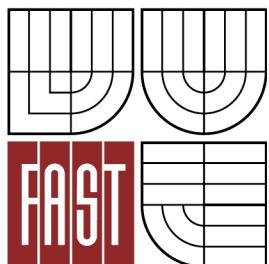


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VLIV PŘÍČNÝCH DNOVÝCH PRVKŮ NA TLUMENÍ ENERGIE PROUDU VE VÝVARU

INFLUENCE OF TRANSVERSE BOTTOM ELEMENTS ON ENERGY DISSIPATION IN THE STILLING
BASIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB KNOFLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Jakub Knoflíček

Název Vliv příčných dnových prvků na tlumení energie proudu ve vývaru

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

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2014

Datum odevzdání bakalářské práce 29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Čábelka, J.; Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice - výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Academia Praha, 1987

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

Šulc, J.: Příspěvek k problematice vodního skoku v divergentním korytě. Vodní hospodářství řada A, č. 9, 1983, str. 247 - 250

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

Šulc, J.; Žoužela, M.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice. Výzkumná zpráva, LVV ÚVS FAST VUT v Brně, 2013

Zásady pro vypracování

Provést rešeršní shrnutí nejčastěji používaných metod pro stanovení rozměrů vývaru. Navrhnout úpravu stávajícího hydraulického prostorového modelu pro alternativy s úpravou výškové úrovně dna včetně příčných dnových prvků jednoduchého tvaru pro tlumení kinetické energie proudu. Na modelu provést pro zvolenou škálu průtoků měření hloubkových poměrů. Výsledky měření vyhodnotit a porovnat účinek úprav na možné zmenšení hloubky a délky vývaru.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá porovnáním míry disipované kinetické energie proudu ve vývarech různých příčných průřezů, doplněných příčnými dnovými prvky na základě modelového výzkumu. Účel práce vyplývá z požadavku rekonstruovat stávající bezpečnostní objekty vodních děl spolu s navýšením jejich kapacity.

V rámci experimentálního výzkumu byly měřeny hloubkové poměry při různých variantách.

Na základě výsledků modelových zkoušek jsou zhodnoceny a tabelárně seřazeny varianty podle účinnosti tlumení kinetické energie proudu. Výsledky práce budou použity pro efektivní návrh zejména dodatečných úprav vývarů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodní skok, vývar, modelový výzkum, příčný práh, disipace

ABSTRACT

The thesis is dealing with comparing of the kinetic energy flow dissipation in stilling basins of different cross-section, supplemented by cross bottom elements based on model research. Purpose of work is the desire to reconstruct the existing building security structure of waterworks along with increasing their capacity.

Within experimental research were measured depths in different variants.

Based on the results of model tests are evaluated and tabulated sorted variants of the combat effectiveness of the kinetic energy flow. The results will be used for the efficient design of additional alterations of stilling basins.

KEYWORDS

Hydraulic jump, stilling basin, model research, bottom element, dissipation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

KNOFLÍČEK, Jakub. *Vliv příčných dnových prvků na tlumení energie proudu ve vývaru*. Brno, 2015. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 29. 5. 2015

Jakub Knoflíček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za ochotu a především za trpělivost, kterou projevil při vedení mé práce.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

OBSAH

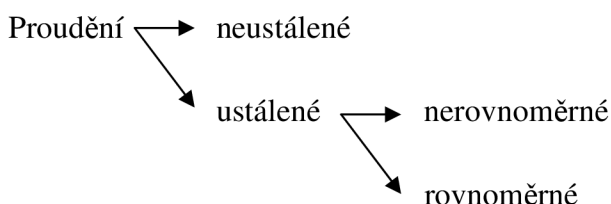
1 ÚVOD - PROCES PŘECHODU Z BYSTRINNÉHO NA ŘÍČNÍ PROUDĚNÍ, VODNÍ SKOK.....	8
1.1 Vodní skok	10
1.2 Druhy vodního skoku	11
2 HYDRAULICKÁ PROBLEMATIKA	15
2.1 Parametry vodního skoku	15
2.1.1 Dimenzování vývaru.....	15
2.1.2 Obdélníkový profil – prizmatické koryto	17
2.1.3 Obdélníkový profil – divergentní koryto.....	17
2.1.4 Lichoběžníkový profil – divergentní koryto (konoidální).....	17
2.2 Návrhy vývaru pro uvedené typy koryt.....	18
2.2.1 Prizmatické koryto.....	19
2.2.2 Divergentní koryto.....	23
2.2.3 Konoidální koryto.....	24
2.3 Možnosti tlumení energie	26
2.3.1 Zajištění dostatečné hloubky vody v odpadním korytě.....	26
2.3.2 Prohloubení vývaru.....	27
2.3.3 Realizace divergentního nebo konoidálního vývaru	27
2.3.4 Realizace lichoběžníkového vývaru složeného průřezu.....	27
2.3.5 Přidání rozražečů	28
2.3.6 Přidání svislých prahů na konci vývaru.....	30
2.3.7 Použití ponořených odrazových můstků.....	30
2.3.8 Použití lyžařských můstků.....	30
3 ÚČEL PRÁCE	32
3.1 Zvyšování požadavků na převedený průtok.....	32
3.2 Zvyšování kapacity vývarů	33

4	MODEL A MĚRNÁ TRAT	34
4.1	Model	34
4.1.1	Skluz	35
4.1.2	Vývar	35
4.2	Měrná trať	46
4.2.1	Měřicí technika	47
4.3	modelová podobnost	48
5	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY	50
5.1	Postup zkoušek	50
5.1.1	Úpravy modelu	50
5.1.2	Vlastní měření.....	51
5.2	Zjištěné charakteristiky	53
5.2.1	Měřené	53
5.2.2	Odvozené	53
5.2.3	Vyhodnocení zkoušek.....	54
6	POROVNÁNÍ S DOSTUPNÝMI ÚDAJI	67
6.1	Vhodné návrhy	68
6.1.1	Projektovaný stav	68
6.1.2	Dodatečná úprava objektu vývaru	68
7	ZÁVĚR	69
8	LITERATURA A POUŽITÉ PODKLADY	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
	SEZNAM PŘÍLOH	78

1 ÚVOD - PROCES PŘECHODU Z BYSTRINNÉHO NA ŘÍČNÍ PROUDĚNÍ, VODNÍ SKOK

Proudění o volné hladině můžeme rozdělit podle proměnlivosti v čase na proudění neustálené, kde se průtočná plocha, průřezová rychlost a průtok v čase mění, a na proudění ustálené, kde jsou tyto veličiny v čase konstantní.

Dále lze proudění dělit na rovnoměrné a nerovnoměrné. Při splnění požadavku na konstantní sklon dna, konstantní drsnost povrchu a tvar průtočného průřezu mluvíme o proudění rovnoměrném. Pokud tyto podmínky splněny nejsou, jedná je o proudění nerovnoměrné.



Při konstantním průtoku Q v libovolném příčném řezu koryta nastávají různé hloubky vody. Ke každé takovéto hloubce lze spočítat měrnou energii průřezu podle:

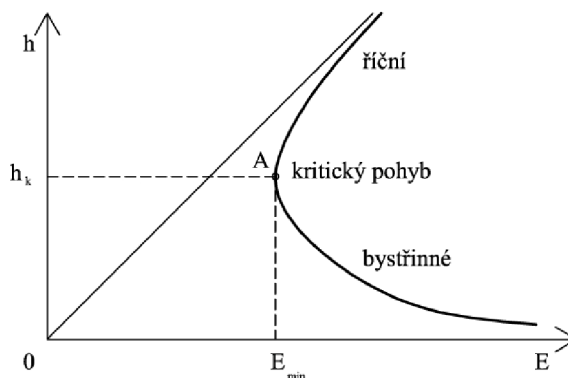
$$E = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2gS^2} , \quad (1.1)$$

kde h maximální hloubka v korytě,
 α Coriolisovo kritérium,
 v průřezová rychlost,
 g tíhové zrychlení,
 Q průtok,
 S průřezová plocha.

Pozn.: *Coriolisovo kritérium vyjadřuje poměr skutečné kinetické energetické výšky k této výšce vyjádřené ze střední průřezové rychlosti [1].*

Měrná energie průřezu (někdy označovaná jako energetická výška průřezu), „je tedy množství energie, které přísluší jednotce tíhy průtoku určitým průřezem a je vztaženo

k úrovni nejnižšího bodu tohoto profilu [1]“. Závislost hloubky h na měrné energii E při konstantním průtoku $Q = \text{konst.}$ V prizmatickém korytě je znázorněna na obr. 1.



Obr. 1 Závislost hloubky na energii proudu

Proudění označujeme při podmínce $h > h_k$ jako říční proudění (podkritické)

$h = h_k$ jako kritické proudění

$h < h_k$ jako bystřinné proudění (nadkritické)

Z obrázku 1 vyplývá, že při hloubce $h \rightarrow 0$, bude i $S \rightarrow 0$, tedy $E \rightarrow \infty$. Proto se ve spodní části grafu energetická výška E asymptoticky blíží vodorovné ose. Naopak při $h \rightarrow \infty$, bude i $S \rightarrow \infty$, takže funkce uvedená v rovnici (1.1) dostane tvar $E = h$, přičemž opět roste $E \rightarrow \infty$. Druhou asymptotou tedy bude osa prvního kvadrantu souřadnicového systému. Mezi těmito asymptotami vytvoří křivka vrchol A se zvláštním hydraulickým významem. Vrcholem křivky A je určen kritický pohyb. Oblasti bystřinného a říčního proudění jsou odděleny vodorovnou přímkou procházející právě bodem A. V režimu kritického proudění je průtok Q převáděn s vynaložením nejmenšího množství energie [1].

Kritická rychlost v_k je průřezová rychlost při kritickém pohybu.

Kritický sklon i_k je sklon při němž je průtok Q převeden rovnoměrným prouděním o hloubce rovné hloubce h_k .

Zvláštní vlastností kritického proudění, na kterou upozornil ve své publikaci *Řešení propustí* Theodor Ježdík už v roce 1924 je, že rychlostní výška kritického pohybu je rovná polovině průměrné hloubky průtočného průřezu. Z minima rovnice (1.1) vychází vztah:

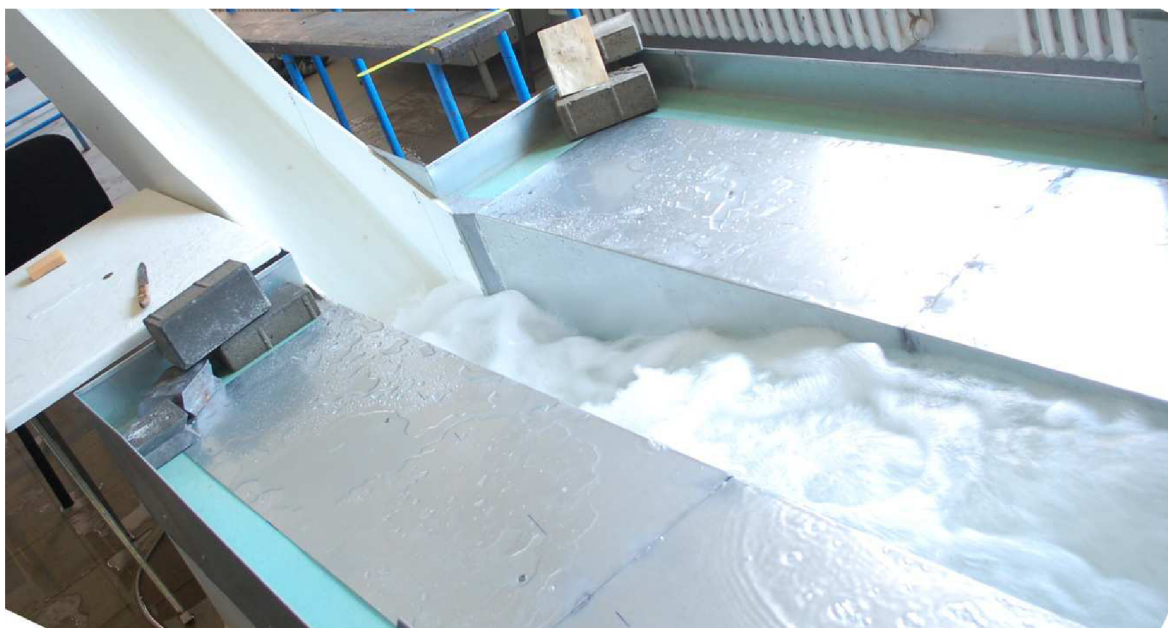
$$\frac{\alpha v_k^2}{2g} = \frac{h_p}{2} \quad (1.2)$$

1.1 VODNÍ SKOK

„Vodní skok je hydraulický jev, který vzniká při **přechodu z pohybu bystrinného do říčního**; vyznačuje se náhlým zvětšením hloubky proudu a přechodem od velké rychlosti k malé [1].“

Jedná se o nespojitý bouřlivý hydraulický děj. Kinetická energie proudu vody se přemění na energii potenciální. Jev je doprovázen značnou ztrátou celkové energie. V důsledku intenzivního víření vody se část energie přemění v teplo. Vlivem strhávání vzduchu je další část energie přeměněna na zvukovou.

Přechod z říčního do bystrinného proudění probíhá spojitě bez žádného jevu podobnému vodnímu skoku. Tento přechod vzniká při změnách sklonu či průřezu.



Obr. 2 Vodní skok ve vývaru obdélníkového průřezu

1.2 DRUHY VODNÍHO SKOKU

Podle polohy tranzitního proudu rozlišujeme vodní skok:

s povrchovým režimem (tranzitní proud je soustředěn při hladině)

s dnovým režimem (tranzitní proud je soustředěn při dně)

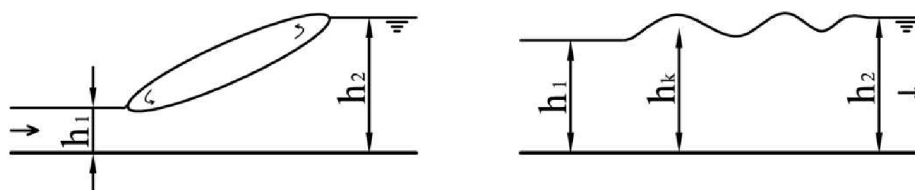
Vodní skok s dnovým režimem lze dále dělit podle Froudova kritéria, které vychází z první vzájemné hloubky h_1 :

$$Fr = \frac{\alpha v_1^2}{gh_1}, \quad (1.3)$$

kde Fr.....Froudovo kritérium,
 αCoriolisovo kritérium,
 v_1rychlost proudu vody v profilu počátku vodního skoku,
 gkonstanta tíhového zrychlení,
 h_1hloubka vody v profilu počátku vodního skoku.

Prostý vodní skok se zřetelně rozlišitelným provzdušněným vodním válcem na povrchu při $Fr_1 > 3$; $h_2 > 1,8 h_k$ (hloubka h_2 je druhá vzájemná hloubka VS viz obr. 3).

Vlnovitý vodní skok tvořený řadou zmenšujících se vln bez vodního válce. Tvoří se při malé výšce vodního skoku, zejména při $h_2 < 1,3 h_k$; $Fr_1 < 3$ (hloubky h_2 a h_k jsou znázorněny na obr. 3) [2].



Obr. 3 Prostý a vlnovitý vodní skok

Pozn.: Podobnou funkci jako Froudovo kritérium plní veličina nazývaná jako *index bystřinnosti* M :

$$M = \sqrt{Fr} \quad , \quad (1.4)$$

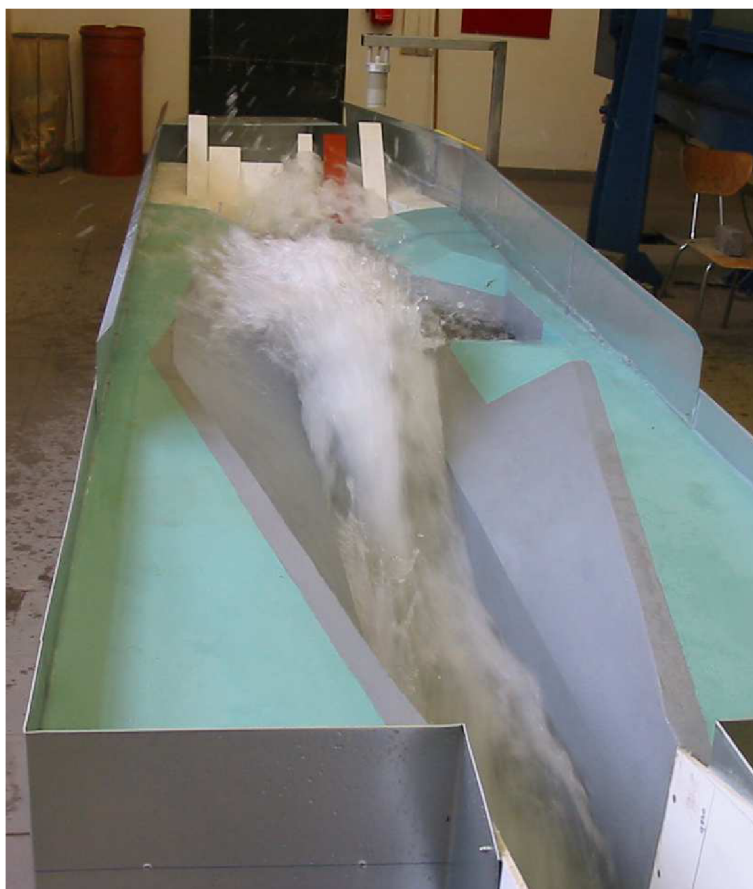
kde Mindex bystřinnosti,
 FrFroudovo kritérium.

Významnější dělení z pohledu této práce je dělení vodního skoku podle polohy s ohledem na vzdušní líc spodní stavby. Rozeznáváme tři polohy vodního skoku:

Vodní skok **oddálený** $h_d / h_2 < 1$,

kde: h_dhloubka dolní vody, tj. přirozeně se vyskytující hloubka proudu pod vodním dílem
 h_2druhá vzájemná hloubka vodního skoku viz obr. 3.

Při úrovni hladiny dolní vody pod úrovní druhé vzájemné hloubky vodního skoku dochází k odsunutí vodního skoku dále po toku a mezi profilem vzdušního líce vodní stavby a vodním skokem je tedy zachováno bystřinné proudění s vysokými rychlostmi (obr. 4). V důsledku vysokých rychlostí se po délce propagují ztráty, které mají za následek snížení energetické výšky a přírůstek hloubky. V okamžiku, kdy hloubka dosáhne hodnoty první vzájemné hloubky h_1 , která přísluší druhé vzájemné hloubce $h_2 = h_d$, jsou teprve splněny podmínky pro vznik vodního skoku. Tato situace může nastat i několik set metrů od jezu [2]. Takovýto vodní skok je při návrhu tlumících prvků nepřijatelný, protože by vyžadoval velmi rozsáhlé a neekonomické opevňování dna a břehů.



Obr. 4 „Vyběhnutí“ VS z prostoru vývaru – oddálený VS

Vodní skok **přílehlý** $h_d / h_2 = 1$

Jsou-li u paty skluzu (jezu) vytvořeny zákonité podmínky pro vznik vodního skoku, vznikne vodní skok přílehlý. Je to situace nahodilá a výjimečná.

Vodní skok **vzdutý** $h_d / h_2 > 1$

Při vyšší úrovni hladiny dolní vody než odpovídá hloubce h_2 má vodní skok tendenci se přemísťovat (v analogii s VS oddáleným) proti směru proudění. Tomu ovšem brání přehradní (jezová) stavba. VS tedy zůstává stabilizován u paty tohoto tělesa. Dolní voda v tomto případě zalévá VS [2].



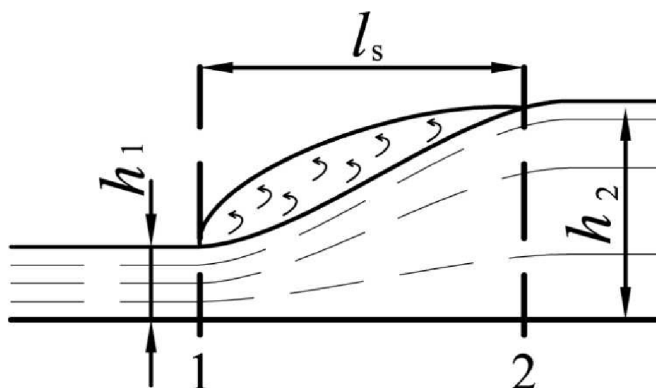
Obr. 5 **Vzdutý VS v prizmatickém korytě**

2 HYDRAULICKÁ PROBLEMATIKA

2.1 PARAMETRY VODNÍHO SKOKU

Vodní skok (popsaný v kapitole 1) lze popisovat následujícími parametry:

- **První vzájemná hloubka h_1** je hloubka proudu vody v profilu bezprostředně před vodním skokem, tj. v oblasti bystrinného proudění (h_1 na obr. 6).
- **Druhá vzájemná hloubka h_2** je hloubka proudu vody v profilu těsně za vodním skokem, tj. v oblasti říčního proudění (h_2 na obr. 6).
- **Délka vodního skoku l_s** je vzdálenost profilů zmíněných vzájemných hloubek. Jedná se o podélný rozměr průmětu povrchového válce vodního skoku do horizontální roviny (l_s na obr. 6).
- **Výškou vodního skoku h_s** rozumíme rozdíl vzájemných hloubek. $h_s = h_2 - h_1$



Obr. 6 Schéma vodního skoku

2.1.1 Dimenzování vývaru

Dimenzování vývaru spočívá ve stanovení

- prostorového řešení
- hloubky vývaru d
- délky vývaru l_v .

„Je-li tlumení energie hydraulicky náročné (velké průtoky a rychlosti), nebo je nutné tlumicí zařízení nutné navrhnout v nepříznivých geologických a morfologických podmínkách, navrhuje se nevhodnější řešení na základě provedení modelového výzkumu [3].“

Pro návržení běžného obdélníkového vývaru v prizmatickém korytě můžeme použít výpočtové schéma uvedené v kapitole 2.2.1. K výpočtu je zapotřebí znát specifický návrhový průtok q_n , jedná se o průtok, vztažený na jeden metr šířky skluzu (jezu). Pro specifický průtok platí:

$$q_n = \frac{Q_n}{b} , \quad (2.1)$$

kde q_n specifický návrhový průtok,
 Q návrhový průtok,
 b šířka vývaru.

Návrhový průtok Q_n volíme takový, pro který budou rozměry vývaru největší. V případě přepadů vysokých hrází bývá zpravidla $Q_n = Q_{\max}$. U jezů zpravidla spolu se zvyšujícím se průtokem výrazně stoupá hladina v podjezí. Je tedy třeba nejnepříznivější situaci a s ní spojený návrhový průtok hledat. Hloubku (a délku) vývaru potom stanovujeme pouze pro návrhový průtok.

Vývar není nutné navrhovat v případech, kdy při všech průtocích z intervalu $< Q_{\min} ; Q_{\max} >$ vznikne vzdutý vodní skok s mírou vzdutí alespoň 1,05:

$$\sigma_{\min} = \frac{h_d}{h_2} \geq 1,05 , \quad (2.2)$$

kde σ_{\min} minimální míra vzdutí,
 h_d hloubka dolní vody (z konzumční křivky koryta v podjezí),
 h_2 druhá vzájemná hloubka vodního skoku.

Vývar rovněž nenavrhujeme v případech, kdy se pod přepadem (pod jezem) vyskytuje při každém průtoku bystřinné proudění. V takovém případě nedojde ke změně proudění a vodní skok se nerealizuje.

2.1.2 Obdélníkový profil – prizmatické koryto

Jako základní, nepoužívanější a nejprobádanější typ vývaru je používán vývar v obdélníkovém korytě konstantní šířky. Prizmatický vývar nemění po délce prohloubené části svůj příčný průřez, který zůstává po délce vývaru konstantní. Pro tento vývar lze použít výpočtový model z kapitoly 2.2.1.



Obr. 7 VS v prizmatickém korytě

2.1.3 Obdélníkový profil – divergentní koryto

V některých případech (zmíněných v kapitole 2.3.3) bývá navrhován vývar divergentní. Takový vývar má v každém svém příčném průřezu tvar obdélníku, jeho šířka však po směru toku roste.

2.1.4 Lichoběžníkový profil – divergentní koryto (konoidální)

V případě realizace vývaru na kanále lichoběžníkového průřezu bývá navržen konoidální vývar. Ten má podobu postupně se rozevírajícího lichoběžníku. Křídla takového vývaru vytvářejí konoidální plochu.



Obr. 8 VS v konoidálním vývaru

2.2 NÁVRHY VÝVARU PRO UVEDENÉ TYPY KORYT

Vhodným návrhem vývaru se snažíme o vytvoření podmínek pro realizaci mírně vzdutého vodního skoku za všech průtoků, které se na díle mohou vyskytnout. Podle tvaru koryta se liší výpočet.

2.2.1 Prizmatické koryto

Hloubka vývaru

V prvním kroku volíme hloubku vývaru $d = 0$, tedy nezahluobený vývar. Z požadavku na míru vzduť $\sigma \in \langle 1,05 ; 1,10 \rangle$ nám ze vztahu 2.2 vyjde h_2' . Odtud pomocí vztahu:

$$d = h_2' - h_d , \quad (2.3)$$

kde d hloubka vývaru,
 h_2' druhá vzájemná hloubka za předpokladu $d = 0$,
 h_d hloubka dolní vody.

zjistíme hloubku vývaru d . Spočítáme celkovou energii v profilu před vzdouvacím objektem (zpravidla přelivem), vzhledem ke srovnávací rovině ve dně navrhovaného vývaru:

$$E_0 = d + h_0 + s_d , \quad (2.4)$$

kde E_0 celková energie v profilu před vzdouvacím objektem,
 d hloubka vývaru,
 h_0 výška přepadového paprsku včetně rychlostní výšky,
 s_d svislá odlehlost přepadové hrany a původního dna podjezí (bez zahluobení vývaru).

Spočítáme kontrahovanou hloubku h_c podle Smetanova vztahu:

$$h_c = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(E_0 - h_c)}} , \quad (2.5)$$

kde h_c hloubka kontrahovaného paprsku,
 q specifický průtok,
 g konstanta tíhového zrychlení,
 E_0 celková energie v profilu před přepadem,
 φ rychlostní součinitel podle Smetany (Tab. 1).

Tab. 1 Rychlostní součinitel podle Smetany

Výška jezu s [m]	Přepadová výška h [m]				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	Rychlostní součinitel φ [-]				
5.0	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97
15.0	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96
25.0	0.92	0.94	0.94	0.95	0.95
35.0	0.91	0.93	0.93	0.94	0.95
45.0	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94

Pro výpočet budeme přepokládat přílehlý vodní skok, kde se bude hloubka kontrahovaného paprsku rovnat první vzájemné hloubce vodního skoku:

$$h_c = h_1 \quad (2.6)$$

Určíme druhou vzájemnou hloubku:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{8\beta Q^2}{gb^2 h_1^3}} \right] \quad (2.7)$$

kde h_2 druhá vzájemná hloubka vodního skoku,
 h_1 první vzájemná hloubka vodního skoku,
 β Boussinesqovo kritérium,
 Q průtok,
 g tíhové zrychlení,
 b šířka žlabu.

Pozn.: Boussinesqovo kritérium vystihuje ovlivnění velikosti hybnosti, způsobené nerovnoměrným rozdělením rychlostí v průřezu. Boussinesqovým kritériem β násobíme hybnost, vyjádřenou ze střední průřezové rychlosti, čímž získáme hybnost reálnou [1].

Stanovíme míru vzdutí:

$$\sigma = \frac{h_d + d}{h_2}, \quad (2.8)$$

kde σ míra vzdutí,
 h_d hloubka dolní vody (z konzumční křivky koryta v podjezí),
 d hloubka vývaru,
 h_2 druhá vzájemná hloubka vodního skoku.

Pro bezpečný návrh vývaru je nutná míra vzdutí alespoň $\sigma \geq 1,05$. Pro zachování ekonomičnosti návrhu volíme $\sigma \leq 1,10$. Pokud naše volba nevyhoví intervalu $\sigma \in \langle 1,05 ; 1,10 \rangle$, upravíme hloubku vývaru d a výpočet opakujeme.

Délka vývaru

Délka vývaru l_v se navrhuje podle délky vodní skoku l_s . Délku prostého vodního skoku lze počítat empirickými vzorci podle různých autorů, díky ohraničení prohloubené části dna je však v porovnání s délkou vodního skoku délka vývaru menší.

Smetanův vztah [1]:

$$l_s = 6(h_2 - h_1). \quad (2.9)$$

Pavlovského vztah [1]:

$$l_s = 0,5[4,5h_2 + 5(h_2 - h_1)], \quad (2.10)$$

někdy uváděný po úpravě jako [2]

$$l_s = 2,5(1,9h_2 - h_1). \quad (2.11)$$

Čertousovův vztah [1]:

$$l_s = 10,3h_1(\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81}, \quad (2.12)$$

Pikalovův vztah [1]:

$$l_s = 4h_1\sqrt{1 + 2Fr_1}. \quad (2.13)$$

Boorův vztah [1]:

$$l_s = 22,4h_k - 32,9\frac{h_2-h_1}{\sqrt{Fr_1}}, \quad (2.14)$$

kde l_sdélka prostého vodního skoku,
 $h_1; h_2$první a druhá vzájemná hloubka vodního skoku,
 h_kkritická hloubka,
 FrFroudovo kritérium.

Výpočet přímo délky vývaru namísto délky vodního skoku definoval například Novák:

$$l_v = K (h_2 - h_1), \quad (2.15)$$

kde l_vdélka vývaru,
 $h_1; h_2$první a druhá vzájemná hloubka vodního skoku,
 Kkonstanta nabývající hodnot:

$3 < y_2/y_1 \leq 4$	$K = 5,50$
$4 < y_2/y_1 \leq 6$	$K = 5,00$
$6 < y_2/y_1 \leq 20$	$K = 4,50$
$y_2/y_1 > 20$	$K = 4,00$

Pavlovskij definoval vztah pro výpočet téhož bez použití součinitele:

$$l_v = 2 (1,9 h_2 - h_1) , \quad (2.16)$$

kde l_vdélka vývaru,
 $h_1; h_2$první a druhá vzájemná hloubka vodního skoku.

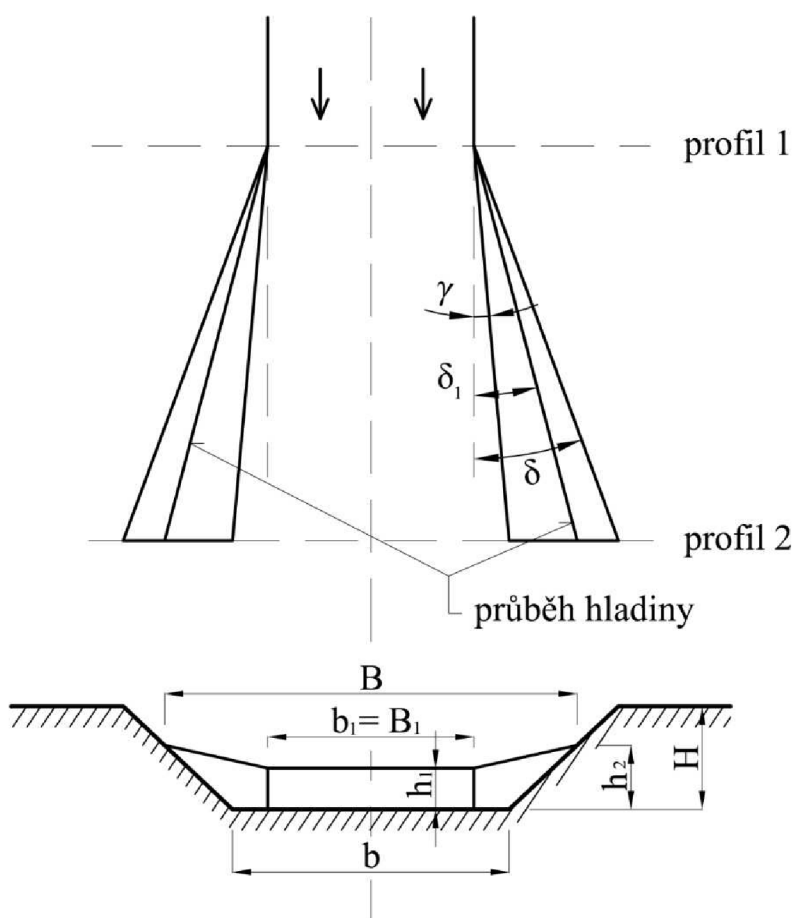
Do rovnic pro výpočet délky vývaru (rovnice 2.15 a 2.16) dosazujeme vzájemné hloubky z vyhovujícího návrhu hloubky vývaru pro návrhový průtok. V případě, že vodní paprsek není podepřen přepadovou plochou nebo skluzem je nutné délku vývaru zvětšit o délku doskoku parsku l_d .

2.2.2 Divergentní koryto

V případech uvedených v 2.2.3 navrhujeme neprizmatické divergentní koryto. V takovém vývaru je podle [4] za splnění podmínek $Fr_1 \leq 35$ a zároveň $\delta \leq 8^\circ 30'$ délka vodního skoku:

$$l_s = \frac{6,4 h_1 \sqrt{Fr_1 - 1}}{1 + 0,1 \tan \delta 6,4 h_1 \sqrt{Fr_1 - 1} (b_1)^{-1}} , \quad (2.17)$$

kde l_sdélka vodního skoku,
 h_1první vzájemná hloubka vodního skoku,
 Fr_1Froudovo kritérium v profilu počátku VS,
 δúhel rozevírání divergentního koryta,
 b_1šířka koryta v profilu s hloubkou h_1 .



Obr. 9 Schéma konoidálního koryta

2.3 MOŽNOSTI TLUMENÍ ENERGIE

„Kinetickou energii vody od přelivů a spodních výpustí je třeba tlumit takovým způsobem, který zaručuje, že nebude ohrožena bezpečnost přehrady a koryto pod přehradou nebude průtoky poškozeno více, než je přípustné [3].“

2.3.1 Zajištění dostatečné hloubky vody v odpadním korytě

Na první pohled nejjednodušším způsobem jak utlumit kinetickou energii přepadového paprsku se jeví zajištění dostatečné hloubky vody v odpadním korytě. Tento způsob však v praxi velmi často naráží na místní podmínky. Zřídka kdy je možné, vzhledem ke sklonovým poměrům a konzumní křivce odpovídající kapacitě koryta pod hrází (pod jezem), tohoto způsobu využít.

2.3.2 Prohloubení vývaru

Druhou možností je prohloubení vývaru. V případě, že nám při výpočtu podle kapitoly 2.2.1 nevyjde dostatečná míra vzduť, jsme nuceni zahloubit vývar o svislou odlehlost d . Rovněž toto řešení může při realizaci narazit na potíže. Nejčastěji se vyskytujícím problémem bývá nákladnost zahlubování vývarů v obtížných geologických podmínkách. Výhodou řešení je naopak většinou zkrácení délky vodního skoku.

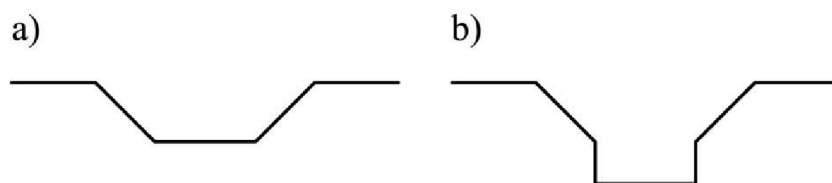
2.3.3 Realizace divergentního nebo konoidálního vývaru

V některých případech (např. u vývarů sdružených objektů) je výhodné rozšířit soustředěný proud a současně provést změnu režimu proudění [5]. Mnohdy také potřebujeme snížit hladinu vodního proudu opouštějícího vývar. Jsme k tomu nuceni požadavkem, aby hloubka dolní vody byla větší než hloubka kritická $h_d > h_k$. Jinými slovy za vývarem požadujeme říční režim proudění. „V případě, že tato podmínka není splněna, vznikne na prahu vývaru podružný přepad s přepadovou výškou rovnající se hloubce kritické a prahem vývaru vznikne nový vodní skok mající za následek značné vymílání dna [3].“ V zájmu zabránění zmíněnému jevu navrhujeme větší šířku prahu vývaru, tedy divergentní vývar obdélníkového průřezu.

Pro rozšíření proudu vody např. pod skluzem a současnou změnu režimu proudění se při použití lichoběžníkového koryta navrhuje vývary konoidální. Z dříve provedených modelových zkoušek vyplývá, že použití divergentních vývarů (ať obdélníkového, nebo lichoběžníkového průřezu) je výhodné ve smyslu vyšší účinnosti disipace energie vodním skokem a také nižšími úrovněmi vzájemných hloubek, v porovnání s prizmatickým obdélníkovým vývarem [5].

2.3.4 Realizace lichoběžníkového vývaru složeného průřezu

Lichoběžníkové vývary složeného průřezu (obr. 10 b) vznikají nejčastěji prohloubením stávajících vývarů lichoběžníkového průřezu (obr. 10 a). Prohloubení bývá navrženo při zvýšení návrhového průtoku Q_n (viz kapitola 3). Výpočtové schéma zatím není známé, výpočty se provádějí jako pro obdélníkový průřez a vlivem vyšší kapacity lichoběžníkového průřezu v horní části je návrh bezpečný.



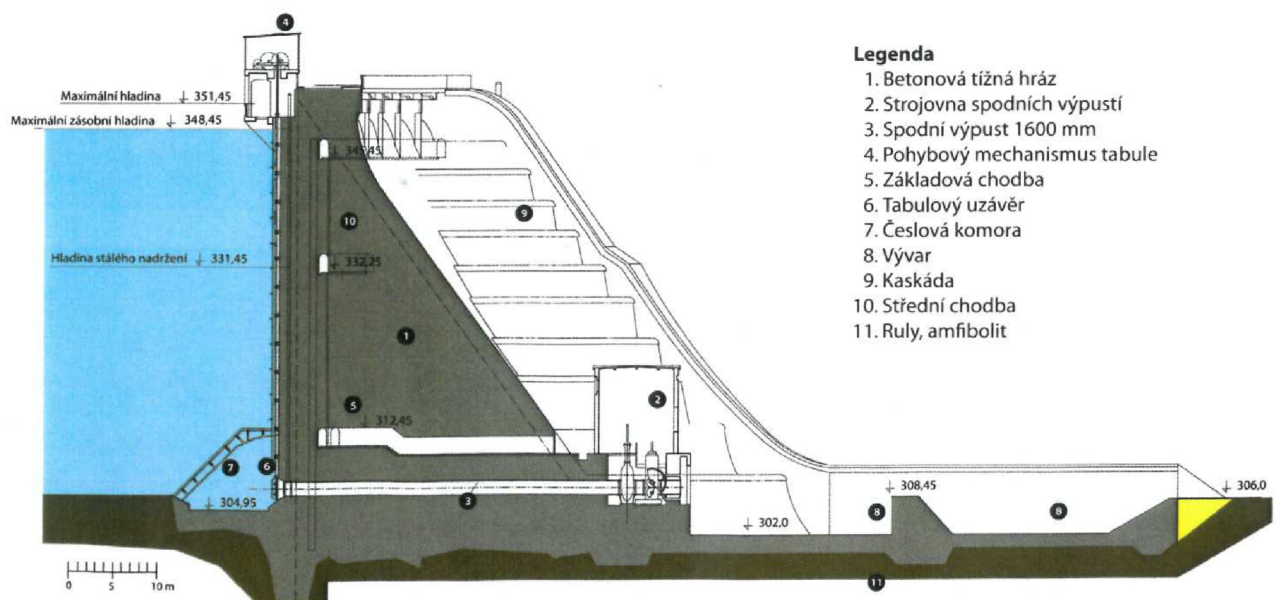
Obr. 10 Koryto lichoběžníkového a složeného průřezu

2.3.5 Přidání rozražečů

Pro vývary s rozražeči není známé žádné obecné výpočtové schéma. Nejbezpečnější je navrhování takovýchto vývarů na základě modelového hydraulického výzkumu. Jsou známy typové vývary s rozražeči nazvané po autorovi Peterkův vývar II. a Peterkův vývar III. Peterkův vývar II. je vhodný pro index bystřinnosti $M_1 = (4,5 \div 15)$, což odpovídá $Fr_1 = (20 \div 225)$, Peterkův vývar III. je vhodný pro Froudova kritéria menších hodnot [3]. Výhodou užití vývaru s rozražeči (obr. 11 a obr. 12) je vyšší míra disipované energie, nevýhodou bývají časté výstřiky mimo vývar.



Obr. 11 Model VD Znojmo s ponořenými rozřežči ve vývaru



Obr. 12 Schéma hráze VD Vranov – vývar s dvojicí mohutných rozřežčů [7]

2.3.6 Přidání svislých prahů na konci vývaru

Nejen ve snaze zkrátit vývar se můžeme uchýlit k návrhu svislých prahů na konci vývaru. Takové opatření spočívá v nahrazení šikmo stoupajícího zakončení vývaru stupněm (stupni) se svislými čelními stěnami. Toto řešení zvýší míru disipované energie oproti běžnému zakončení vývaru šikmým čelem. Výhodou přidání příčných prahů je také vhodnost jejich použití při rekonstrukcích např. bezpečnostních objektů přehrad s minimálními nároky na stavební práce [8].



Obr. 13 Detailní pohled na model se zvýšeným dnem a jedním příčným prahem

2.3.7 Použití ponořených odrazových můstků

Existují případy, kdy je výhodnější vytvořit vodní skok s povrchovým režimem, tj. se spodním válcem. Jedná se o případy, kdy je nutno uvažovat s průchodem plovoucích předmětů, například ledových ker. Malé zpětné rychlosti při dně chrání objekt před podemletím [3].

2.3.8 Použití lyžařských můstků

Umístí-li se odrazový můstek nad hladinu dolní vody, nazývá se lyžařským můstkem a má diametrálně odlišný účinek od můstku ponořeného. Lyžařský můstek „odhazuje“ proud vody od přehrady do takové vzdálenosti, kde můžeme připustit, aby provzdušněný

proud dopadající do řečiště vytvořil výmol v neopevněném dně. Použití lyžařského můstku nevytváří podmínky pro vznik vodního skoku.

Hlavními účely odrazového můstku jsou:

- „odhození“ proudu vody do dostatečné vzdálenosti od vodního díla (podemletí)
- rozptýlení a provzdušnění výtokového paprsku a jeho rozproštění na celou šířku řečiště pod můstkem

Toto řešení není vhodné pod korunové přepady přehrad nebo pod skluzy, naopak nachází uplatnění zejména na výtocích z odpadních štol a tunelů, kde rychlost vytékající vody může dosahovat až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [3]. I přesto lze nalézt na našich vodních dílech lyžařské můstky pod skluzy. Skluz VD Šance (na řece Ostravici) je vybaven lyžařským můstkem v kombinaci s rozražeči. Velké specifické zatížení dna pod můstkem je díky tomuto řešení rozloženo jak po šířce koryta (můstek), tak i ve směru toku (rozražeče) [9].

3 ÚČEL PRÁCE

3.1 ZVYŠOVÁNÍ POŽADAVKŮ NA PŘEVEDENÝ PRŮTOK

V důsledku nabytí účinnosti předpisu č. 590/2002 Sb. (Vyhláška o technických požadavcích na vodní díla) s účinností od 1. 1. 2003 a předpisu č. 367/2005 Sb. (Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 590/2002 Sb., o technických požadavcích na vodní díla) s účinností od 1. 11. 2005 vešly v platnost nové požadované míry bezpečnosti vodních děl při povodni. Tyto míry bezpečnosti jsou odstupňovány podle *kategorí vodního díla* [6]. Jednotlivé kategorie vodních děl jsou ve vyhlášce slovně popsány (tab. 2).

„Požadovaná míra bezpečnosti je vyjádřena pravděpodobností překročení kulminačního průtoku kontrolní povodňové vlny, kterou je třeba přes vodní dílo bezpečně převést [6].“

Tab. 2 Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni [6]

Skupina vodních děl	Označení výše škody	Kategorie vodního díla	Hodnotící hlediska	Požadovaná míra bezpečnosti vodního díla	
				P=1/N	N
A	Velmi vysoké	I. - II.	Očekávají se značné ztráty na lidských životech	0,0001	10 000
		II.	Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,0005	2 000
B	Vysoké	III. - IV.	Očekávají se ztráty na jednotlivých lidských životech	0,001	1000
			Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,005	200
C	Nízké	IV.	Škody pod vodním dílem a ztráty z užitku	0,01	100
			Ztráty jsou jen u vlastníka, ostatní škody jsou nevýznamné	0,02 až 0,05	50 až 20

Nové míry bezpečnosti jsou přísnější než míry vyplývající z legislativy, která byla platná v době vzniku většiny vodních děl v ČR.

3.2 ZVYŠOVÁNÍ KAPACITY VÝVARŮ

Současná legislativa tedy nařizuje bezpečné převedení určitého průtoku. Bezpečné převedení návrhového průtoku je záležitostí bezpečnostního přelivu, (spadiště), a vývaru. Toto je důvod zvyšování kapacit vývarů při mnoha rekonstrukcích a současně důvod provádění testů na modelech a návrhů pro úpravy stávajících objektů.

Účelem této práce je posouzení míry disipované energie proudu ve vývaru při různých konfiguracích a porovnání možných opatření pro zvýšení kapacity vývaru.

4 MODEL A MĚRNÁ TRAT

4.1 MODEL

Pro účely realizace hydraulického modelového výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice, který byl řešen Laboratoří vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební (FAST) VUT v Brně, byl zhotoven prostorový hydraulický model objektu (obr. 14).



Obr. 14 Celkový pohled na model

Model byl umístěn v prostorách hydraulické zkušebny budovy „F“ v areálu FAST VUT v Brně na ulici Veverčí. Tento stávající model jsem využil pro potřeby své bakalářské práce.

Výhodou použití tohoto unikátního modelu bylo využití vstupních podmínek s vysokou rychlostí proudu na konci skluzu, které odpovídají realitě. Měřítko podobnosti modelu je vzhledem k tvaru objektu na VD Boskovice 1:20. Měřítko bylo zvoleno s ohledem na automodelovost proudových jevů v maximálním rozsahu, prostorové možnosti laboratoře a průtočné kapacity příslušného hydraulického okruhu [8].

Model vývaru byl tvarově upravován pro jednotlivé zkoušky míry disipace kinetické energie. Tyto tvarové alternativy jsou označovány M-1 až M-14 a jejich charakteristiky jsou uvedeny v kapitole 4.1.2.

4.1.1 Skluz

Model skluzu je zhotoven z termoplastových desek o tloušťce 10 mm. Stabilita tvaru modelu skluzu byla dosažena upevněním desek do příčných pevných profilů z voděvzdorné překližky. Po délce je skluz na třech místech podepřen ocelovou konstrukcí. Skluz má proměnný sklon v rozmezí 3 % až 55 %.

4.1.2 Vývar

Samotný model vývaru je vystaven z betonu. Model má zvýšené boční stěny za účelem sledování výběhu vodního skoku a možnosti „uměle“ vzdouvat hladinu dolní vody. Výšková úroveň dna modelu vývaru je ve schématech označena jako 0. Pro potřeby modelování stavu při zvýšeném dně (M-2 až M-7 a M-11 a M-12) byla nad nejhlubší (betonové) dno vývaru „osazena“ termoplastická deska, simulující dno na úrovni označené ve schématu jako +48 (obr. 15). Hodnoty představují převýšení úrovně dna od základní (referenční) úrovně dna vývaru s největším prohloubením. Rozměry jsou patrné z obrázků 19 až 36.



Obr. 15 Detail vyvýšeného dna

Ve variantách M-3, M-6 a M-10 až M-13 byl do koncového úseku modelu vývaru vmontován šroubovými spoji jeden příčný práh se svislou čelní stěnou (obr. 13). Ve variantách M-4 a M-5 byly na konec modelu vývaru osazeny příčné prahy dva (obr. 16).



Obr. 16 Detailní pohled na model se zvýšeným dnem a dvěma příčnými prahy

Dno odpadního koryta bylo vyskládáno odnímatelnými betonovými dlažebními kostkami (obr. 17) Toto řešení umožní v první části zkoušek využít odpadní koryto stálého příčného průřezu a v druhé části zkoušek bude možné snížit jeho úroveň pro varianty M-9 až M-14 z výšky +275 mm na výšku +175 mm.

Na konci odpadního koryta je umístěn profil pro osazení dlužových termoplastických desek, které zajišťují potřebné vzduší hladiny dolní vody (obr. 18)

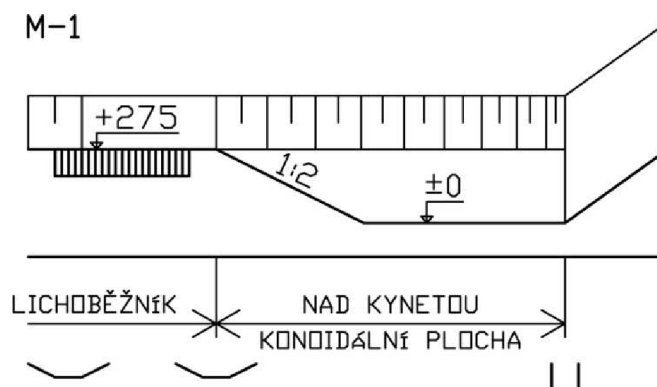


Obr. 17 **Detail odpadního koryta vyskládaného dlažebními kostkami**



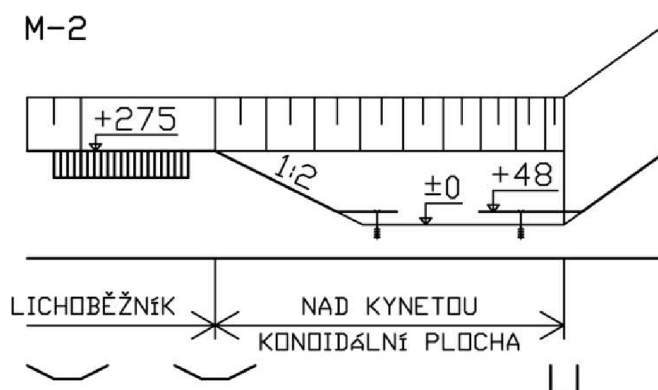
Obr. 18 Detail profilu s dlužovými stěnami zajišťující vzduťí dolní vody

Zkoušené varianty



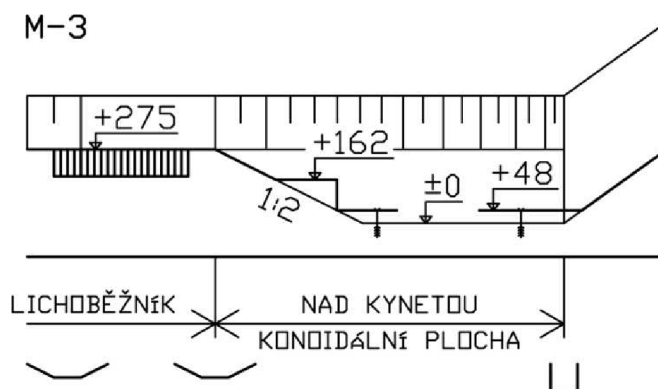
Obr. 19 Varianta M-1

<p>Varianta M-1:</p> <p>příčný profil vývaru</p> <p>dno</p> <p>příčné prahy</p> <p>odpadní koryto</p>	<p>nad kynetou konoidální plocha</p> <p>nezvýšené (± 0)</p> <p>žádné</p> <p>lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)</p>
---	---



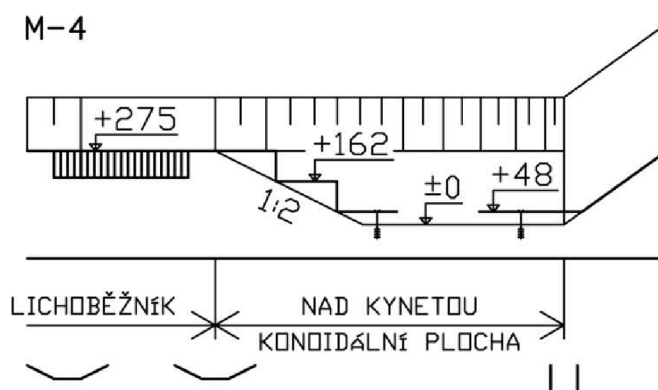
Obr. 20 **Varianta M-2**

Varianta M-2:	příčný profil vývaru	nad kynetou konoidální plocha
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	žádné
	odpadní koryto	lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)



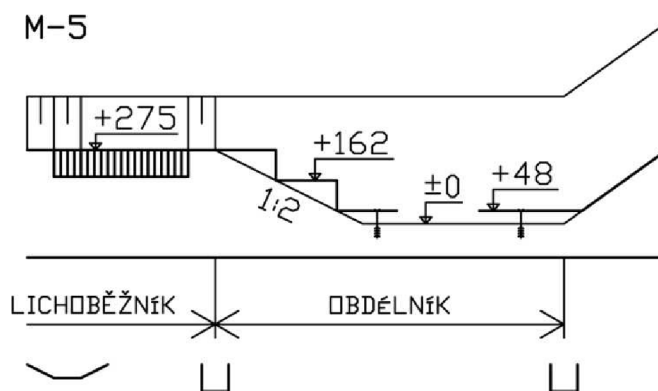
Obr. 21 **Varianta M-3**

Varianta M-3:	příčný profil vývaru	nad kynetou konoidální plocha
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)



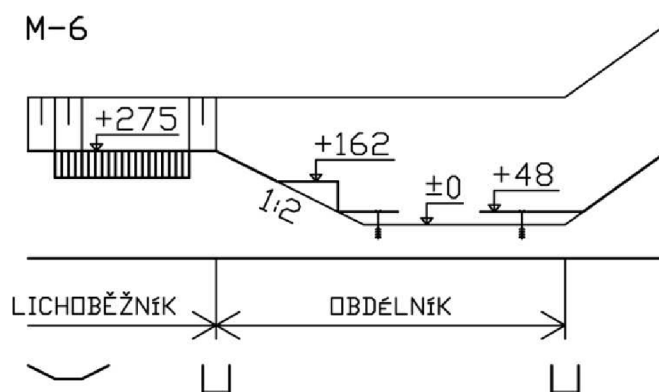
Obr. 22 **Varianta M-4**

Varianta M-4:	příčný profil vývaru dno příčné prahy odpadní koryto	nad kynetou konoidální plocha zvýšené (+48 mm) dva (+162 mm; +275 mm) lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)
---------------	---	---



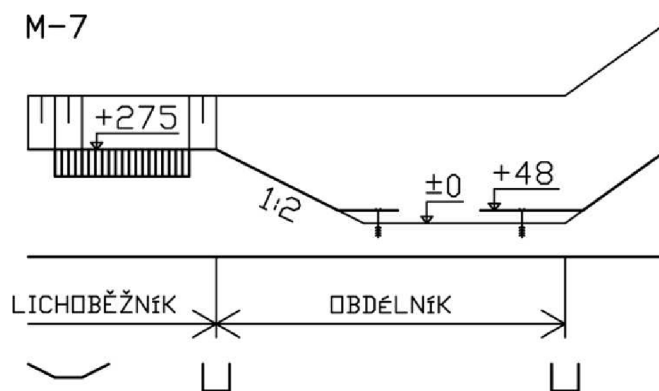
Obr. 23 **Varianta M-5**

Varianta M-5:	příčný profil vývaru dno příčné prahy odpadní koryto	obdélník zvýšené (+48 mm) dva (+162 mm; +275 mm) lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)
---------------	---	--



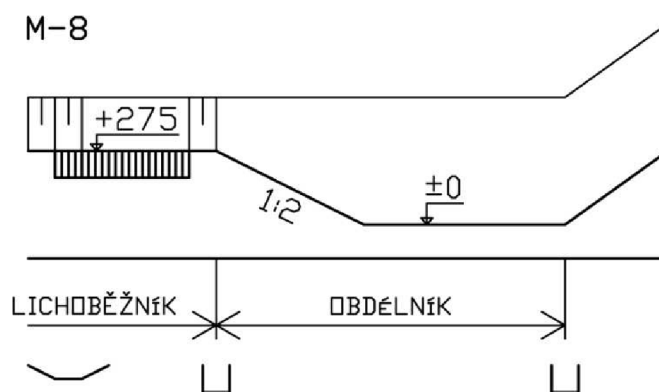
Obr. 24 **Varianta M-6**

Varianta M-6:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)



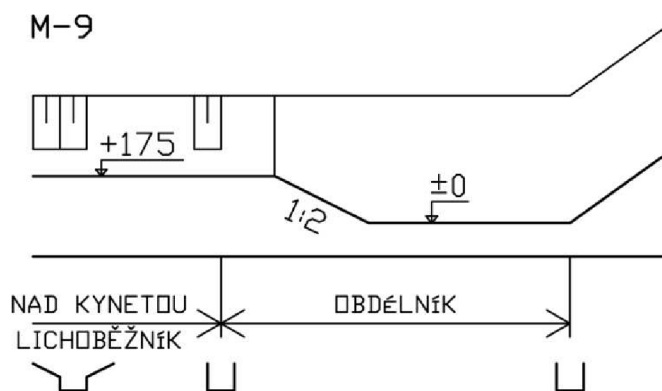
Obr. 25 **Varianta M-7**

Varianta M-7:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	žádné
	odpadní koryto	lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)



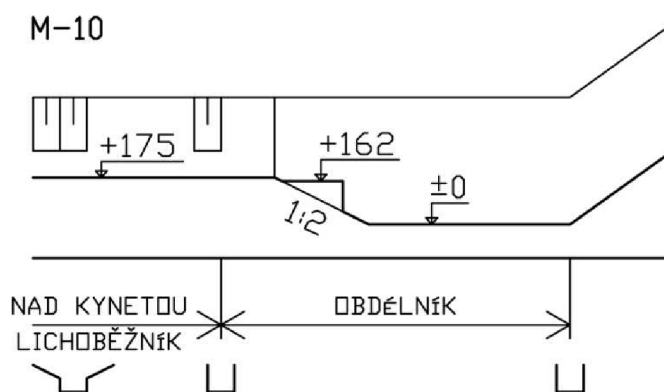
Obr. 26 **Varianta M-8**

Varianta M-8:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	nezvýšené
	příčné prahy	žádné
	odpadní koryto	lichoběžníkové (dno +275 mm) (obr. 39)



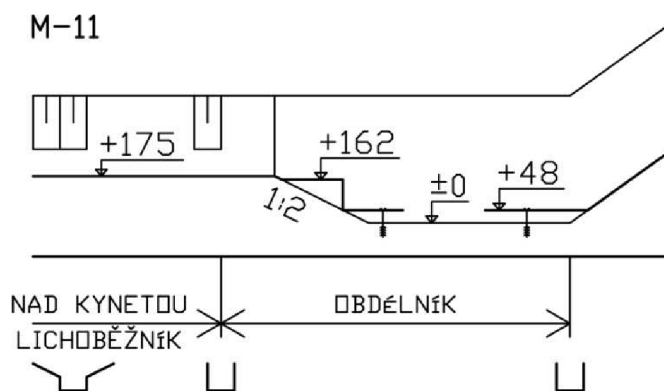
Obr. 27 **Varianta M-9**

Varianta M-9:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	nezvýšené
	příčné prahy	žádné
	odpadní koryto	složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)



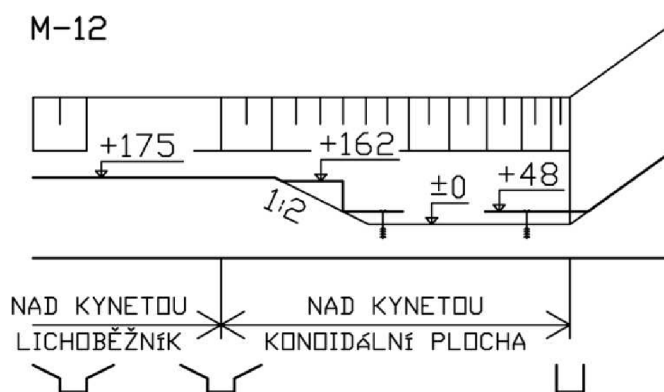
Obr. 28 **Varianta M-10**

Varianta M-10:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	nezvýšené
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)



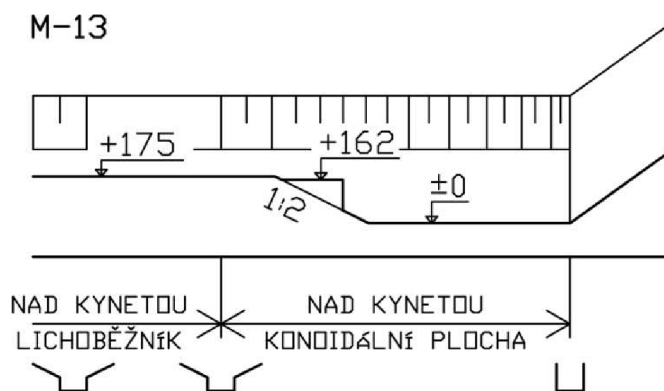
Obr. 29 **Varianta M-11**

Varianta M-11:	příčný profil vývaru	obdélník
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)



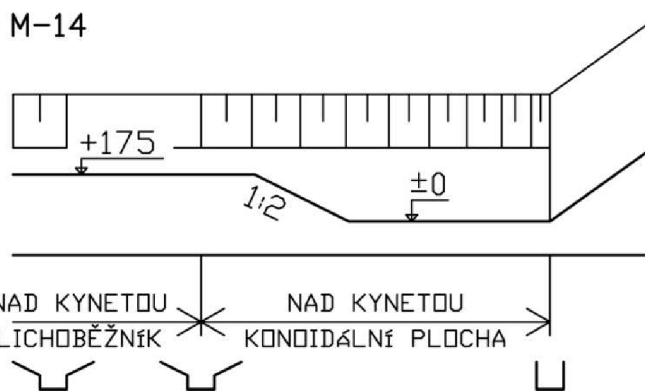
Obr. 30 **Varianta M-12**

Varianta M-12:	příčný profil vývaru	nad kynetou konoidální plocha
	dno	zvýšené (+48 mm)
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)



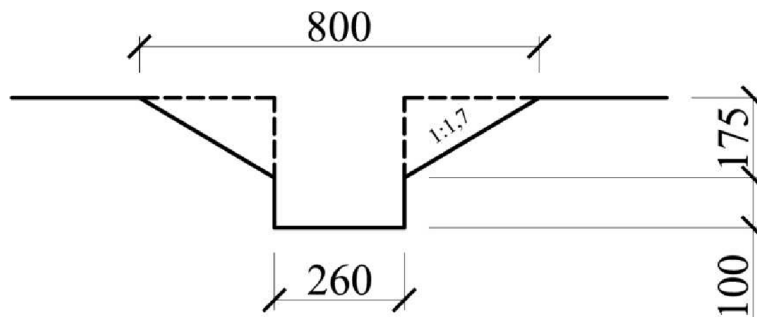
Obr. 31 **Varianta M-13**

Varianta M-13:	příčný profil vývaru	nad kynetou konoidální plocha
	dno	nezvýšené
	příčné prahy	jeden (+162 mm)
	odpadní koryto	složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)

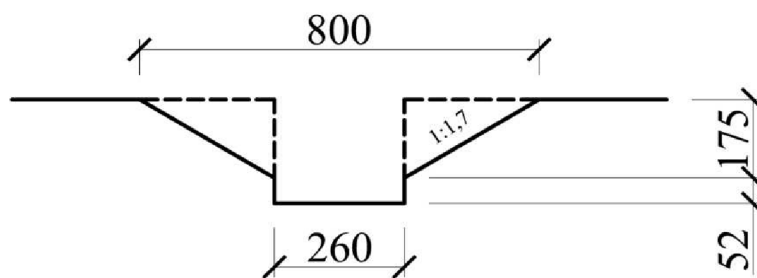


Obr. 32 Varianta M-14

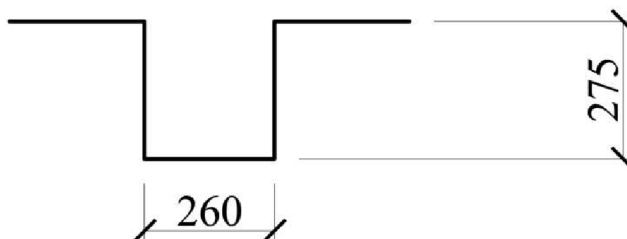
Varianta M-14: příčný profil vývaru nad kynetou konoidální plocha
 dno nezvýšené
 příčné prahy žádné
 odpadní koryto složený profil (dno +175 mm) (obr. 40)



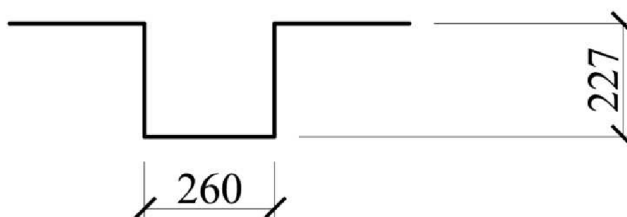
Obr. 33 Řez konoidálním vývarem u variant M-1; M-13 až M-14



Obr. 34 Řez konoidálním vývarem u variant M-2 až M-4; M-12



Obr. 35 Řez prizmatickým vývarem u variant M-8 až M-10



Obr. 36 Řez prizmatickým vývarem u variant M-5 až M-7; M-11

4.2 MĚRNÁ TRAŤ

Model byl připojen na uzavřený (cirkulační) okruh, který je vybaven čerpadly s motory vybavenými frekvenčními měniči. Přítok do nádrže s bezpečnostním přelivem je řešen potrubím DN 250, na kterém je umístěn indukční průtokoměr. Otok z modelu (z odpadního koryta za vývarem) je realizován prostřednictvím usměrňovacího kusu z pozinkovaného plechu vertikálně do suterénního odpadního kanálu. Toto řešení zajišťovalo dostatečnou průtočnou kapacitu modelu.

Hydraulický okruh je ovládán řídicím systémem laboratoře s možností jak ručního, tak automatizovaného režimu. V tomto systému je dosahováno stabilních (ustálených) poměrů pomocí PID (proporcionálního-integračního-derivačního) regulátoru. PID regulátor řídí frekvenční měniče čerpadel v závislosti na velikosti regulační odchylky mezi požadovaným a okamžitým skutečným průtokem zjištěným indukčním průtokoměrem. Hydraulický okruh umožňuje pro měření využít trvalých stabilních průtoků v rozsahu $Q = (8 \div 105) \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro potřeby práce jsem využil pouze rozsah průtoků $Q = (15 \div 80) \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Bezpečnost provozu laboratoře zajišťovalo také ultrazvukové čidlo umístěné nad hladinou nádrže s modelem přelivu a začátku skluzu. Čidlo bylo součástí

řídícího systému hydraulického zkušební okruhu. Přesnost čidlem vykazované hloubky je do 1 mm. Rozlišovací schopnost čidla je 0,25 mm.

Pro vstup do řídicího systému a nastavování průtoků je na stěně laboratoře umístěn 10“ dotykový display.

4.2.1 Měřicí technika

Hloubky proudu vody byly měřeny ocelovou měrkou vždy na kolmici k niveletě dna. Přesnost odečtu měření na měrce je 1mm. Vzhledem k dynamice proudu a příčným a podélným vlnám byly hloubky odečítány s přesností na 5 mm. Výsledné hodnoty použité ke zpracování a vyhodnocení byly po dobu měření zprůměrovány. Vybrané stavy byly rovněž fotografovány. K pořízení fotodokumentace byl použit fotoaparát Nikon D-40 s objektivem se systémem redukce vibrací a rozsahem ohniskových vzdáleností (18 ÷ 55) mm ((27 ÷ 82,5) mm po přepočtení na 35 mm kinofilm).



Obr. 37 Měření hloubky h_1 ocelovou měrkou

4.3 MODELOVÁ PODOBNOST

V případě, že na modelu i na skutečném díle převažují v ovlivňování proudění gravitační síly, platí pro vzájemný přepočít modelové podobnosti Froudovo kritérium modelové podobnosti:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l} , \quad (4.1)$$

kde Fr.....Froudovo kritérium,
 vprůměrná rychlost,
 g tíhové zrychlení,
 l charakteristický délkový rozměr.

Hodnota Froudova kritéria musí být pro proudový jev na díle i na modelu shodná. Pro další přepočty délek, rychlostí a průtoků platí:

$$l_d = l_m \cdot M , \quad (4.2)$$

$$v_d = v_m \cdot M^{0,5} , \quad (4.3)$$

$$Q_d = Q_m \cdot M^{2,5} , \quad (4.4)$$

kde l délkový rozměr,
 vrychlost,
 Q průtok,
 M měřítko podobnosti,
Index_d.....veličina na díle,
Index_m.....veličina na modelu.

V případě, že je proudový jev současně ovlivňován více druhy sil (gravitační, viskozity, povrchové napětí) nelze použít přepočít, který uvažuje dominantní působení jedné z nich. Z toho plynou omezující podmínky modelové podobnosti, které zdola ohraničují platnost použitého kritéria.

Pro Froudovo kritérium platí při modelování proudových jevů se spolupůsobením kapilárních sil vyvolávajících povrchové napětí nutnost dodržení těchto spodních mezních hodnot [8]

- 1) přepadová výška u zaobleného jezového přelivu na modelu musí být $h_{m \min} \geq 20$ mm,
- 2) povrchová rychlost proudu na modelu musí být $u_m > 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aby kapilární síly nebránily tvoření povrchových vln,
- 3) světlá šířka přelivného pole musí být na modelu $b_{0m} \geq 60$ mm,
- 4) dle Averkijeva je nutno splnit pro automodelovost přepadového jevu na přelivu hodnotu:

$$Re_{m \min} = \frac{q}{\nu} > 3000 \div 5000 , \quad (4.5)$$

kde $Re_{m \min}$ Reynoldsovo kritérium,
 q specifický průtok,
 ν součinitel kinematické viskozity.

Skluzu a vývaru se z těchto bodů týká jen bod 2). Podmínka b) je na skluzu splněna v celém rozsahu průtoků, jedná se tedy o pásmo automodelovosti sledovaného jevu. Z toho plyne, že výsledky výzkumu je možné při splnění Froudova kritéria přepočítat na další objekty. Výsledky nejsou zkruseny ani silami způsobenými viskozitou (vliv kinematické viskozity ν) ani silami povrchového napětí.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

5.1 POSTUP ZKOUŠEK

Zkoušky na modelu probíhaly ve dnech 19. až 23. 5. 2014, 2. 6. 2014 a 4. 6. 2014.

5.1.1 Úpravy modelu

Vlastní práce v laboratoři spočívala v technické úpravě modelu na požadovanou alternativu M-1 až M-14 a v následném měření zájmových veličin. Jednotlivé úpravy zahrnovaly kombinace tvarů:

- umístění vyvýšeného dna (+48 mm) (obr. 15)
- umístění jednoho příčného prahu (+162 mm) (obr. 13)
- umístění druhého příčného prahu (+276 mm) (obr. 16)
- změna příčného profilu vývaru z lichoběžníku na obdélník pomocí pozinkovaných plechů tvaru „L“ (obr. 2; 5 a 7)
- snížení dna odpadního koryta z úrovně +275 mm na úroveň +175 mm odstraněním dlažebních kostek a odseknutím horní části prahu vývaru také na úroveň +175 mm. (obr. 38)

Vkládané obtékané povrchy byly stabilizovány k betonovému objektu vývaru šroubovými spoji do hmoždinek v navrtaných otvorech.

Modelové sestavy byly pro potřeby laboratorního měření seřazeny tak, aby byla minimalizována náročnost jejich přestaveb. Sestavy M-9 až M-14 musely být měřeny jako poslední, kvůli nevratnému odstranění prahu vývaru (obr. 38).



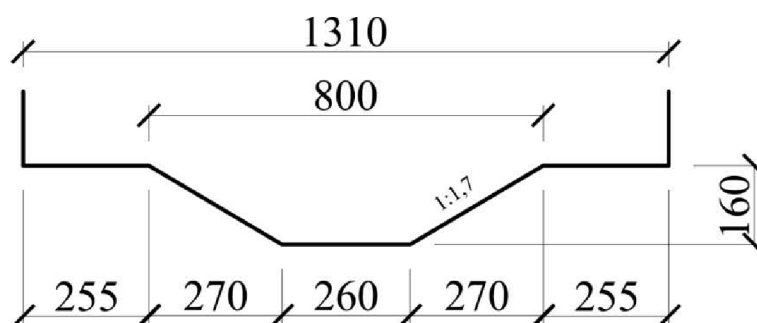
Obr. 38 Detail „odseknuté“ horní části prahu vývaru (M-9 až M-14)

5.1.2 Vlastní měření

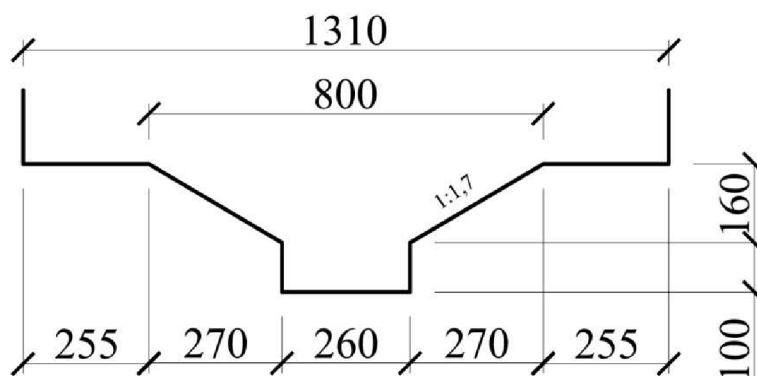
Pro každou z modelových sestav M-1 až M-14 jsem vytvořil podmínky pro vznik přilehlého vodního skoku při šesti stavech průtoku (u varianty M-1 pouze u tří průtoků). Měření jsem tedy provedl při 81 kombinacích stavů modelu. Volil jsem průtoky v rozmezí $Q = (15 \div 80) \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, odstupňované ve spodní polovině rozsahu průtoků po $\Delta Q_1 = 15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, v horní polovině po $\Delta Q_2 = 10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Postup měření sestával ze zahrazení dlužové stěny na konci vývaru, nastavení požadovaného průtoku v řídicím systému a z následného snižování vzdutí dolní vody pomocí dluží. Hladina poproudě za vývarem vlivem regulace klesala

až na úroveň druhé vzájemné hloubky VS, kdy se ze vzdutého stal přilehlý VS. Přilehlý VS byl stabilizován svým počátkem v patě skluzu.

Pozn.: Při určitých průtocích, zejména při $Q < (30 \div 45) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, nebylo možné nadále snižovat hladinu, v důsledku čehož nebyl dosažen přilehlý VS, ale zůstal vzdutý. Nejnižší úroveň hladiny v odpadním korytě vyplývá z kritické hloubky na konci modelu. Ta je určena šířkou dna lichoběžníkového (nebo po odstranění prahu složeného) průtočného profilu (obr. 39 a obr. 40).



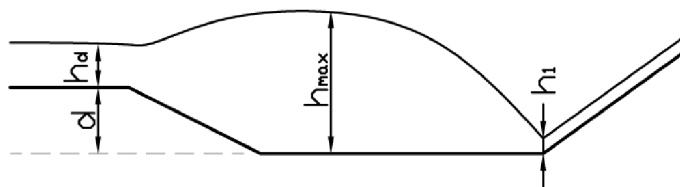
Obr. 39 Příčný řez odpadním korytem u variant M-1 až M-8



Obr. 40 Příčný řez odpadním korytem u variant M-9 až M-14

Zůstal-li přilehlý VS stabilní, odečetl jsem měřené veličiny tj. Q ; h_1 ; $h_2 (= h_d + d)$; h_{\max} . Průtok modelem Q jsem odečítal z displeje řídicího systému, hloubky proudu h_1 a h_2 jsem měřil ocelovým měřidlem orientovaným podélně se směrem proudu, aby bylo proudění měřením co nejméně ovlivněno. Tyto hloubky (h_1 a h_2) jsem zjišťoval na několika místech v příčném profilu a tyto hodnoty jsem průměroval. Maximální výstup hladiny h_{\max}

jsem určil pomocí ocelového měřidla a latě. Maximální výstup hladiny vodního skoku v prostoru vývaru jsem zjišťoval v rovině symetrie koryta (vývaru).



Obr. 41 Schéma hloubek na modelu

Pozn.: h_{\max} jsem odečítal pouze v případech, kdy se lišila od h_2 , jednalo se zejména o případy s instalovanými příčnými prahy na konci vývaru.

5.2 ZJIŠTĚNÉ CHARAKTERISTIKY

5.2.1 Měření

Přímým měřením na modelu jsem zjišťoval následující veličiny:

- | | | |
|---|------------|----------------------------------|
| • Aktuální průtok modelem | Q | $[\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$ |
| • První vzájemnou hloubku VS | h_1 | $[\text{mm}]$ |
| • Úroveň hladiny vody v odpadním korytě | h_d | $[\text{mm}]$ |
| • Maximální výstup hladiny ve vývaru | h_{\max} | $[\text{mm}]$ |

5.2.2 Odvozené

Následující veličiny jsem zjistil z veličin měřených výpočtem:

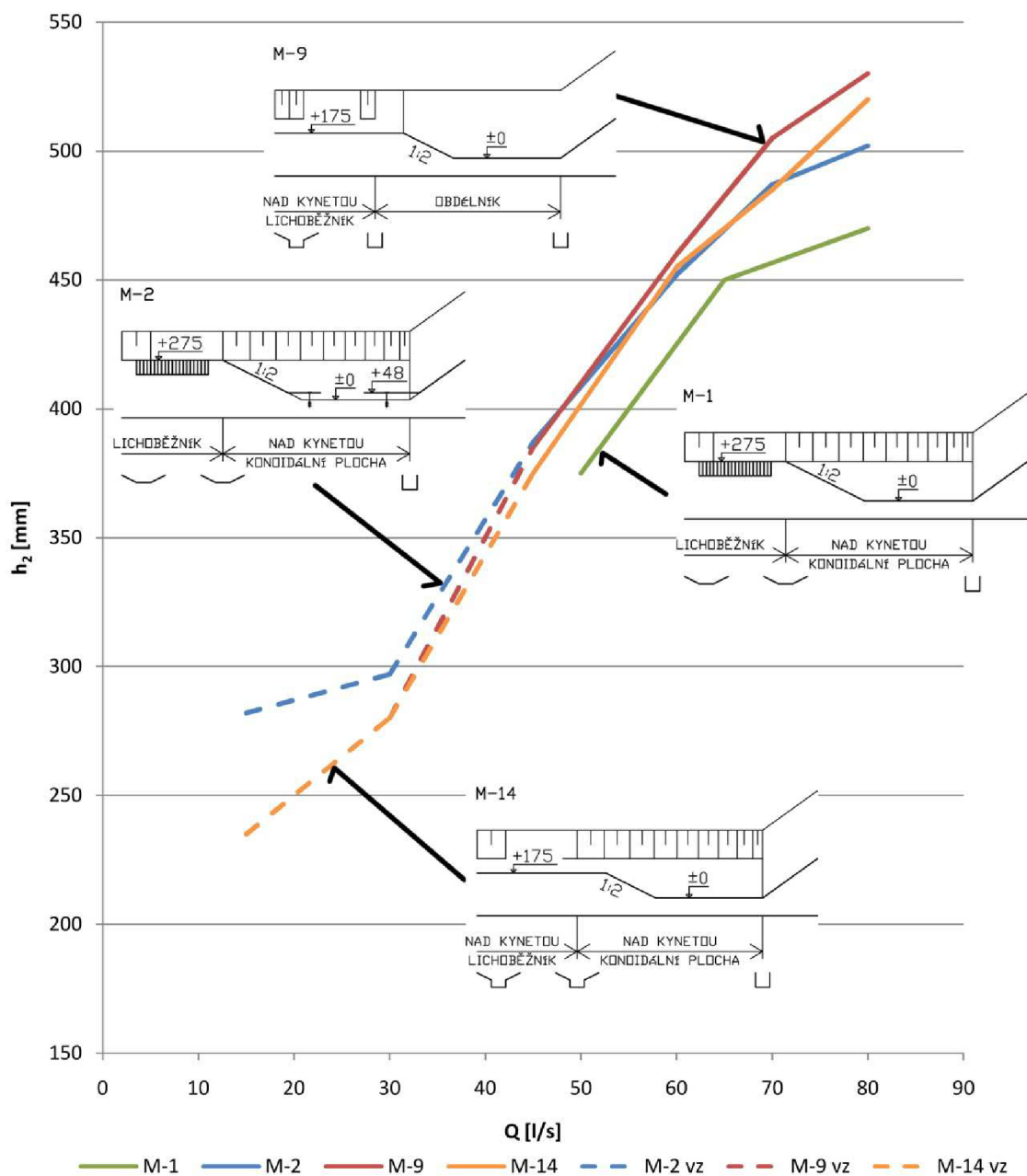
- | | | |
|---|-----------|----------------------------------|
| • Plocha průtočného průřezu profilu 1 | S_1 | $[\text{m}^2]$ |
| • Rychlost proudu v profilu 1 ($v_1 = Q/S_1$) | v_1 | $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ |
| • Froudovo kritérium v profilu 1 | Fr_{1m} | $[-]$ |
| • Měrnou energii průřezu v profilu 1 | E_1 | $[\text{mm}]$ |
| • Druhou vzájemnou hloubku VS ($h_2 = h_d + d$) | h_2 | $[\text{mm}]$ |

• Teoretickou druhou vzájemnou hloubku VS, která by se vytvořila v prizmatickém obdélníkovém vývaru	$h_{2;\text{teor}}$	[mm]
• Plocha průtočného průřezu profilu 2	S_2	[m ²]
• Rychlost proudu v profilu 2 ($v_2 = Q/S_2$)	v_2	[m·s ⁻¹]
• Froudovo kritérium v profilu 2	Fr_{2m}	[-]
• Měrnou energii průřezu v profilu 2	E_2	[mm]
• Rozdíl měrných energií průřezů 1 a 2	ΔE	[mm]
• Podíl rozdílu měrných energií průřezů 1 a 2 a měrné energie průřezu 1	$\Delta E/E_1$	[-]

5.2.3 Vyhodnocení zkoušek

Cílem měření bylo porovnání všech zkoušených variant z hlediska účinnosti disipace kinetické energie proudu. Vyhodnocení je provedeno na základě měření čtrnácti modelových sestav (M-1 až M-14) při šesti hodnotách průtoku. Změřeno bylo celkem 81 kombinací stavů. Původně bylo plánováno porovnávání realizovat pomocí hodnot druhé vzájemné hloubky h_2 . Ukázalo se ale, že porovnatelnost přes hloubky h_2 není zcela spolehlivá právě kvůli různé ploše průtočného profilu odpadního koryta viz obrázky 39 a 40. Informace o hloubce h_2 jsou však důležité pro následné použití poznatků v projekční praxi, související s prohlubováním vývarů. Porovnávaná míra disipace $\Delta E/E_1$ vyjádřená takto poměrově (procentuálně) představuje výstižnou a spolehlivou informaci pro celý zkoušený rozsah s přílehlým VS ($Q \geq 45 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$).

Shodu výsledků u geometricky podobných variant s dvěma odlišnými úrovněmi dna odpadního koryta dokládá obrázek 42. Plnými čarami jsou vykresleny oblasti s přílehlým VS, čárkovanými čarami oblasti se vzdutým VS.

Závislost h_2 na průtoku

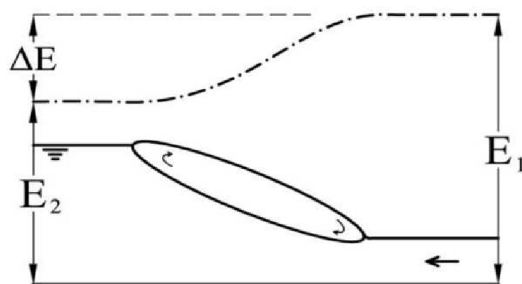
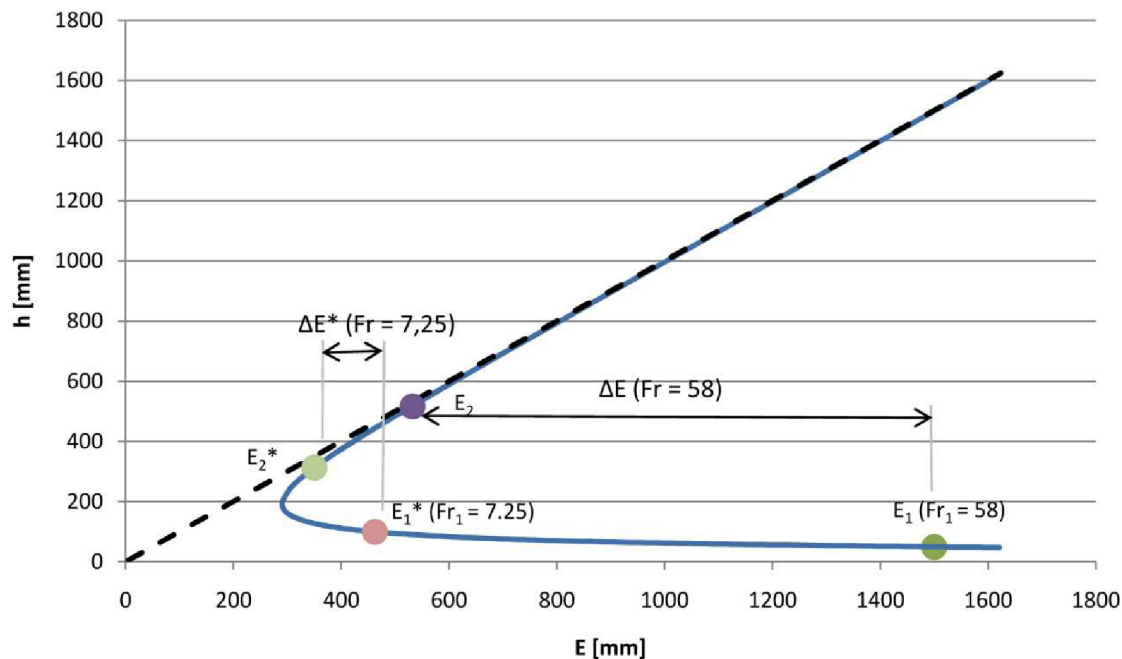
Obr. 42 Porovnání závislostí hloubky h_2 na průtoku Q u variant s různými úrovněmi dna odpadního koryta a vývaru

Vyhodnocení Froudeova kritéria proudu odpadního koryta ukázalo, že se během pokusů ne vždy podařilo na odtoku z modelu dosáhnout říčního proudění. Je důležité si uvědomit, že jsme modelovali stav ve fázi extrémního tlumení energie vývarem. Proud v některých

případech odtéká odpadním korytem prakticky v kritickém režimu a hladinu vody v odpadním korytě nelze snížit, tedy v některých případech ani dosáhnout přilehlé polohy vodního skoku.

Pokud budeme posuzovat tlumení energie proudu v prostém VS v prizmatickém korytě obdélníkového průřezu bez vývaru, zjistíme silnou závislost ztráty energie na Froudově kritériu. Jako příklad uvádím modelový příklad proudu s vysokou rychlostí na konci skluzu. Hodnota Froudova kritéria je $Fr_1 = 58$, rychlost $v_1 = 5,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podle výpočtu se v prostém VS zmaří značná část energie (65%). Poměr $h_2/h_1 = 10,28$. V demonstračním případě snížíme rychlost (při zachování konstantního průtoku) na polovinu. Tedy $v = 2,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Fr = 7,25$. Potom vodní skok v korytě (bez vývaru) zmaří pouze 20,8% energie vstupující do VS (obr. 43). Poměr hloubek $h_2/h_1 = 3,34$. Účinnost tlumení lze tedy předpokládat při rostoucí hodnotě Froudova kritéria vyšší. Toto je též potvrzeno hodnotami v tabulce 6. U jednotlivých úprav to však bude nutné potvrdit navazujícími zkouškami.

Závislost hloubky na energii průřezu - vliv Froudova kritéria na ztrátu energie ve vodním skoku v prizmatickém korytě $Q = 80\text{l/s}$



Obr. 43 Závislost hloubky na energii průřezu – vliv Froudova kritéria na ztrátu energie ve vodním skoku v prizmatickém korytě obdélníkového průřezu

Mezi sestavami se dnem odpadního koryta na úrovni +275 mm (nesnížené dno) vykázaly nejvyšší poměr zmařené ku počáteční energii $\Delta E/E_1$ konfigurace:

Varianta	$\Delta E/E_1$
• M-4	0,7015
• M-5	0,6990

Za nimi se při porovnávání míry disipace následuje varianta se sníženým dnem odtokového koryta (+175 mm)

• M-10	0,6943
--------	--------

Úplné srovnání všech variant s nesníženým dnem odpadního koryta je v tabulkách 3 a 4. Srovnání variant se sníženým dnem odpadního koryta je v tabulce 5.

Na obrázku 44 je názorně patrné porovnání účinnosti disipace energie při různých úpravách vývaru pomocí příčných dnových prvků. Hodnoty míry disipace platí pro mnou sledované stavy s přílehlým vodním skokem. Stavy reprezentované hodnotami Froudova kritéria jsou uvedeny v tabulce v příloze.

Tab. 3 Seřazení variant podle míry disipace energie pro nesnížené odpadní koryto – první část

Varianta	$[-]$ $\Delta E/E_{1m}$	$[-]$ $h_{dm}+d/h_1$	$[-]$ h_{dm}/h_1	
M-4	0.7015	8.64	4.10	
M-5	0.6990	8.74	4.20	
M-6	0.6911	9.04	4.50	
M-3	0.6883	9.14	4.60	
M-1	0.6739	9.40	3.90	

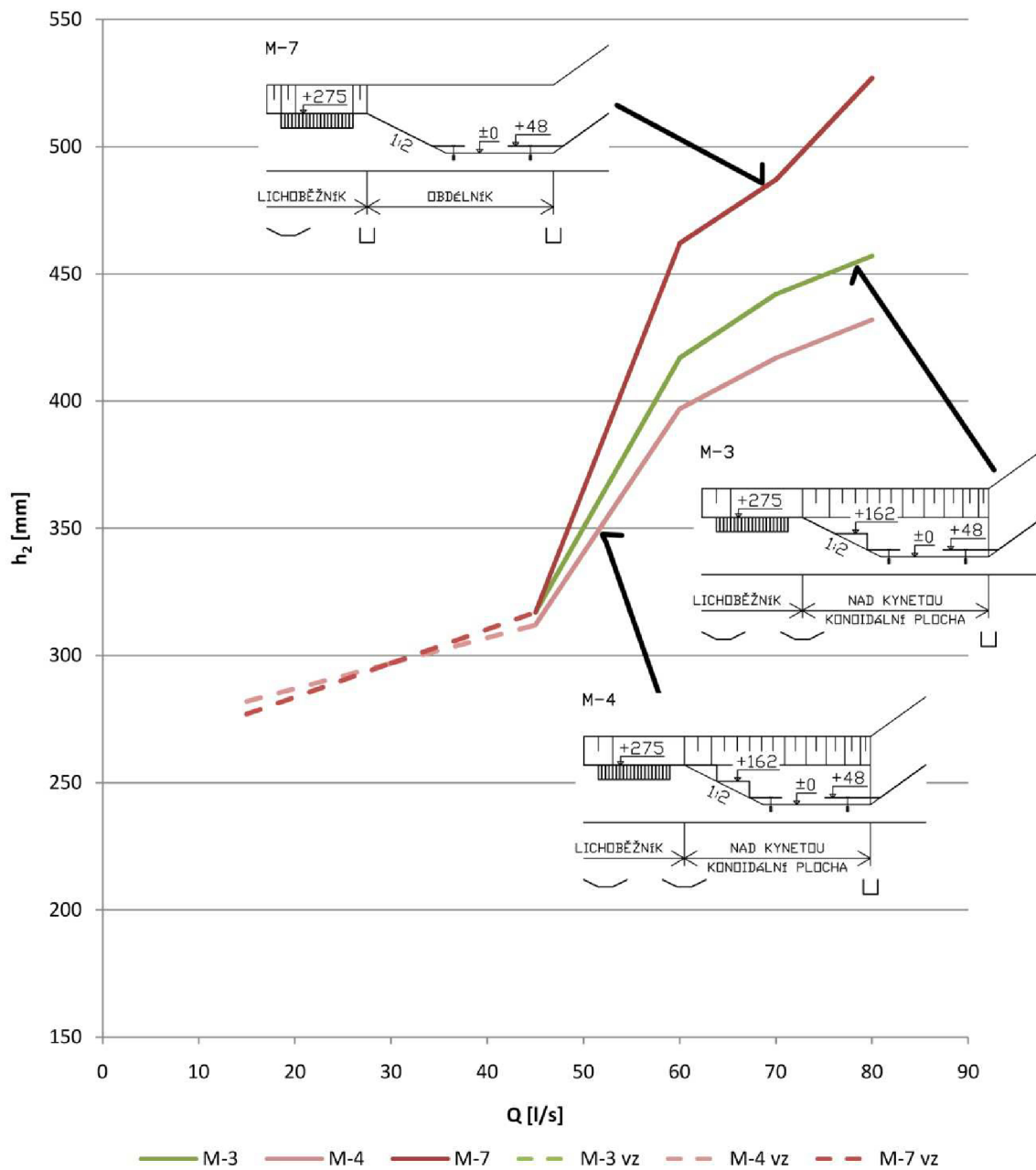
Tab. 4 Seřazení variant podle míry disipace energie pro nesnížené odpadní koryto – druhá část

Variant	$[-]$ $\Delta E/E_{1m}$	$[-]$ $h_{dm}+d/h_1$	$[-]$ h_{dm}/h_1
M-2	0.6614	10.04	5.50
Teor.	0.6479	10.28	10.28
M-8	0.6470	10.60	5.10
M-7	0.6456	10.54	6.00

Tab. 5 Seřazení variant podle míry disipace energie pro snížené odpadní koryto

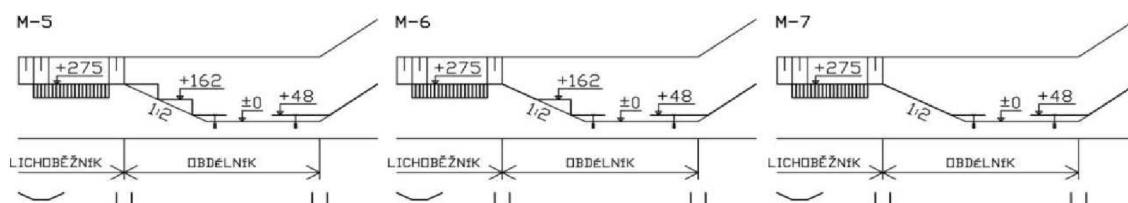
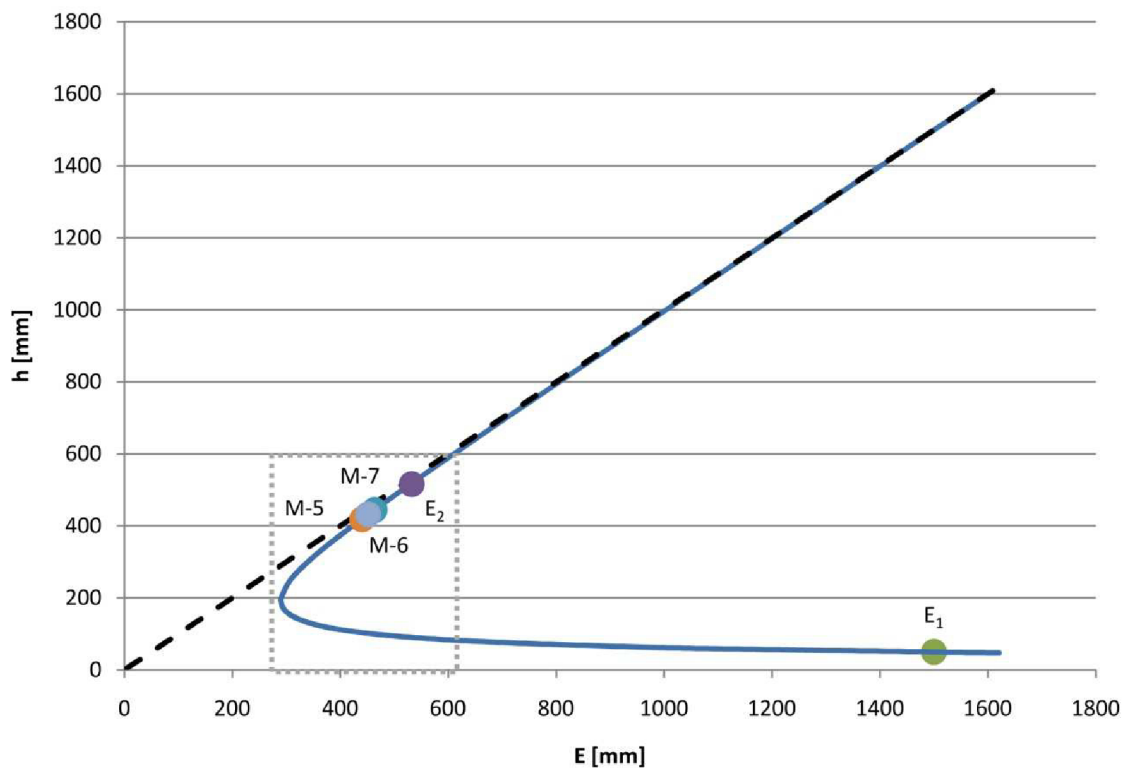
Varianta	[-] $\Delta E/E_{1m}$	[-] $h_{dm}+d/h_1$	[-] h_{dm}/h_1	[-] h_{max}/h_1	
Teor.	0.7015	8.64	4.10		
M-10	0.6943	10.00	5.10	10.00	<p>M-10</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK OBDELNÍK</p>
M-13	0.6872	9.60	5.50	9.60	<p>M-13</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK NAD KYNETOU KONOIDÁLNÍ PLOCHA</p>
M-12	0.6809	10.16	6.90	10.16	<p>M-12</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK NAD KYNETOU KONOIDÁLNÍ PLOCHA</p>
M-11	0.6589	11.56	7.60	11.56	<p>M-11</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK OBDELNÍK</p>
M-14	0.6489	9.90	6.90	9.90	<p>M-14</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK NAD KYNETOU KONOIDÁLNÍ PLOCHA</p>
M-9	0.6427	9.80	7.10	9.80	<p>M-9</p> <p>NAD KYNETOU LÍCHOBĚŽNÍK OBDELNÍK</p>

Závislost h_2 na průtoku



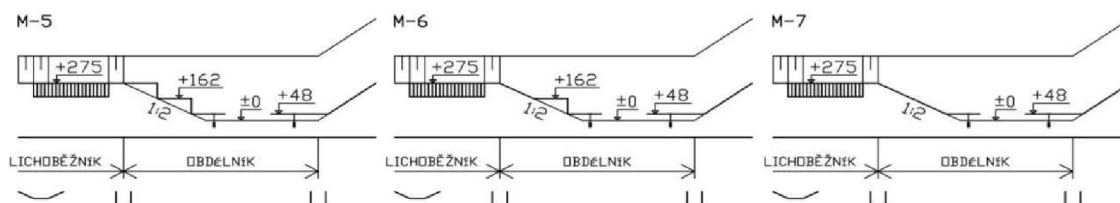
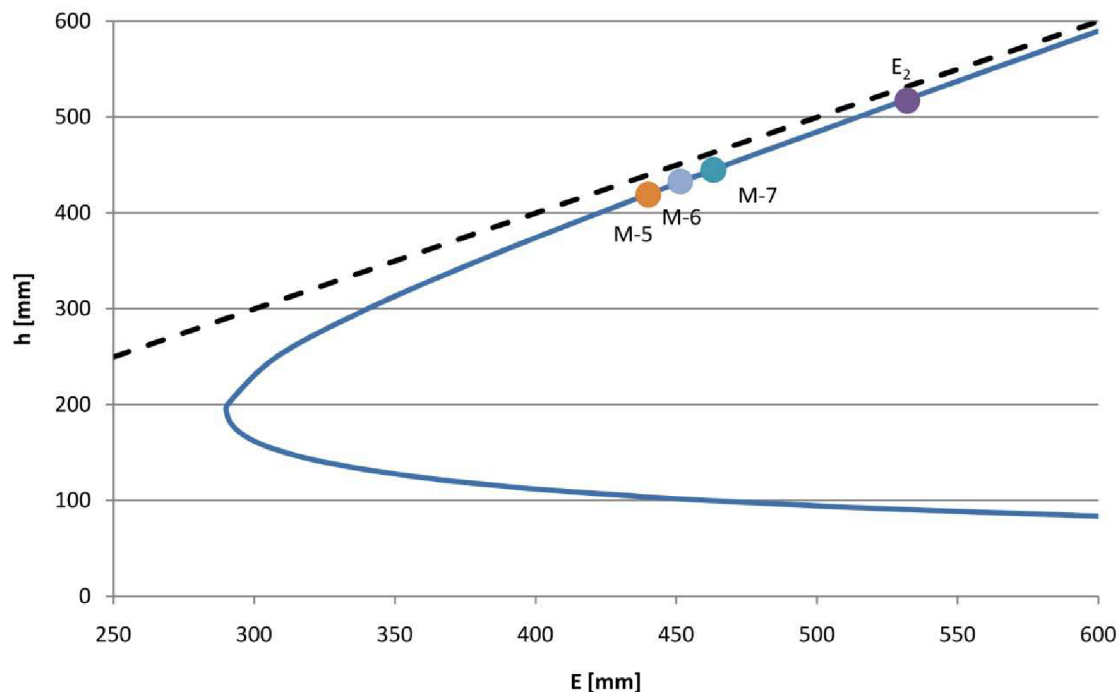
Obr. 44 Porovnání závislostí hloubky h_2 na průtoku Q u variant se zvýšeným dnem vývaru a příčnými dnovými prvky (M-3; M-4; M-7)

Závislost hloubky na energii průřezu - přehled $Q = 80 \text{ l/s}; Fr_1 = 58; b = 260 \text{ mm}$



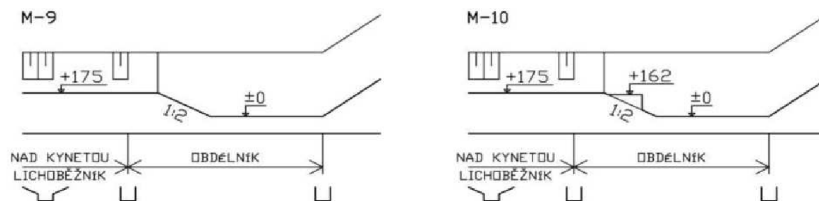
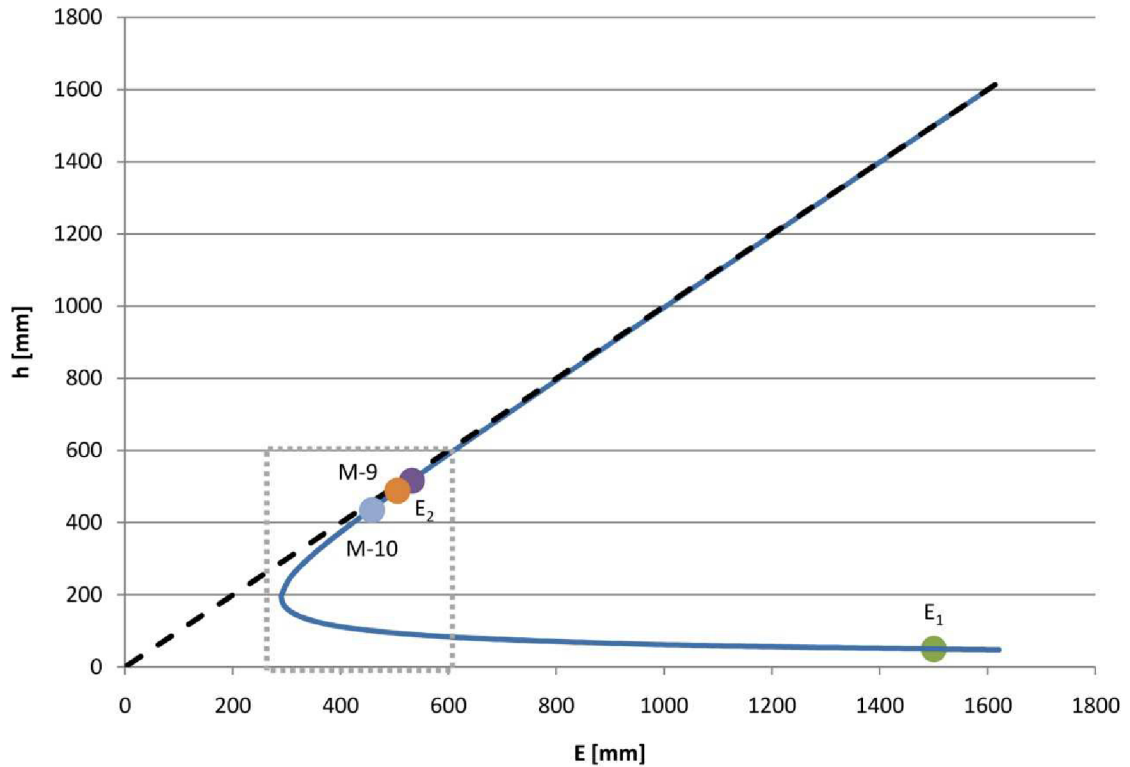
Obr. 45 Závislost hloubky na energii průřezu – nesnížené odpadní koryto (+275 mm) – přehled

Závislost hloubky na energii průřezu - detail $Q = 80 \text{ l/s}$; $Fr_1 = 58$; $b = 260 \text{ mm}$; $E_1 = 1500 \text{ mm}$



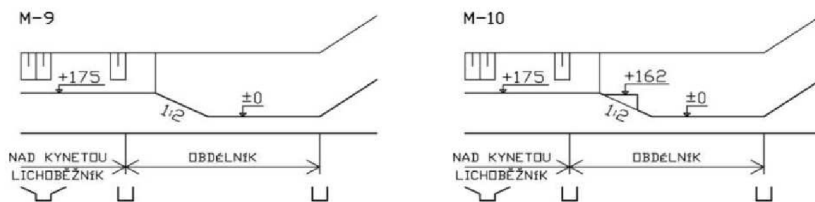
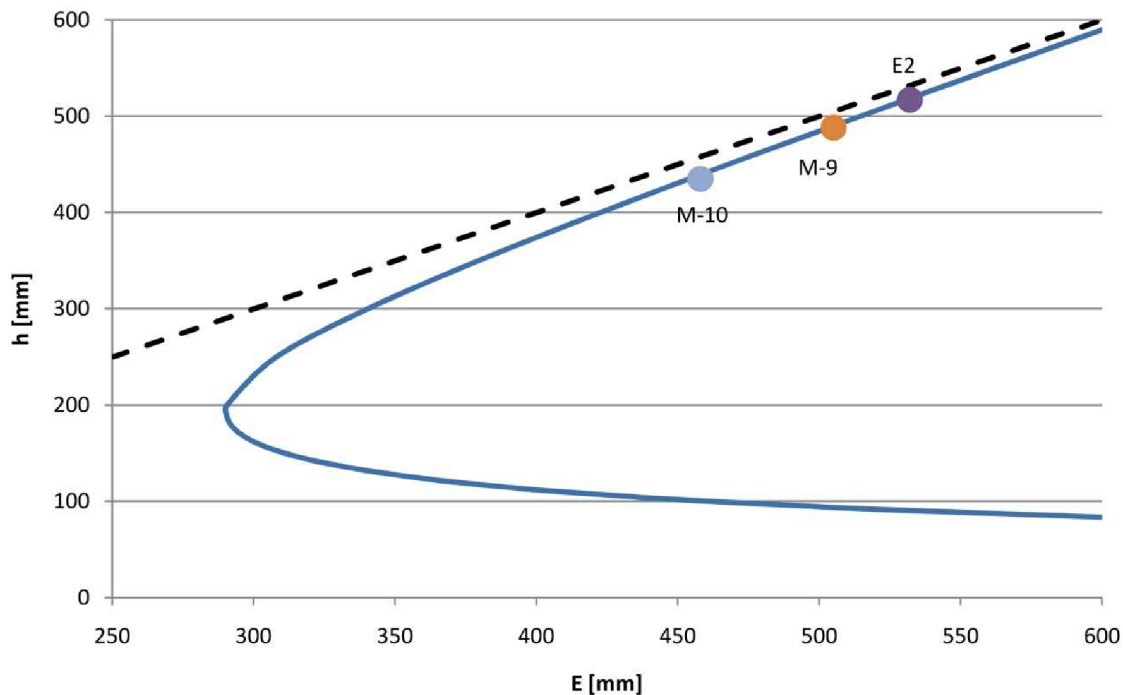
Obr. 46 Závislost hloubky na energii průřezu – nesnížené odpadní koryto (+275 mm) – detail

Závislost hloubky na energii průřezu - přehled $Q = 80 \text{ l/s}; Fr_1 = 58; b = 260 \text{ mm}$



Obr. 47 Závislost hloubky na energii průřezu – snížené odpadní koryto (+175 mm) – přehled

Závislost hloubky na energii průřezu - detail
 $Q = 80 \text{ l/s}$; $Fr_1 = 58$; $b = 260 \text{ mm}$; $E_1 = 1500 \text{ mm}$



Obr. 48 Závislost hloubky na energii průřezu – snížené odpadní koryto (+175 mm) – detail

6 POROVNÁNÍ S DOSTUPNÝMI ÚDAJI

Mnou nalezené zde citované zdroje se zabývají porovnáním účinností vývarů obdélníkového průřezu a vývarů konoidálních.

Tab. 6 Ztráty energetické výšky průřezu $\Delta E/E_1$ v závislosti na vstupních parametrech proudu a tvaru koryta vývaru [5]

	Fr_1	$B_1/h_1 = 1.00$	$B_1/h_1 = 2.00$	$B_1/h_1 = 4.00$
tg $\gamma = \text{tg } \delta = 0.000$ obdélníkové prizmatické koryto	3	0.05	0.05	0.05
	5	0.15	0.15	0.15
	10	0.28	0.28	0.28
	15	0.38	0.38	0.38
tg $\gamma = \text{tg } \delta = 0.050$ divergentní vývar obdélníkového průřezu	3	0.14	0.12	0.08
	5	0.28	0.21	0.18
	10	0.47	0.38	0.34
	15	0.57	0.51	0.46
tg $\gamma = \text{tg } \delta = 0.100$ divergentní vývar obdélníkového průřezu	3	0.20	0.16	0.10
	5	0.34	0.26	0.21
	10	0.51	0.43	0.38
	15	0.61	0.57	0.51
tg $\gamma = \text{tg } \delta = 0.125$ divergentní vývar obdélníkového průřezu	3	0.26	0.18	0.13
	5	0.38	0.30	0.14
	10	0.55	0.49	0.41
	15	0.70	0.63	0.54

„Z hodnot uvedených v tabulce 6 vyplývá, že divergentní vývar obdélníkového i lichoběžníkového průřezu je výhodnější po stránce účinnější disipace energie vodním skokem a tedy i menší vzájemné hloubky než obdélníkový prizmatický vývar [5].“

„Divergentní vývary jsou neúčinnější pro relativně úzký vodní paprsek (nízký poměr B_1/h_1). Z hlediska disipace energie se jeví neúčinnější největší rozevření, které je však omezeno počátkem odtrhávání vodního paprsku od bočních stěn koryta. Pro divergentní vývary obdélníkového průřezu k tomuto jevu dochází při rozevření $\text{tg } \gamma = \text{tg } \delta > 0,150$ [5].“

Uvedené výsledky jsou také v souladu s očekáváním, že příčný práh zvýší podíl zmařené energie ve vývaru.

6.1 VHODNÉ NÁVRHY

6.1.1 Projektovaný stav

Navzdory minimálnímu počtu nových vodních děl s vývarem tlumícím velké množství energie bude mít tato práce pro projekci význam. Důvodem může být omezení projektanta například nepříznivou morfologií terénu (nedostatek prostoru pro vývar) nebo ekonomikou návrhu. Spolu s morfologií terénu může svoji roli sehrát i geologie.

6.1.2 Dodatečná úprava objektu vývaru

U rekonstrukcí dle mého názoru naleznou příčné prahy ještě větší uplatnění než při projektování vývarů nových. Možnost podstatně zvýšit množství disipované energie při zachování důležitých parametrů vývaru (jako je např. jeho délka) může příznivě ovlivnit zejména ekonomickou stránku celé rekonstrukce. Dalším důvodem většího uplatnění u rekonstrukcí je zejména jejich množství, jak bylo nastíněno v kapitole 3.2.

7 ZÁVĚR

Práce se zabývala srovnáváním účinnosti jednotlivých úprav vývaru pomocí dnových příčných prvků (prahů) na základě zkoušek provedených na prostorovém hydraulickém modelu úplného bezpečnostního objektu VD Boskovice. Na základě těchto zkoušek byly potvrzeny jako nejvhodnější konfigurace dnových prvků (M-4; M-5) pro potřeby případných rekonstrukcí stávajících vodních děl doprovázených požadavky na převádění zvýšených průtoků v porovnání s průtoky pro vývar návrhovými.

Práce neřeší konkrétní návrh, proto bude vhodné při použití těchto typů úprav každý návrh vývaru ještě ověřit modelovou zkouškou. Z uvedených výsledků je možné při respektování zásad modelové podobnosti provést vhodný návrh např. dodatečné úpravy vývaru při jeho rekonstrukci.

Použití příčných prahů je relativně účinnější v podmínkách charakterizovaných nižšími hodnotami Froudova kritéria. Současně je také u jejich použití nutno upozornit na vyšší úroveň výstupu hladiny v prostoru vývaru doprovázenou výstřiky vodní tříště.

8 LITERATURA A POUŽITÉ PODKLADY

- [1] BOOR, Boris, KUNŠTÁTSKÝ Jiří a PATOČKA Cyril. *Hydraulika: pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL / ALFA, 1968.
- [2] JANDORA, Jan a ŠULC Jan. *Hydraulika: Modul 01*. Brno, 2006.
- [3] KRATOCHVÍL, Jiří a STARA Vlastimil. *Přehrady*. Vyd. 2. Brno: VUT, 1990, 225 s. ISBN 80-214-0094-3.
- [4] RYBNIKÁŘ, Jiří. *Hydraulika I*. Praha: SNTL, 1979.
- [5] ŠULC, Jan. *Příspěvek k problematice vodního skoku v divergentním korytě*. Vodní hospodářství. 1983, 9/1983: 247 - 250.
- [6] Zákon o technických požadavcích na vodní díla. *590/2002 Sb.* 2002. Dostupné také z: portal.gov.cz/zakon/590/2002
- [7] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Vyd. 1. Liberec: Knihy 555, 2005, 251 s. ISBN 80-86660-11-7.
- [8] ŠULC, Jan a ŽOUŽELA Michal. *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice*. Výzkumná zpráva, LVV-FAST-VUT v Brně, 2013.
- [9] ŠULC, Jan a ŽOUŽELA Michal. *Modelový výzkum nového objektu pro převádění extrémních povodní VD Šance (bezpečnostní přeliv, skluz, vývar)*. Výzkumná zpráva, LVV-FAST-VUT v Brně, 2007

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Závislost hloubky na energii proudu	9
Obr. 2	Vodní skok ve vývaru obdélníkového průřezu.....	10
Obr. 3	Prostý a vlnovitý vodní skok	11
Obr. 4	„Vyběhnutí“ VS z prostoru vývaru – oddálený VS.....	13
Obr. 5	Vzdutý VS v prizmatickém korytě	14
Obr. 6	Schéma vodního skoku.....	15
Obr. 7	VS v prizmatickém korytě.....	17
Obr. 8	VS v konoidálním vývaru.....	18
Obr. 9	Schéma konoidálního koryta	26
Obr. 10	Koryto lichoběžníkového a složeného průřezu.....	28
Obr. 11	Model VD Znojmo s ponořenými rozražeči ve vývaru	29
Obr. 12	Schéma hráze VD Vranov – vývar s dvojicí mohutných rozražečů	29
Obr. 13	Detailní pohled na model se zvýšeným dnem a jedním příčným prahem	30
Obr. 14	Celkový pohled na model	34
Obr. 15	Detail vyvýšeného dna.....	36
Obr. 16	Detailní pohled na model se zvýšeným dnem a dvěma příčnými prahy.....	36
Obr. 17	Detail odpadního koryta vyskládaného dlažebními kostkami	37
Obr. 18	Detail profilu s dlužovými stěnami zajišťující vzduť dolní vody	38
Obr. 19	Varianta M-1	38

Bakalářská práce

Obr. 20	Varianta M-2.....	39
Obr. 21	Varianta M-3.....	39
Obr. 22	Varianta M-4.....	40
Obr. 23	Varianta M-5.....	40
Obr. 24	Varianta M-6.....	41
Obr. 25	Varianta M-7.....	41
Obr. 26	Varianta M-8.....	42
Obr. 27	Varianta M-9.....	42
Obr. 28	Varianta M-10.....	43
Obr. 29	Varianta M-11.....	43
Obr. 30	Varianta M-12.....	44
Obr. 31	Varianta M-13.....	44
Obr. 32	Varianta M-14.....	45
Obr. 33	Řez konoidálním vývarem u variant M-1; M-13 až M-14.....	45
Obr. 34	Řez konoidálním vývarem u variant M-2 až M-4; M-12.....	45
Obr. 35	Řez prizmatickým vývarem u variant M-8 až M-10.....	46
Obr. 36	Řez prizmatickým vývarem u variant M-5 až M-7; M-11.....	46
Obr. 37	Měření hloubky h_1 ocelovou měrkou.....	47
Obr. 38	Detail „odsekuté“ horní části prahu vývaru (M-9 až M-14).....	51
Obr. 39	Příčný řez odpadním korytem u variant M-1 až M-8.....	52
Obr. 40	Příčný řez odpadním korytem u variant M-9 až M-14.....	52

Obr. 41	Schéma hloubek na modelu	53
Obr. 42	Porovnání závislostí hloubky h_2 na průtoku Q u variant s různými úrovněmi dna odpadního koryta a vývaru	55
Obr. 43	Závislost hloubky na energii průřezu – vliv Froudova kritéria na ztrátu energie ve vodním skoku v prizmatickém korytě obdélníkového průřezu	57
Obr. 44	Porovnání závislostí hloubky h_2 na průtoku Q u variant se zvýšeným dnem vývaru a příčnými dnovými prvky (M-3; M-4; M-7).....	62
Obr. 45	Závislost hloubky na energii průřezu – nesnížené odpadní koryto (+275 mm) – přehled	63
Obr. 46	Závislost hloubky na energii průřezu – nesnížené odpadní koryto (+275 mm) – detail	64
Obr. 47	Závislost hloubky na energii průřezu – snížené odpadní koryto (+175 mm) – přehled	65
Obr. 48	Závislost hloubky na energii průřezu – snížené odpadní koryto (+175 mm) – detail	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Rychlostní součinitel podle Smetany	20
Tab. 2	Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni	32
Tab. 3	Seřazení variant podle míry disipace energie pro nesnížené odpadní koryto – první část	59
Tab. 4	Seřazení variant podle míry disipace energie pro nesnížené odpadní koryto – druhá část.....	60
Tab. 5	Seřazení variant podle míry disipace energie pro snížené odpadní koryto	61
Tab. 6	Ztráty energetické výšky průřezu $\Delta E/E_1$ v závislosti na vstupních parametrech proudu a tvaru koryta vývaru	67

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AdMaS Advanced Materials Structures and Technologies

b šířka koryta ve dně, šířka vývaru, přelivného pole [m]

B šířka v hladině [m]

d hloubka vývaru [m]

DN jmenovitá světlost [mm]

E energie průřezu [m]

*E*₀ celková energie v profilu před vzdouvacím objektem [m]

FAST Fakulta stavební

Fr Froudovo kritérium [-]

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

H hloubka konoidálního vývaru [m]

h hloubka proudu [m]

*h*₀ výška přepadového paprsku včetně rychlostní výšky [m]

*h*₁ první vzájemná hloubka vodního skoku [m]

*h*₂ druhá vzájemná hloubka vodního skoku [m]

*h*_c kontrahovaná hloubka přepadového paprsku [m]

*h*_d hloubka dolní vody [m]

*h*_k kritická hloubka [m]

*h*_s výška vodního skoku [m]

*i*_k kritický sklon [-]

Index 1 veličina v profilu začátku vodního skoku

Index 2 veličina v profilu konce vodního skoku

Index d veličina na díle

Index m.....veličina na modelu

- K konstanta podle Nováka
- l délkový rozměr [m]
- l_s délka vodního skoku [m]
- l_v délka vývaru [m]
- M index bystřinnosti [-]; měřítko modelové podobnosti
- $M-n$ n-tá konfigurace modelu
- N N-letost [rok]
- P periodicita [rok⁻¹]
- PID.....proporcionální-integrační-derivační (regulátor)
- Q průtok [m³·s⁻¹]; [l·s⁻¹]
- q specifický návrhový průtok [m²·s⁻¹]
- Q_{\max} maximální průtok [m³·s⁻¹]
- Q_{\min} minimální průtok [m³·s⁻¹]
- Q_n návrhový průtok [m³·s⁻¹]
- q_n specifický návrhový průtok [m²·s⁻¹]
- Re Reynoldsovo kritérium [-]
- S průřezová plocha [m²]
- s_d svislá odlehlost přepadové hrany a původního dna podjezí [m]
- u povrchová rychlost proudu [m·s⁻¹]
- v průřezová rychlost [m·s⁻¹]
- VDvodní dílo
- VSvodní skok
- VUTVysoké učení technické v Brně

α Coriolisovo kritérium [-]

β Boussinesqovo kritérium [-]

γ úhel odklonu dolní hrany stěny koryta od podélné osy konoidálního vývaru [°]

Δ přírusek

δ úhel odklonu horní hrany stěny koryta od podélné osy konoidálního vývaru [°]

δ_1 úhel odklonu čáry hladiny od podélné osy v konoidálním vývaru [°]

ν součinitel kinematické viskozity [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

σ míra vzdutí [-]

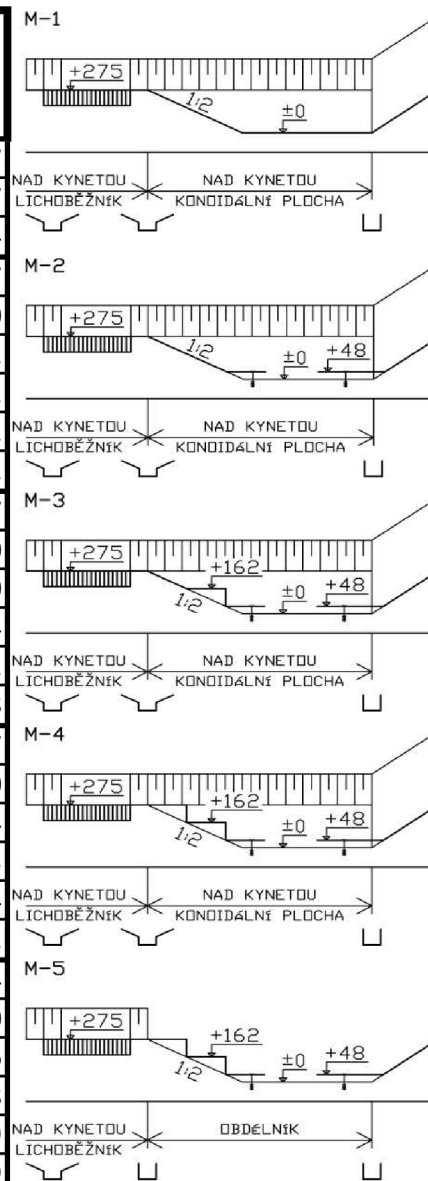
φ Smetanův rychlostní součinitel [-]

SEZNAM PŘÍLOH

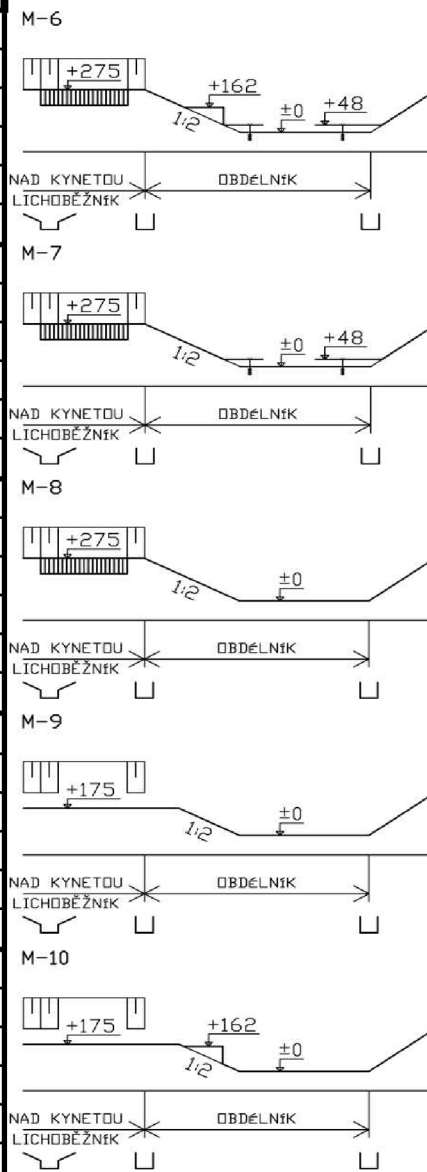
1. Průřezové charakteristiky jednotlivých zkoušených variant modelu

Příloha 1 Průřezové charakteristiky jednotlivých zkušních variant modelu

Varianta	[l·s ⁻¹] Q	[mm] h ₁	[m ²] S ₁	[m·s ⁻¹] v ₁	[-] Fr ₁	[mm] d	[mm] h _d	[mm] h ₂	[mm] h _{max}	[mm] h _{2,teor}	[m ²] S ₂	[m·s ⁻¹] v ₂	[-] Fr ₂	[m] E ₁	[m] E ₂	[m] ΔE	[-] ΔE/E ₁
M-1	50	35	0.0105	4.76	66	275	100	375	-	403	0.0430	1.16	1.378	1.191	0.444	0.747	0.627
	65	45	0.0135	4.81	53	275	175	450	-	462	0.1048	0.62	0.224	1.227	0.470	0.757	0.617
	80	50	0.0150	5.33	58	275	195	470	-	539	0.1310	0.61	0.195	1.500	0.489	1.011	0.674
M-2	15	10	0.0030	5.00	255	227	55	282	-	226	0.0194	0.77	1.103	1.284	0.312	0.972	0.757
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	160	387	-	391	0.0851	0.53	0.178	1.304	0.401	0.903	0.692
	60	40	0.0120	5.00	64	227	225	452	-	452	0.1703	0.35	0.056	1.314	0.458	0.856	0.651
	70	45	0.0135	5.19	61	227	260	487	-	497	0.2161	0.32	0.041	1.415	0.492	0.923	0.652
80	50	0.0150	5.33	58	227	275	502	-	539	0.2358	0.34	0.043	1.500	0.508	0.992	0.661	
M-3	15	10	0.0030	5.00	255	227	55	282	-	226	0.0194	0.77	1.103	1.284	0.312	0.972	0.757
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	90	317	-	391	0.0372	1.21	1.660	1.304	0.392	0.913	0.700
	60	40	0.0120	5.00	64	227	190	417	-	452	0.1244	0.48	0.125	1.314	0.429	0.885	0.674
	70	45	0.0135	5.19	61	227	215	442	-	497	0.1572	0.45	0.094	1.415	0.452	0.963	0.681
80	50	0.0150	5.33	58	227	230	457	-	539	0.1768	0.45	0.091	1.500	0.467	1.032	0.688	
M-4	15	10	0.0030	5.00	255	227	55	282	-	226	0.0194	0.77	1.103	1.284	0.312	0.972	0.757
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	85	312	-	391	0.0344	1.31	2.054	1.304	0.399	0.905	0.694
	60	40	0.0120	5.00	64	227	170	397	-	452	0.0982	0.61	0.224	1.314	0.416	0.898	0.683
	70	45	0.0135	5.19	61	227	190	417	-	497	0.1244	0.56	0.170	1.415	0.433	0.982	0.694
80	50	0.0150	5.33	58	227	205	432	-	539	0.1441	0.56	0.153	1.500	0.448	1.052	0.701	
M-5	15	10	0.0030	5.00	255	227	50	277	-	226	0.0173	0.87	1.542	1.284	0.316	0.969	0.754
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	80	307	-	391	0.0317	1.42	2.571	1.304	0.410	0.894	0.686
	60	40	0.0120	5.00	64	227	90	317	-	452	0.0372	1.61	2.951	1.314	0.450	0.864	0.658
	70	45	0.0135	5.19	61	227	110	337	-	497	0.0492	1.42	1.878	1.415	0.440	0.975	0.689
80	50	0.0150	5.33	58	227	210	437	-	539	0.1506	0.53	0.137	1.500	0.451	1.048	0.699	



Varianta	[l·s ⁻¹] Q	[mm] h ₁	[m ²] S ₁	[m·s ⁻¹] v ₁	[-] Fr ₁	[mm] d	[mm] h _d	[mm] h ₂	[mm] h _{max}	[mm] h _{2,teor}	[m ²] S ₂	[m·s ⁻¹] v ₂	[-] Fr ₂	[m] E ₁	[m] E ₂	[m] ΔE	[-] ΔE/E ₁
M-6	15	10	0.0030	5.00	255	227	50	277	-	226	0.0173	0.87	1.542	1.284	0.316	0.969	0.754
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	80	307	-	391	0.0317	1.42	2.571	1.304	0.410	0.894	0.686
	60	40	0.0120	5.00	64	227	100	327	-	452	0.0430	1.40	1.985	1.314	0.426	0.888	0.676
	70	45	0.0135	5.19	61	227	190	417	-	497	0.1244	0.56	0.170	1.415	0.433	0.982	0.694
	80	50	0.0150	5.33	58	227	225	452	-	539	0.1703	0.47	0.100	1.500	0.463	1.037	0.691
M-7	15	10	0.0030	5.00	255	227	50	277	-	226	0.0173	0.87	1.542	1.284	0.316	0.969	0.754
	30	20	0.0060	5.00	127	227	70	297	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.362	0.932	0.720
	45	30	0.0090	5.00	85	227	90	317	-	391	0.0372	1.21	1.660	1.304	0.392	0.913	0.700
	60	40	0.0120	5.00	64	227	235	462	-	452	0.1834	0.33	0.046	1.314	0.467	0.847	0.644
	70	45	0.0135	5.19	61	227	260	487	-	497	0.2161	0.32	0.041	1.415	0.492	0.923	0.652
	80	50	0.0150	5.33	58	227	300	527	-	539	0.2685	0.30	0.030	1.500	0.532	0.968	0.646
M-8	15	10	0.0030	5.00	255	275	50	325	-	226	0.0173	0.87	1.542	1.284	0.364	0.921	0.717
	30	20	0.0060	5.00	127	275	70	345	-	319	0.0265	1.13	1.862	1.294	0.410	0.884	0.683
	45	30	0.0090	5.00	85	275	85	360	-	391	0.0344	1.31	2.054	1.304	0.447	0.857	0.657
	60	40	0.0120	5.00	64	275	95	370	-	452	0.0400	1.50	2.409	1.314	0.484	0.830	0.631
	70	45	0.0135	5.19	61	275	105	380	-	497	0.0460	1.52	2.244	1.415	0.498	0.918	0.648
	80	50	0.0150	5.33	58	275	255	530	-	539	0.2096	0.38	0.058	1.500	0.537	0.971	0.647
M-9	15	10	0.0030	5.00	255	175	60	235	270	226	0.0156	0.96	1.571	1.284	0.282	1.002	0.780
	30	20	0.0060	5.00	127	175	105	280	320	319	0.0273	1.10	1.169	1.294	0.341	0.953	0.736
	45	30	0.0090	5.00	85	175	210	385	365	391	0.0752	0.60	0.174	1.304	0.403	0.901	0.691
	60	40	0.0120	5.00	64	175	285	460	450	452	0.1439	0.42	0.062	1.314	0.469	0.845	0.643
	70	45	0.0135	5.19	61	175	330	505	480	497	0.2028	0.35	0.037	1.415	0.511	0.904	0.639
	80	50	0.0150	5.33	58	175	355	530	490	539	0.2356	0.34	0.033	1.500	0.536	0.964	0.643
M-10	15	10	0.0030	5.00	255	175	80	255	270	226	0.0208	0.72	0.663	1.284	0.282	1.003	0.781
	30	20	0.0060	5.00	127	175	105	280	340	319	0.0273	1.10	1.169	1.294	0.341	0.953	0.736
	45	30	0.0090	5.00	85	175	140	315	390	391	0.0391	1.15	0.963	1.304	0.382	0.922	0.707
	60	40	0.0120	5.00	64	175	165	340	430	452	0.0501	1.20	0.887	1.314	0.413	0.901	0.686
	70	45	0.0135	5.19	61	175	180	355	470	497	0.0577	1.21	0.834	1.415	0.430	0.985	0.696
	80	50	0.0150	5.33	58	175	255	430	500	539	0.1071	0.75	0.223	1.500	0.458	1.041	0.694



Varianta	[l·s ⁻¹] Q	[mm] h ₁	[m ²] S ₁	[m·s ⁻¹] v ₁	[-] Fr ₁	[mm] d	[mm] h _d	[mm] h ₂	[mm] h _{max}	[mm] h _{2,teor}	[m ²] S ₂	[m·s ⁻¹] v ₂	[-] Fr ₂	[m] E ₁	[m] E ₂	[m] ΔE	[-] ΔE/E ₁
M-11	15	10	0.0030	5.00	255	127	60	187	268	226	0.0156	0.96	1.571	1.284	0.234	1.050	0.818
	30	20	0.0060	5.00	127	127	140	267	318	319	0.0391	0.77	0.428	1.294	0.297	0.997	0.771
	45	30	0.0090	5.00	85	127	205	332	418	391	0.0720	0.62	0.194	1.304	0.352	0.952	0.730
	60	40	0.0120	5.00	64	127	300	427	478	452	0.1635	0.37	0.046	1.314	0.434	0.880	0.670
	70	45	0.0135	5.19	61	127	320	447	518	497	0.1897	0.37	0.043	1.415	0.454	0.961	0.679
	80	50	0.0150	5.33	58	127	380	507	578	539	0.2683	0.30	0.024	1.500	0.512	0.988	0.659
M-12	15	10	0.0030	5.00	255	127	60	187	268	226	0.0156	0.96	1.571	1.284	0.234	1.050	0.818
	30	20	0.0060	5.00	127	127	140	267	318	319	0.0391	0.77	0.428	1.294	0.297	0.997	0.771
	45	30	0.0090	5.00	85	127	190	317	418	391	0.0632	0.71	0.272	1.304	0.343	0.961	0.737
	60	40	0.0120	5.00	64	127	280	407	478	452	0.1373	0.44	0.070	1.314	0.417	0.897	0.683
	70	45	0.0135	5.19	61	127	320	447	498	497	0.1897	0.37	0.043	1.415	0.454	0.961	0.679
	80	50	0.0150	5.33	58	127	345	472	508	539	0.2225	0.36	0.038	1.500	0.479	1.021	0.681
M-13	15	10	0.0030	5.00	255	175	60	235	265	226	0.0156	0.96	1.571	1.284	0.282	1.002	0.780
	30	20	0.0060	5.00	127	175	100	275	340	319	0.0260	1.15	1.357	1.294	0.343	0.951	0.735
	45	30	0.0090	5.00	85	175	155	330	400	391	0.0454	0.99	0.645	1.304	0.380	0.924	0.709
	60	40	0.0120	5.00	64	175	175	350	435	452	0.0551	1.09	0.692	1.314	0.411	0.904	0.688
	70	45	0.0135	5.19	61	175	235	410	440	497	0.0921	0.76	0.251	1.415	0.439	0.976	0.690
	80	50	0.0150	5.33	58	175	275	450	480	539	0.1308	0.61	0.139	1.500	0.469	1.031	0.687
M-14	15	10	0.0030	5.00	255	175	60	235	270	226	0.0156	0.96	1.571	1.284	0.282	1.002	0.780
	30	20	0.0060	5.00	127	175	105	280	340	319	0.0273	1.10	1.169	1.294	0.341	0.953	0.736
	45	30	0.0090	5.00	85	175	200	375	390	391	0.0690	0.65	0.217	1.304	0.397	0.908	0.696
	60	40	0.0120	5.00	64	175	280	455	430	452	0.1373	0.44	0.070	1.314	0.465	0.849	0.646
	70	45	0.0135	5.19	61	175	310	485	470	497	0.1766	0.40	0.052	1.415	0.493	0.922	0.652
	80	50	0.0150	5.33	58	175	345	520	495	539	0.2225	0.36	0.038	1.500	0.527	0.973	0.649

