenším modelu M_1 1:2,5 jsou z konstrukčního hlediska pouze 3 odběry. Na návodním líci prototypu M_1 1:1 je

navíc oproti menším modelům umístěno dalších 6 piezodběřů pro měření tlaků od účinků hladiny dolní vody definovanou hloubkou h_d .

Základní rozměry jednotlivých realizovaných modelů shrnuje Obr. 6 a Tab. 1.

Tvar spodní stavby (podstavce), na kterém byla umístěna klapka byl zvolen tak, aby bylo umožněno pohodlné měření zvýšených vodních stavů v podjezí (až $h_d = 1,5H$). Úprava podjezí s odskokem byla určena zejména pro zjištění vlivu dolní vody na zatížení klapky – dynamické nestability při $\alpha \sim 0^\circ$. Podstavec byl také využit pro možnost nainstalování vybraného tvaru vzdušního líce. Zvýšená spodní stavba dále umožnila plně rozvinout projev vodního válce pod sklopenou klapkou. Dalším účelem práce bylo ověřit použitelnost CFD simulace pro dokonalé a zejména pro nedokonalé přepady. Pomocí CFD se modelovala stejná geometrie jako na fyzikálním modelu, geometricky si okrajové podmínky odpovídaly. **Vzhledem k nízkým rychlostem vody v nadjezí při zatopených stavech neovlivnil tvar spodní stavby proudové a zatěžovací charakteristiky. Tvar předpolí neměl ani u dokonalého přepadu vliv na rozložení tlaků a proudové poměry při vztyčené klapkové konstrukci ($\alpha = 0^\circ$).**

Všechny potřebné rozměry fyzikálního modelu jsou obsaženy v příloze č. 1, která obsahuje výkresy umístění modelu 1:1 (prototypu) v pohyblivém žlabu.



Obr. 6 Schéma základních rozměrů.

identifikace zkoušených objektů	M_1 1:1	M_1 1:2	M_1 1:2,5
	[mm]		
hradicí výška H při $\alpha = 85^\circ$	122	61	49
poloměr návodního líce R	274,5	137	110
poloměr vzdušního líce R_1	48	24	19
délka oblouku návodního líce L	130	65	52
délka oblouku vzdušního líce L_1	126	63	50
počet piezoodběrů na návodním líci	11	6	3
počet piezoodběrů na vzdušném líci	6	-	-
svislá odlehlost piezoodběrů na návodním líci	12	12	24

Tab. 1 Základní rozměry jednotlivých modelů.

Pro úplnost jsou ještě uvedeny relativní rozměry fyzikálních modelů, vztažené k hradicí výšce příslušného fyzikálního modelu H při nastavení klapky $\alpha = 85^\circ$ - Tab. 2.

rozměry fyzikálních modelů	M_1 1:1	M_1 1:2	M_1 1:2,5
	[mm]		
hradicí výška H při $\alpha = 85^\circ$	122	61	49
poloměr návodního líce R	2,25H		
poloměr vzdušního líce R_1	0,39H		
délka oblouku návodního líce L	1,07H		
délka oblouku vzdušního líce L_1	1,03H		

Tab. 2 Relativní rozměry jednotlivých fyzikálních modelů, vztažené k hradicí výšce H při $\alpha = 85^\circ$.

Měření na fyzikálních modelech probíhala v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Bližší informace o hydraulickém okruhu lze získat na webové adrese laboratoře LVV <http://www.fce.vutbr.cz/VST/lvv/index.html>.

Při obtékání klapky vodním proudem o volné hladině působí více sil současně. Podle obecných zásad modelové podobnosti je možné vyšetřovat na fyzikálním modelu bez velkých problémů takové hydraulické jevy, u kterých naprosto převládá (dominuje) pouze jedna síla. Bližší informace o jsou obsaženy v kap. 4.1. S přihlédnutím na maximální možnou průtočnou kapacitu žlabu, která je přibližně $40 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a zároveň ke vztahu (4.2) bylo nutné žlab v pozici umístěného objektu klapky zúžit na cca $\frac{1}{2}$ šířky, což odpovídá 201 mm – viz Obr. 7.



Obr. 7 Pohled na instalaci modelu v pohyblivém žlabu o šířce 412 mm, prostor měření byl pomocí překližky zúžen na šířku 201 mm, tak aby byla splněna podmínka ve vztahu (4.2).

Nadjezí a půdorysné zúžení bylo vytvořeno z vodostavební překližky. Prostor za deskou, která tvoří zúžení, byl zatopen, a to z důvodu přitížení desky vodou a tím zamezení jejího nadměrného zatížení bočním tlakem i vztlakem. Pro jistotu byl ještě prostor zúžení z vnější strany přitížen betonovými kostkami.

Vliv délky přelivné hrany byl již v minulosti ověřen na modelu pevné podtlakové přelivné konstrukce se zaoblenou přelivnou hranou [12]. V rámci těchto zkoušek byl vyhodnocován součinitel přepadu šířky $b = 412, 197$ a 104 mm. Ze získaných měření a jejich vyhodnocení je zřejmé, že vliv na přepadový součinitel m se neprojevil ani při zmenšení šířky přelivu na $1/4$, což odpovídá délce přelivné hrany $b = 100$ mm. Vliv drsnosti obtékaných povrchů na průtočné charakteristiky se při použití běžných modelových rozměrů a typu materiálů pro jejich zhotovení neprojevil, byl v rámci chyb měření.

Podle publikace [8] je nutná šířka výsekového modelu $b \geq 200$ mm. Tuto hodnotu lze doporučit i pro klapkový uzávěr s ohledem na stranu bezpečnosti.

Ovládání hydraulického okruhu probíhalo za pomoci řídicího počítače a regulačních prvků

umístěných v armaturní komoře. Průtok Q v trati byl regulován pomocí uzavíracích klapek a regulačních šoupat, které byly osazeny servopohony.

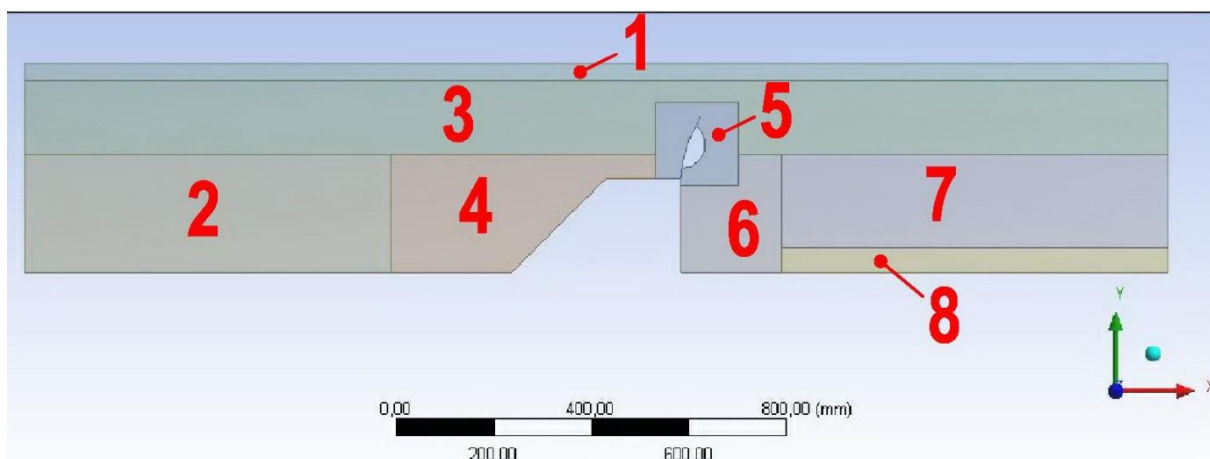
Čerpadla zajišťující potřebný průtok jsou ponorná odstředivého typu, dvě malá čerpadla mají hltnost $2 \times 11 \text{ l.s}^{-1}$ jsou spouštěna „na přímo“ a dvě velká s návrhovými průtoky $2 \times 85 \text{ l.s}^{-1}$ jsou řízena frekvenčními měniči.

Celý řídicí systém laboratoře je ovládán počítačem a ovládacím systémem SIMATIC S7 - 300 napojeným na měřicí a řídicí okruhy laboratoře. Veškeré měnitelné parametry hydraulického okruhu jsou nastavitelné (mimo řídicí počítač) ještě ze dvou míst za pomoci parametrizačních ovládacích panelů. Bližší popis je uveden v [23].

6 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ - CFD

Pro případ řešení klapkového hladinového uzávěru byla navržena výpočetní oblast o rozměrech 2,345 m x 0,430 m. Výška oblasti 0,430 m byla dána skutečnou velikostí hydraulického žlabu, ve kterém proběhlo fyzikální modelování - viz odst. 5. Délka byla definována nutností dostatečné vzdálenosti hranice výpočetní oblasti od pohyblivého přelivu poproudně i protiproudně. Geometrie výpočetní oblasti byla vytvořena v softwaru AutoCAD. Poté byla implementována do prostředí ANSYS WORKBENCH do modulu DESIGN MODELER. Zde byla nastavena tloušťka výpočetní oblasti (je nutná i pro řešení výpočtů v 2D). Ze zkušeností byla nejmenší možná tloušťka nastavena na 3,0 mm. Při menší mocnosti již program pro tvorbu výpočetní sítě (meshe) hlásil sníženou kvalitu výpočetní sítě a od ní se odvíjí nedostatečná věrohodnost výsledků CFD simulace.

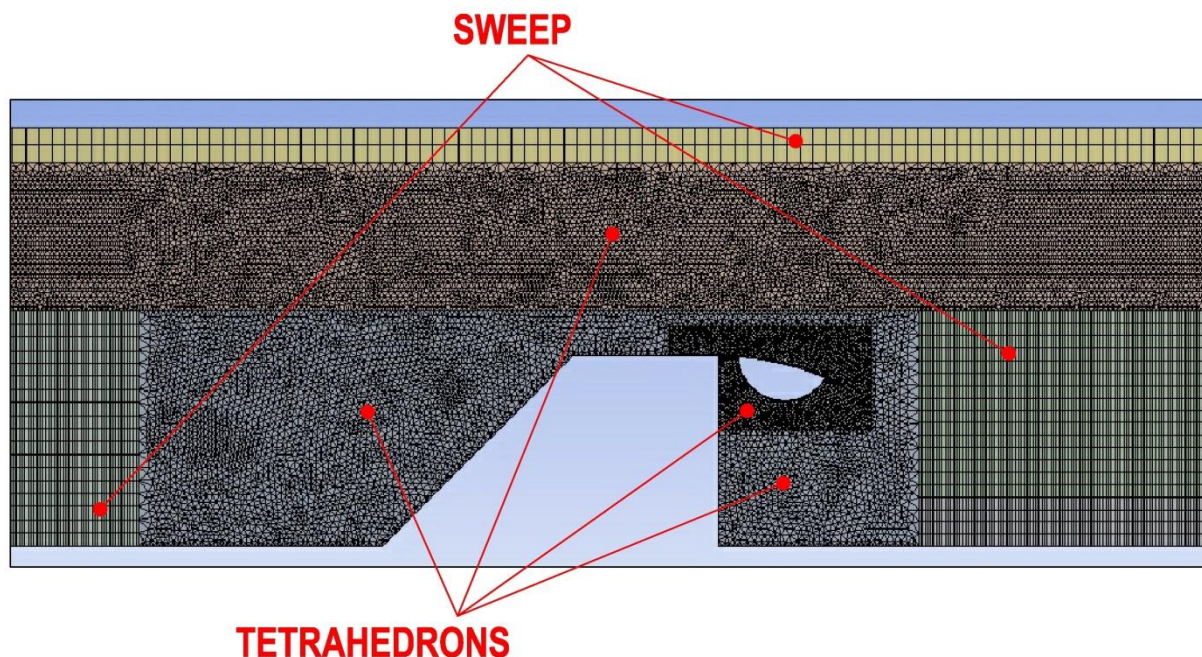
Výpočetní oblast byla již v AutoCADU rozdělena na podoblasti z toho důvodu, že pro každou podoblast je možné definovat odlišnou metodu tvorby výpočetní sítě, hustotu výpočetních prvků a tím i uzlových bodů. Jak je uvedeno na Obr. 8, byla výpočetní oblast rozdělena celkem na 8 podoblastí.



Obr. 8 Výpočetní oblast rozdělena na 8 podoblastí, v tomto případě klapka v poloze $\alpha = 85^\circ$.

Dále byly pojmenovány okrajové podmínky pomocí funkce NAMED SELECTION, která umožňuje označit a pojmenovat jednotlivé plochy. Díky tomuto pak lze v CFX-PRE pouze zadat název okrajové podmínky a program již sám přiřadí typ okrajové podmínky k oblasti se stejným názvem.

V oblastech, ve kterých se předpokládalo rozmezí vícesložkového prostředí voda – vzduch bylo nutné výpočetní síť zhustit a vytvořit jí metodou tetrahedrons, která poskytuje na stejném prostoru podstatně více úzlů než metoda sweep a tím dokáže lépe zachytit přechod mezi vodou a vzduchem. Jednalo se o podoblasti 3, 5, 6 a 7 (viz Obr. 8). Podoblast 5 byla nejhustěji vytvořena s velikostí prvků 1,0 mm. Méně důležité podoblasti byly vytvořeny metodou sweep (1, 2, 4). Výpočetní síť je znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9 Použité metody tvorby výpočetní sítě na jednotlivé podoblasti.

Velikost sweep prvků se pohybovala od 3 cm (podoblast 1, kde byl pouze vzduch) až po 5 mm (u podoblastí 2, 7 či 8). U tetrahedrons metody byla velikost nejmenších prvků od již zmíněného 1,0 mm až po 5 mm (u oblastí 4 a 6). Počet prvků a uzlů u jednotlivých zatěžovacích stavů se mírně lišil podle toho, zda šlo o volný přepad či o přepad se zvýšenou hladinou dolní vody h_d . Při volném přepadu, byly navíc oblasti 7 a 8 vytvořeny z tetrahedronů o velikosti prvků 3 mm. Při vzdušné dolní vodě nebylo potřeba mít tak hustou síť, a proto byla oblast 8 připojena k oblasti 7 a obě byly vytvořeny metodou sweep.

V hydraulickém stavu, kdy nebyl přepadový paprsek omezen dolní vodou bylo celkem v síti obsaženo 116 tisíc uzlů a 427 tisíc buněk. U stavů s volně přepadajícím paprskem do prázdna byl pak počet uzlů zvýšen na 190 tisíc a buněk na 641 tisíc.

Po nastavení výpočtu, okrajových podmínek, vlastností tekutin atd. v programu CFX - PRE je program spouštěn z prostředí WORKBENCH.

Pro stacionární výpočet proudění (steady) je k dispozici celkem 14 turbulentní modelů plus laminární model. Po nastavení nestacionárního proudění (transient flow) je navíc k výše uvedeným, časově nezávislým modelům, ještě k dispozici dalších 5 turbuletních modelů.

Výběr vhodného modelu je v dnešní době velmi obtížný a to nejen díky jejich kvantitě, ale hlavně z důvodu nedostatečných časových kapacit, výpočetnímu výkonu i nutnému času k pochopení jednotlivých matematických vztahů, podle kterých jsou modely definovány. Většina modelů obsahuje ve své definici větší množství koeficientů (běžně 5 u $k - \epsilon$ až třeba 6 u SST). Změna byť i jediného koeficientu mění charakteristiku modelu. Modely a jejich vhodnost použití pro daný individuální příklad proto musí být testovány přímo na řešené úloze. Po nastavení typu modelu následuje u dvousložkového prostředí v řešeném případě voda –

vzduch (tzv. free surface – proudění o volné hladině) nastavení modelu vztaku. Na výběr je model na principu rozdílu hustoty tekutin či na principu, který definoval Boussinesq. Dále je možnost definovat vztahy mezi tekutinami, tzn. jejich vzájemné třecí síly, princip výpočtu mezisložkového pohybu a podobně.

Poté následovalo nastavení soustavy jednotek fyzikálních veličin, ve kterých bude software výpočet uvažovat. Podstatným pro celý výpočet je způsob řešení rovnic, na kterých je metoda FVM založena. Možnosti jsou následující: Upwind, High Resolution, Specified Blend Factor.

Dále bylo třeba nastavit konvergenční kritéria. Nastavit lze počet min. a max. iterací, které bude řešič počítat, residual target (odchylku iterace $n+1$ od iterace n), dále pak Conservation target (odchylka kontinuity při stacionárním stavu na vstupu a výstupu do výpočetní oblasti). Nastavení kontroly časového měřítka je vhodné pro ovlivnění konvergence výpočtu. Lze ponechat pevné měřítko, automatické (konzervativní, agresivní či specifikované) nebo fyzické časové měřítko vyjádřené hodnotou času. Následuje execution control, kde se definuje pracovní adresář, metoda pro paralelní výpočty (ať už na více procesorovém či více jádrovém PC nebo na více počítačích zároveň). V položce output control se nastavuje postupné ukládání výsledků v průběhu výpočtu, jejich záloha a monitorování.

V programu SOLVER MANAGER probíhal samotný numerický výpočet, z prostředí WORKBENCH se spouští program pomocí položky SOLUTION. Zde lze sledovat průběh výpočtu jeho konvergenci a dynamicky měnit některé položky výpočtu, např. počet iterací, konvergenční kritéria a jiné.

Pomocí programu CFD – POST byly spočtené výsledky zobrazeny a porovnávány s údaji v dostupné literatuře a z fyzikálního modelu.

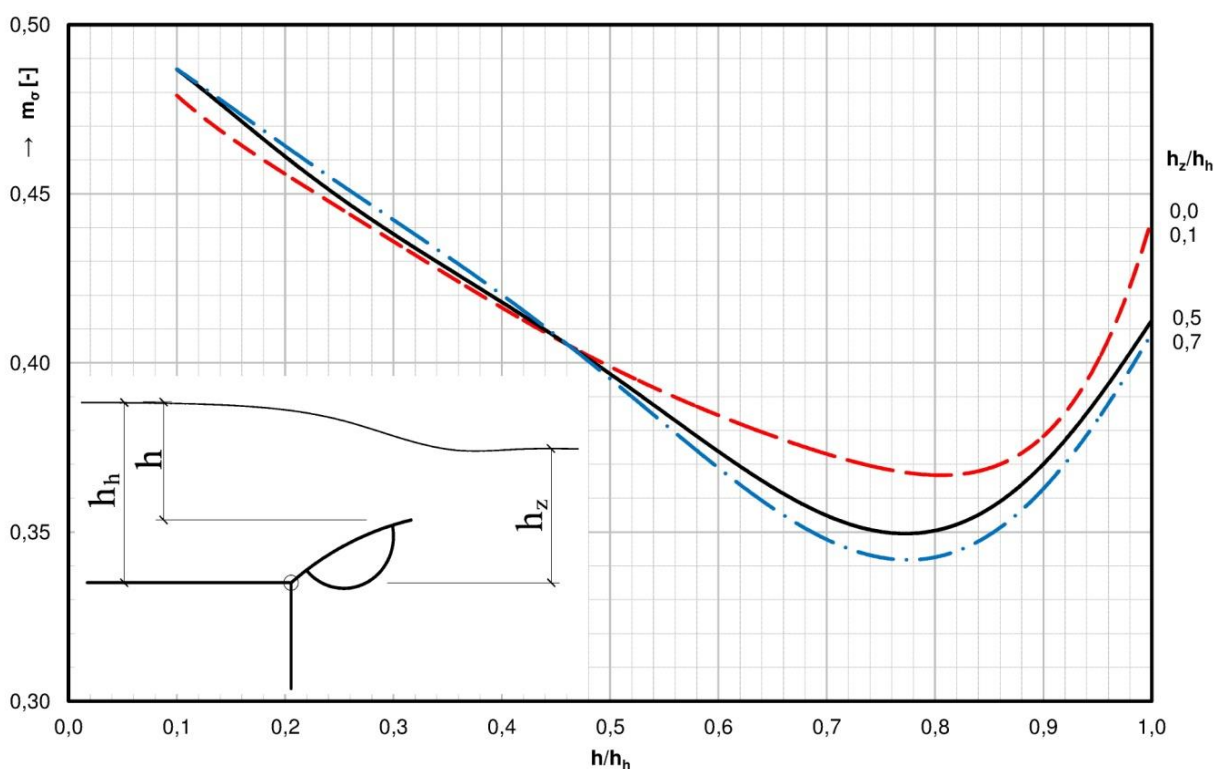
Jako nejvýhodnější numerický model z pohledu přesnosti (tlaky i průběh hladin) a zároveň nejmenší časové náročnosti se jeví pro řešení případ model SST. Proto budou pomocí tohoto modelu řešeny i další numerické úlohy obsaženy v této práci. Zároveň byla potvrzena myšlenka, že kvalita výpočetní sítě má velký vliv na rychlost konvergence. „Předvýpočet“ pomocí laminárního řešiče ($L \rightarrow$ turbulentní model) má pak za následek snížení celkového počtu nutných iterací. Časová náročnost je ale více jak trojnásobná oproti nejrychlejšímu SST modelu. Použití nestacionárních modelů, kde časová náročnost překročila sedminásobek výpočetního času oproti stacionární SST, není v tomto případě odůvodnitelná.

7 PRŮTOČNÉ CHARAKTERISTIKY PŘI OVLIVNĚNÍ DOLNÍ VODOU

Pro pevné nízké jezy je problematika zatopení dostatečně rozebrána. Průtočná kapacita přelivných polí s pohyblivými uzávěry je však mnohem složitější a méně prozkoumána. K určení součinitele přepadu m_σ přes klapkový uzávěr z dostupných publikací [24], [25] či [26] je potřeba určit tvar a pozici klapky, výšku přepadového paprsku, úroveň hladiny dolní a horní vody. Většina výše uvedených publikací uvádí stanovení součinitele pro případ pohyblivého jezu neovlivněného hladinou dolní

vody. Autoři bohužel neuvádí podmínky a meze použití jejich publikovaných způsobů určení přepadového součinitele m_σ . Nejvíce používané grafické vyjádření součinitele m pro dokonalý přepad je převzato z publikace [24].

Pouze v jedné [25] z výše uvedených publikací její autoři uvádí graf a základní schéma (jako součást grafu) pro určení součinitele m_σ pro případ nedokonalého přepadu. Ve své publikaci se autoři pouze zmiňují, že daný graf uvádí na základě výsledků modelového výzkumu [25] stanovené hodnoty součinitelů přepadu m_σ přes typovou klapku při jejím různém sklopení a odlišném zatopení dolní vodou. Bližší informace o okrajových podmínkách bohužel autoři neuvádí. Tento graf platí pro aplikaci obecně známého vztahu, tzv. přepadové rovnice.



Obr. 10 Transformovaný graf převzatý z [25] pro určení přepadového součinitele m_σ .

Problémem je, že na Obr. 10 není jednoznačně patrná závislost přepadového součinitele m_σ na úhlu sklopení klapky α , jak tomu ve většině způsobů určení součinitele m_σ bývá. Dále autoři v grafu uvádí 3 křivky závislosti m_σ pro 4 hodnoty poměrů h_z/h_h , z čehož není jasné, zda je čárkovaná křivka pro poměr $h_z/h_h = 0,0$ a $0,1$ totožná nebo nikoliv.

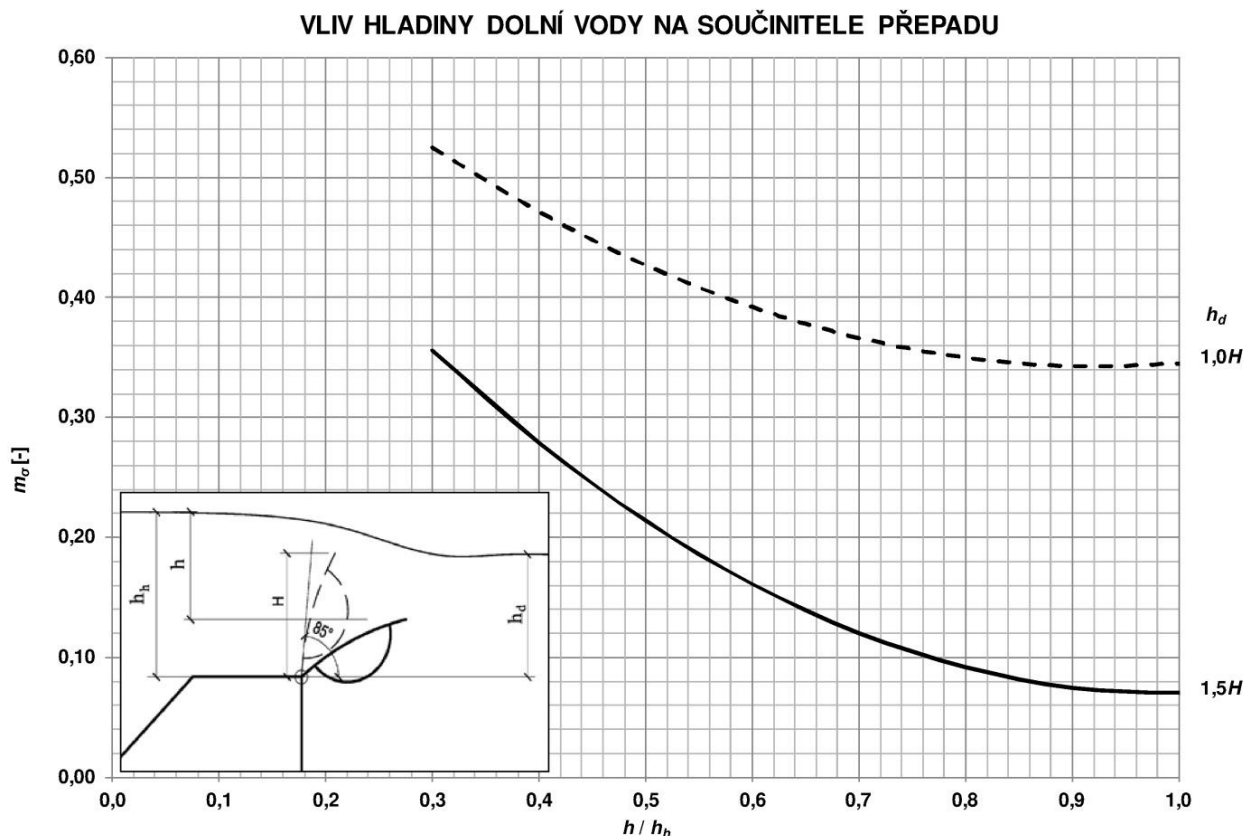
V této práci je současně provedeno porovnání hodnot přepadových součinitelů m_σ určených podle Obr. 10 ovlivněného přepadu vody přes klapku hladinou dolní vody vypočtených z dat naměřených na výše popsaném fyzikálním modelu. Jedině s těmito výsledky získanými z experimentu mohlo být, pro případy zatopeného přepadu, porovnání provedeno.

Nejdříve byly porovnány hodnoty získané z výstupů u dokonalého přepadu s výsledky v dostupné literatuře. S grafem v publikaci [27] (či [2], kde je uvedeno stejné grafické vyjádření) byla nalezena v uvedeném rozsahu nastavení (pozic)

klapek velmi dobrá shoda u dokonalých přepadů přes klapky umístěné na spodních stavbách odlišných tvarů. Relativní rozdíly ve stanovení přepadového součinitele m bez ovlivnění dolní vodou se pohybují v absolutní odchylce do 10 % u úhlů $\alpha = 20^\circ$ až 60° . U sklopení klapky $\alpha = 0^\circ$, 75° a 85° nelze výsledky porovnat. Důvodem jsou meze publikovaného grafu, kde minimální poloha klapky po přepočtu na náš případ je reprezentována úhlem sklonu $\alpha = 15^\circ$ a maximální $\alpha = 67^\circ$. Lze tedy opět konstatovat, že spodní stavba přelivu u úhlů $\alpha = 20^\circ$ až 60° neovlivnila v našem případě hladinové poměry, které jsou určeny tvarem a pozicí klapky umístěné na ní. Pro polohu $\alpha = 0^\circ$ však bylo silné ovlivnění spodní stavbou prokázáno.

Z naměřených hodnot přepadových výšek u hydraulického modelu a výpočtů přepadového součinitele m_σ při uvažování přítokové rychlosti v_1 v místě před pevnou stavbou (viz Obr. 2 na str. 11) byl vynesena graf na Obr. 11.

Uvedeny jsou dvě úrovně hladiny dolní vody $h_d = 1,0H$ a $1,5H$. Trend čar je obdobný. Při velkém poměru h/h_h , který odpovídá nižším úhlům sklopení klapky α , přepadá proud přes klapku do prostoru vzduché dolní vody. Tím je omezena průtočná kapacita klapky. Naopak při vzrůstajícím úhlu α kapacita přelivu vzrůstá, omezující vliv dolní vody se zmenšuje. Vyšší hodnoty m_σ odpovídají vyšším úhlům nastavení klapky α .



Obr. 11 Graf pro určení součinitele přepadu u zvýšené hladiny dolní vody, hodnoty získané z provedeného fyzikálního měření, platí pro spektrum měřených úhlů $\alpha = 0^\circ$ až 85° .

Bohužel získané hodnoty součinitele m_{σ} nelze s žádnou dostupnou literaturou porovnat. Jediné nalezené hodnoty jsou obsaženy v publikaci [25], viz Obr. 10. Tam je však odlehlost h_d uvažována pouze do meze $0,7 h_y/h_z$.

Pro představu o vzájemném porovnání jednotlivých hodnot těchto součinitelů uvádíme v Tab. 3 velikosti přepadových součinitelů $m_{\sigma 1}$ zjištěných na základě výsledků fyzikálního modelování a součinitelů $m_{\sigma 2}$ stanovených podle grafu na Obr. 10.

$\alpha = 60^\circ$		Přepadový součinitel		Odchylky m	Souč. zatopení
q [m ² ·s ⁻¹]	h_d/H	$m_{\sigma 1}$ [-] z fyz.model.	$m_{\sigma 2}$ [-] z [24]	$(m_{\sigma 2} - m_{\sigma 1}) / m_{\sigma 2}$ [%]	σ_{z1} [-] z fyz.model.
0,035	0,3	0,467	0,414	11,4	1,013
	0,5	0,484	0,416	14,1	1,051
	0,7	0,483	0,417	13,7	1,048
	1,0	0,462	----	----	1,002
0,050	0,3	0,486	0,406	16,5	0,986
	0,5	0,504	0,407	19,3	1,022
	0,7	0,479	0,406	15,2	0,971
	1,0	0,441	0,402	8,8	0,893

Tab. 3 Porovnání hodnot přepadového součinitele $m_{\sigma 1}$ (experimentální hodnoty) a $m_{\sigma 2}$ z [24], pro $\alpha = 60^\circ$.

Z porovnání údajů pro zkoušená sklopení reprezentovaná úhlem α v rozsahu 15° až 67° vyplývá, že minimální absolutní odchylka je 0,6 % a maximální absolutní odchylka je 33,3 %. Jedná se o značný rozptyl hodnot přepadových součinitelů i celkové (chyby) nejistoty vykazovaných hodnot z měření. Zjišťování příčin takového velkého rozptylu by muselo být předmětem dalšího rozsáhlého zkoumání a popř. dalších fyzikálních experimentů. Naše fyzikální modelování zejména pro zvolený tvar stavby a základní uspořádání modelu může být značně odlišné od podmínek, pro které autoři graf pro určení přepadového součinitele m_{σ} sestavili.

Dále bylo provedeno **stanovení závislosti chyb měření na velikosti přepadového součinitele m** . Přesnost stanovení přepadových výšek h resp. úrovní hladin vody v hydraulickém žlabu při modelování hydraulického jevu je odvislá od přesnosti použitého digitálního hrotového měřítka. Současně závisí na přesnosti určení vlastní výškové úrovně bodu dotyku hrotu s hladinou, který subjektivně ovlivňuje samotná měření provádějící osoba. Přesnost odečtení úrovně klidné hladiny vody na digitálním hrotovém měřítku je 0,1 mm. Chyba ve stanovení

odlehlosti hladiny vody a následně z ní přepadové výšky h se běžně pohybuje okolo 1,0 mm při měření na ustálené hladině. Závislost chyb měření na součiniteli m_σ byla stanovena pro všechny úhly sklopení klapky α . Procentuální velikost odchylky způsobené odečtem úrovně hladiny se pohybovala v rozmezí od 0,7 % (u $\alpha = 0^\circ$) až po 3,7 % (pro $\alpha = 85^\circ$). Lze tedy konstatovat, že velikost chyby výsledku je závislá na úhlu sklopení klapky α . Se vzrůstajícím úhlem α se zvětšuje i odchylka, naopak při vzrůstající h_d se vliv nepřesnosti stanovení úrovně hladiny snižuje. Na nakalibrovaném indukčním průtokoměru, pomocí kterého bylo odečítáno průtočné množství, se chyba ve stanovení průtoku pohybuje do 0,3 %. Celkově lze tedy chybu ve stanovení součinitele m_σ kvantifikovat do $\approx 4\%$.

Pro stanovení přepadového součinitele m u dokonalého přepadu přes hladinovou klapku lze doporučit grafické vyjádření publikované původně v práci [27], viz Obr. 10, které je přejímáno v řadě odborných publikací. Bohužel autor neuvádí geometrické okrajové podmínky použití. Odchylky pro porovnatelné úhly ($\alpha = 20^\circ$ až 60°) mezi měřením provedeným v rámci této práce a publikovaným grafem v [27] se pohybují do hodnoty 10 %, což lze považovat za dobrou shodu. Specifikace tvaru spodní stavby při sklopení klapkové konstrukce je nutná pro korektní aplikaci hodnot, jak je také v této práci potvrzeno.

K stanovení přepadových součinitelů m_σ pro klapku ovlivněnou dolní vodou do hodnoty $h_d \leq 0,7H$ lze využít grafického vyjádření publikovaného v [27]. Porovnané hodnoty pro vybrané stavy byly zatíženy absolutní odchylkou 8 % až 26 % od měření provedeného v rámci této práce. Bohužel nejsou známi okrajové podmínky, při kterých bylo měření provedeno. Následkem toho není možné odhalit zdroj těchto velkých odchylek. Z provedených měření nebyl zjištěn žádný spolehlivý trend.

U rozpětí $0,7H < h_d < 1,0H$ došlo při měření k velké rozkolísanosti získaných dat. Výsledky nepostihují žádný uspokojivý trend, ze kterého by bylo možno vytvořit grafickou závislost podobně, jako u hodnot $1,0H \leq h_d \leq 1,5H$. Tato oblast nebyla nalezena ani při studiu dostupné literatury. Pravděpodobně je v této oblasti odlehlosti hladin tvar hladiny silně závislý na čase. Tím je odůvodněna špatná korelace naměřených dat. Podle výsledků lze tuto oblast pomocí CFD modelovat. Do budoucna by bylo vhodné tuto oblast zmapovat měřením pomocí nástrojů, které umožňují zaměření hladiny v rychlém časovém sledu. Naměřená data pak poslouží jako okrajové a popř. počáteční podmínky do CFD simulací.

Pro vyšší stupně zatopení ($1,0H \leq h_d \leq 1,5H$) byla nalezena závislost, výsledky byly graficky vyjádřeny v Obr. 11. Získané výsledky z vlastního měření jsou zatíženy chybou do 4 %. Mezi hodnotami $h_d = 1,0H$ a $1,5H$ lze lineárně interpolovat. Tyto zinterpolované hodnoty však budou zatíženy navíc chybou interpolace. Do budoucna je potřeba potvrdit výsledky z grafu dalšími navazujícími výzkumy tak, aby mohly být naměřené hodnoty rozšířeny.

Minimální doporučená výška přepadového paprsku h_{\min} pro bezpečné odstranění vlivu povrchového napětí na průtočnou kapacitu byla stanovena z měření na **50 mm** u úhlu sklopení klapky $\alpha = 85^\circ$. Při této poloze se klapka chová

jako ostrohranný přeliv. Pro nižší polohy skopení klapky je možné snížit výšku přepadového paprsku a jít až na hodnotu **24 mm**, která byla zjištěna pro úhly sklopení $\alpha = 0^\circ$ a 20° .

Vybrané stavy zatopení byly modelovány pomocí CFD. **Výsledné průběhy hladiny a přepadových součinitelů byly porovnány s hodnotami naměřenými na fyzikálním modelu.** Odchyly CFD od experimentálních dat pro součinitel přepadu m jsou ve velmi dobré shodě, max. do 4,0 %. Na základě vybraných simulovaných stavů lze konstatovat, že **proudové charakteristiky je možné úspěšně simulovat pomocí CFD.**

8 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY PŘI OVLIVNĚNÍ DOLNÍ VODOU

Při zvýšené hladině h_d a plně sklopené ($\alpha = 0^\circ$) či téměř sklopené klapce **byl potvrzen vznik zatěžovacích minim** (záporné celkové momenty). Vznik záporných momentů závisí nejen na poloze klapky (jejím sklopení, či vztyčení), ale také na úrovni hladiny dolní vody h_d a tvaru vzdušního líce spodní stavby.

Hranice automodelovosti z pohledu tlaků (vyloučení vlivu povrchového napětí a vnitřního tření) byla naměřena ve stejné vzdálenosti hladiny od klapkové konstrukce, jako u hranice automodelovosti z pohledu průtoků, tedy **50 mm pro $\alpha = 85^\circ$** . Pro další sklopení klapky je možné snížit přepadovou výšku až na **přibližně stejné hodnoty, jako byly zjištěny pro automodelovost z pohledu průtočné charakteristiky.**

Dalšími pokusy **byl potvrzen předpoklad velkého vlivu tvaru vzdušného líce spodní stavby (neplést s tvarem spodní stavby) na zatěžovací charakteristiky.** Vybraný tvar vzdušního líce spodní stavby v podjezí snížil tlaky působící na klapku až o 76 %. Rozdíl je způsoben zastavením prostoru pod klapkovou konstrukcí. Vhodný tvar vzdušního líce spodní stavby by bylo nutné do budoucna ověřit dalším měřením.

Pomocí CFD simulace byl získán **průběh tlaků od hydrodynamického zatížení po návodním a vzdušním líci klapkového uzávěru. Podařilo se dosáhnout velmi dobré shody s naměřenými hodnotami.** Odchylna je téměř konstatní pro všechny vyšetřované polohy klapky a činí - 5,0 % až -7,0 % (CFD podhodnocuje tlak oproti měření). Opět byla prokázána velmi dobrá shoda mezi naměřenými hodnotami a CFD simulací. **Zatěžovací charakteristiky klapkové konstrukce lze pomocí CFD zdárně simulovat.**

Pro polohu klapky $\alpha = 60^\circ$ a dokonalý přepad byla shoda s dostupnou literaturou velmi dobrá s relativní odchylkou do 6,3 %. U plně sklopené klapky ($\alpha = 0^\circ$) a taktéž u dokonalého přepadu se projevil vliv tvaru spodní stavby, tlakové poměry na ploše klapky byly ovlivněny odlišnou geometrií okrajových podmínek. U nedokonalého přepadu bylo opět zjištěno ovlivnění zatěžovacích charakteristik odlišnými geometrickými podmínkami. Naměřené hodnoty jsou odlišné, než uvádí literatura. **Jak bylo zjištěno, nelze přejímat hodnoty z literatury při jiných**

geometrických okrajových podmínkách. Toto zjištění podtrhuje nutnost modelovat (fyzikálně či pomocí CFD, nejlépe využitím obou přístupů) každý geometrický odlišný případ individuálně.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČÁBELKA, J. *Hydraulický výzkum podpírané duté jezové klapky*. Časopis Povodí Vltavy 2/81.
- [2] GABRIEL, P.; GRANDTNER, T.; PRŮCHA M. *Jezy*. Praha. SNTL, 1989. 453 s.
- [3] ŠULC, J.; HALUZA, M. *Stanovení hydrodynamického účinku proudu na klapkový hladinový uzávěr*. Výzkumná zpráva VVÚVSH – VUT v Brně, 1990.
- [4] WICKERT, G.; SCHMAUSSER, G. *Stahlwasserbau Heidelberg – Springer*, 1971.
- [5] LEVIN, L. *Formulaire des conduites for loraés oléoducs et conduits d'aeration*. Dunod. Paris, 1968.
- [6] PRACHAŘ, O. *Progresivní tendence ve výzkumu, vývoji a technologii hladinových klapkových uzávěrů*. Vodní hospodářství – řada A, č.9, 1988, str. 242 – 251.
- [7] ROZANOV, N.P. *Voprosy projektirovanija vodopropusknych sooruzenij, rabotajuščich v uslovijach vakuuma i při bolšich skorostjach potoka*. Gosenergoizdat, Moskva, 1959.
- [8] ČÁBELKA, J.; GABRIEL P. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice, díl 1. – Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti*. Nakladatelství Academia. Praha, 1987.
- [9] MENTER, F. R.; EGOROV, Y. A. *Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models*. AIAA paper, 2005-1095, Reno/NV, 2005.
- [10] MENTER, F. R. *Influence of freestream values on k- ω turbulence model prediction*. AIAA J., 30, s. 1657 – 1659.
- [11] PŘÍHODA, J.; LOUDA, P. *Matematické modelování turbulentního proudění*. ČVUT Praha, 2007.
- [12] ŠULC, J.; ŠAFÁŘ, R.; PICKA, D. *Meze podobnosti přepadu přes přeliv se zaoblenou korunou*, konference k výročí vzniku 110 let Vysokého učení technického v Brně, 2009.
- [13] MENTER, F. R. *Influence of freestream values on k- ω turbulence model prediction*. AIAA J., 30, s. 1657 – 1659.
- [14] KNAPP, F. *Ausfluss, Überfall und Durchfluss im Wasserbau*. Karlsruhe, 1960.

- [15] HYDROPROJEKT PRAHA. *Navrhování a výpočet klapkových hradicích konstrukcí*. Typizační směrnice, 1980.
- [16] PULINA, B.; VOIGT, A. *Untersuchen beim Umbau und Neubau von Wehranlagen an Bundeswasserstrassen*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 67. Karlsruhe, Mai 1990.
- [17] ČÁBELKA, J. a kol. *Novodobé jezové uzávěry a hydraulické podmínky bezpečnosti jejich provozu*. Závěrečná zpráva výzkumného úkolu 114 F 71-73, Praha, 1974.
- [18] PRŮCHA, M. *Výzkum zatížení duté klapky*. ČVUT – Fakulta stavební, Praha, 1986.
- [19] KRČMÁRIK, J. *Hydraulický výzkum na typovom hladinovom klapkovom uzávere*. Výskumná zpráva VÚVH. Bratislava, 1990.
- [20] ČÁBELKA, J. a kol. *Novodobé jezové uzávěry a hydraulické podmínky bezpečnosti jejich provozu*. Závěrečná zpráva výzkumného úkolu 114 F 71-73, Praha, 1974.
- [21] HALUZA, M.; ŠULC, J.. *Výpočet hydrodynamického účinku proudu na klapkový uzávěr*. Brno, 1991.
- [22] ŠULC, J.; HALUZA, M. *Vliv dolní vody a tvaru návodního líce na hydrodynamické zatížení hladinové klapky*. Výzkumná zpráva VUT. Brno, 1991.
- [23] ŽOUŽELA, M. *Hydraulické okruhy laboratoře Ústavu vodních staveb fakulty stavební VUT v Brně*. Brno 2007. Příspěvek je dostupný z internetu: <http://www.fce.vutbr.cz/VST/lvv/technologie.pdf>
- [24] AGROSKIN, I.; Dmitrev, G.T.; Pikalov, F.I. *Gidravlika, Eněrgija*. Moskva, 1964.
- [25] ČIHÁK, F.; MEDŘICKÝ, V. *Hydrotechnické stavby 20 – navrhování jezů*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2001.
- [26] VÝBORA, P.; BEZDÍČEK, V. *Hydrotechnický výzkum: Salmův jez v Blansku*. Výzkumný úkol 2126/76, VUT - VVÚVSH, Brno, 1977.
- [27] CHOW, V. T. *Open Channel Flow*, Mc Graw Hill Book Company, 680 s, 1959.
- [28] SAFFMAN, P.G. *A model of inhomogeneous turbulent flow*. Proc. of the Royal Society, London, A317, s. 417 - 433, 1970.
- [29] SKALIČKA, J. *Výpočet průtoku přes jez při vysokém stupni zatopení dolní vodou*. Vodní hospodářství – řada A, č.9, str. 237 – 242, 1981.

10 PUBLIKACE AUTORA

Šafář R., Picka D., Šulc J., Picka D.: *Meze podobnosti přepadu přes přeliv se zaoblenou korunou*. Nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2009. ISSN 978 - 80 - 7204 - 629 - 4

Pařílková J., Veselý J., Zachoval Z., Gardavská Z., Stračánek P., Šafář R., Picka D.: *Measurement on a Pond dam near the Municipality of Jevíčko*. Eureka 2009, 5th working session, ISSN 978-80-214-3969-6, Brno University of Technology.

Picka D., Šulc J., Mistrová I., Šafář R.: *Vliv dolní vody na průtočnou kapacitu hladinové klapky*. Časopis Vodní hospodářství 07/2012, Praha, ISSN 1211-0760.

Picka D., Šulc J.: *Využití CFD simulace k stanovení zatěžovacích charakteristik hladinového klapkového uzávěru*. Časopis Vodní hospodářství, Praha, ISSN 1211-0760.

11 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno	ING. DANIEL PICKA
Adresa	Alešova 220, Stříbro, 349 01, Česká Republika
Místo narození	Planá

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

- Období (od – do) 2011 – do současnosti
 - Jméno a adresa zaměstnavatele Techsoft Engineering s.r.o., Praha
- Oblast podnikání nebo název odvětví Výzkum a vývoj, CFD simulace
 - Dosažená pozice CFD Analyst, Vedení projektu aerodynamiky ve Škoda Auto, a.s.
- Hlavní pracovní náplň Fyzikální a matematické modelování proudění (CFD), provádění technických analýz

- Období (od – do) 2010 - 2011
 - Jméno a adresa zaměstnavatele Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební
- Oblast podnikání nebo název odvětví Výzkumný záměr " Rozbor podmínek při vzniku zatěžovacího minima hladinové klapky"
 - Dosažená pozice odpovědný řešitel, vedoucí týmu
- Hlavní pracovní náplň Organizační skloubení týmu, fyzikální a matematické modelování (CFD), závěrečná zpráva

- Období (od – do) 2008 - 2010
 - Jméno a adresa zaměstnavatele VZD Invest s.r.o., Areál VUT Kraví hora, Rybkova 23, blok 03 602 00 Brno
- Oblast podnikání nebo název odvětví projektová a investiční činnost ve vodním hospodářství
 - Dosažená pozice Externí samostatný projektant
- Hlavní pracovní náplň úpravy toku, protipovodňová opatření

- Období (od – do) 2009 - 2010
 - Jméno a adresa zaměstnavatele MŠMT - FRVŠ
- Oblast podnikání nebo název odvětví Výzkumný záměr "Vliv dolní vody na průtokové a zatěžovací charakteristiky hladinové klapky"
- Dosažená pozice odpovědný řešitel, vedoucí týmu
- Hlavní pracovní náplň Vedení týmu, fyzikální a matematické modelování (CFD), závěrečná zpráva

VZDĚLÁNÍ

- Období (od – do) 2007 – 2014
- Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
- Hlavní předměty/praktické dovednosti Obor vodní hospodářství a vodní stavby. Dizertační práce na téma "Matematické a Fyzikální modelování pohyblivých hradičích konstrukcí - hladinové klapky."
- Získaný titul Ph.D.

- Období (od – do) 2007 - 2002
- Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodních staveb
- Hlavní předměty/praktické dovednosti Obor vodní hospodářství a vodní stavby. Diplomová práce na téma "Vakový jez s malou vodní elektrárnou na řece Opavě v Krnově."
- Získaný titul Ing.