



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# ZANÁŠENÍ VÝVARŮ DNOVÝMI SPLAVENINAMI

SILTING OF STILLING BASINS BY BEDLOAD SEDIMENTS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Galeta

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO 2018



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Martin Galeta
<b>Název</b>	Zanášení vývarů dnovými splaveninami
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

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

## **PODKLADY A LITERATURA**

Zachoval, Z., 2016. Splaveniny ve vodních tocích. Brno: Vysoké učení technické v Brně.

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

Peterka, A. J., 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Denver: USDI.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Cílem práce je stanovení postupu pro posouzení zanášení půdorysně přímých vývarů obdélníkového příčného průřezu dnovými splaveninami.

Posouzení bude založeno na porovnání bezrozměrného smykového napětí s jeho kritickou hodnotou na počátku pohybu splavenin. Kritická hodnota bude stanovena na základě experimentálního výzkumu.

Požadovanými výstupy práce jsou: pojednání o vodním skoku a vývarech, počátek pohybu splavenin, experimentální výzkum, doporučený postup pro posouzení zanášení.

## **STRUKTURA 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).

---

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá stanovením postupu pro posouzení zanášení (dnovými splaveninami) a vymílání (usazenin) půdorysně přímých zahloubených i nezahloubených vývarů obdélníkového příčného průřezu při vzniku vzdutého vodního skoku ve vývaru s mírou vzdutí 1,05. Skládá se z teoretické části, kde je uvedena základní teorie týkající se vodního skoku, návrhu vývaru, počátku pohybu splavenin, posouzení zanášení a vymílání vývaru a experimentální části, která umožnila stanovení kritických hodnot nutných pro posouzení. Pro posouzení bylo vybráno bezrozměrné smykové napětí a densimetrické Froudovo číslo.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bezrozměrné smykové napětí, densimetrické Froudovo číslo, Dnové splaveniny, vymílání vývarů, vývar, vzdutý vodní skok, zanášení vývarů.

## **ABSTRACT**

The main goal of this study is to define the technique to be used to assess the aggradation (by bed load) and degradation (of sediments) of the recessed as well as non-recessed stilling basins of rectangular cross section; when the hydraulic jump occurs in the stilling basin where the submergence coefficient equals 1,05. It consists of two parts, theoretical and experimental. The theoretical part summarizes the related theory on a hydraulic jump, design of a stilling basin, an incipient motion of sediment, an assessment of silting and scouring of the stilling basin. The second part, the actual experiment, led to the determination of the critical values essential for the assessment. For the evaluation, the nondimensional shear stress and the densimetric Froude number were used.

## **KEYWORDS**

Nondimensional shear stress, densimetric Froude number, bed load, scouring of stilling basins, stilling basin, hydraulic jump, silting of stilling basin.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Martin Galeta *Zanášení vývarů dnovými splaveninami*. Brno, 2018. 54 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 12. 1. 2018

---

Bc. Martin Galeta  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné připomínky, kterými přispěl k jejímu vypracování a především za čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat za možnost provádět experimentální výzkum v Laboratoři vodohospodářského výzkumu. Především bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP**

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2018

---

Bc. Martin Galeta  
autor práce



## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíl práce a metoda řešení.....	2
3	Teorie.....	3
3.1	Vodní skok.....	3
3.1.1	Definice vodního skoku .....	3
3.1.2	Členění vodního skoku.....	4
3.1.3	Vzájemné hloubky vodního skoku .....	6
3.1.4	Délka vodního skoku .....	7
3.1.5	Ztráta energie ve vodním skoku – ztrátová výška .....	8
3.1.6	Vliv drsnosti povrchu dna na charakteristiky vodního skoku.....	8
3.2	Vývar .....	10
3.2.1	Členění vývarů.....	10
3.2.2	Rozrážeče.....	11
3.2.3	Vývarové prahy .....	11
3.2.4	Opevnění za vývarem.....	12
3.2.5	Návrh zahloubeného vývaru.....	12
3.3	Počátek pohybu splavenin.....	15
3.3.1	Namáhání koryta toku prouděním vody .....	15
3.3.2	Bezrozměrné smykové napětí.....	16
3.3.3	Úhel tření usazenin.....	18
3.3.4	Densimetrické Froudovo číslo .....	19
3.4	Posouzení zanášení a vymílání vývarů.....	19
4	Experimentální výzkum.....	21
4.1	Experimentální zařízení.....	21
4.1.1	Hydraulický okruh.....	21
4.1.2	Spádový stupeň a vývar.....	21
4.1.3	Regulace úrovně hladiny dolní vody.....	26
4.1.4	Částice.....	26
4.2	Měřidla .....	28
4.3	Limity použitelnosti modelu .....	30
4.4	Měření.....	31
4.4.1	Vývar bez vývarového prahu .....	32

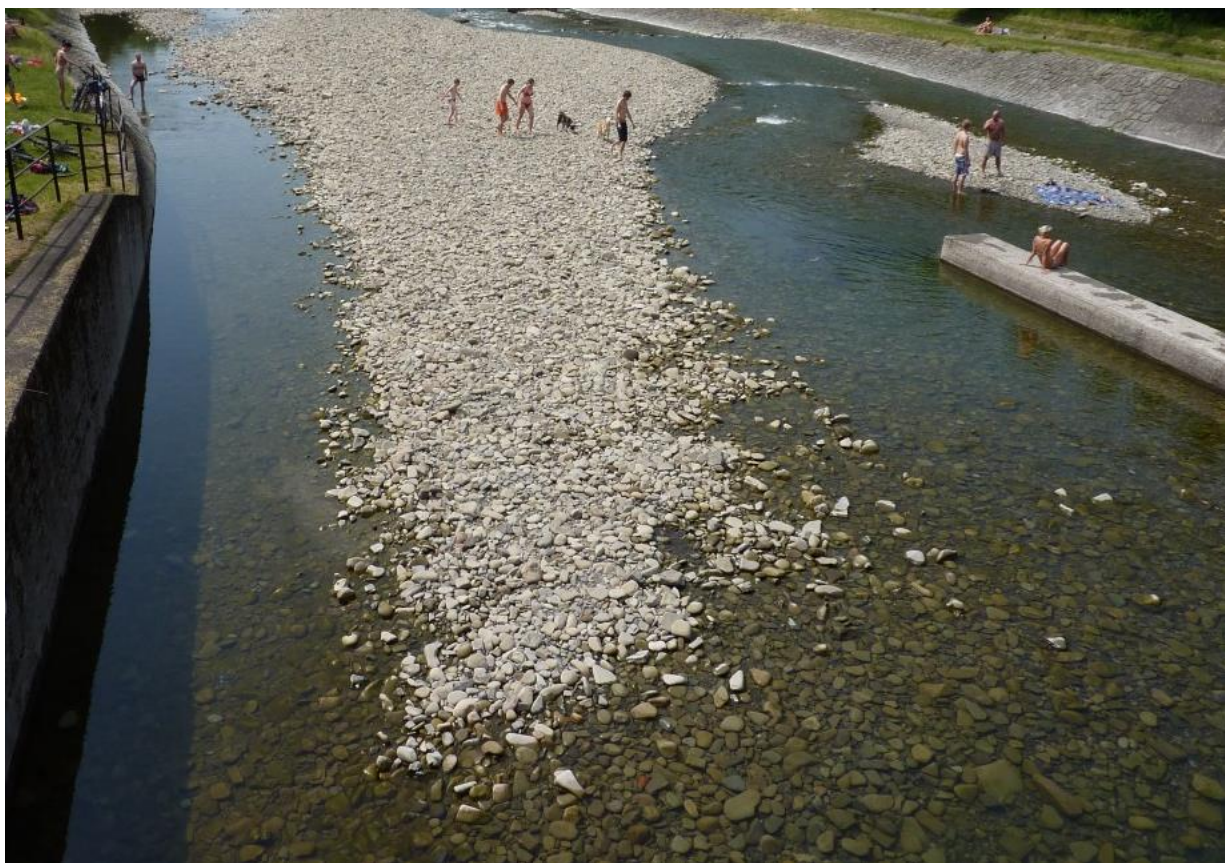
---

4.4.2	Vývar s vývarovým prahem.....	33
4.5	Zpracování a vyhodnocení dat.....	34
4.5.1	Délka vodního skoku .....	37
4.5.2	Délka nezanesení vývaru dnovými splaveninami.....	41
4.5.3	Délka vymletí usazenin ve vývaru .....	41
5	Výsledky a doporučení pro posouzení .....	43
5.1	Vyčištění vývaru od usazenin.....	43
5.2	Zanešení vývaru dnovými splaveninami.....	44
5.3	Doporučený postupu pro posouzení zanášení vývarů .....	46
6	Závěr a zhodnocení .....	47
7	Seznamy.....	48
7.1	Seznam zdrojů.....	48
7.2	Seznam zkratk.....	48
7.3	Seznam veličin .....	49
7.3.1	Latinská označení .....	49
7.3.2	Řecká označení .....	51
7.4	Seznam obrázků.....	52
7.5	Seznam tabulek.....	54

## 1 Úvod

Stavba objektu ve vodním toku narušuje přirozený pohyb splavenin [12], z toho důvodu je nutné znát, jak velký průtok splavenin na daném toku probíhá a jak přizpůsobit stavbu těmto podmínkám. Způsob pohybu splavenin hydrotechnickými konstrukcemi zásadním způsobem ovlivňuje jejich funkčnost a bezpečnost. Jako příklad je možné uvést zanášení nádrží, což vede k omezení funkčnosti a regulaci průtoku (zmenšení zásobního prostoru atd.). U mostních konstrukcí hrozí při špatné volbě konstrukce podezření pilíře, což může způsobit porušení stability. Pro pohyblivé hradičkové konstrukce je nebezpečné jejich zanesení, má za následek jejich nefunkčnost a případně jejich přelití.

Při nesprávném návrhu vývaru, případně při nesprávné manipulaci na toku, hrozí jeho zanesení dnovými splaveninami. Vývar se pak může chovat jako zásobník splavenin. V případě pohybu dnových splavenin je provozně vhodný stav takový, když se při relativně malém průtoku do jisté míry zanesou a při relativně velkém průtoku opět vyčistí. Zanesení vývaru nesmí způsobit vznik oddáleného vodního skoku až za vývarem a tím způsobit devastaci koryta. V případě, že k zanesení vývaru dojde bez jeho vyčištění při velkých průtocích, je nutné usazeniny z vývaru odtěžovat.



Obr. 1.1 Zanesený vývar, jez Vyšní Lhoty (Tureček)

## 2 Cíl práce a metoda řešení

Cílem práce bylo stanovení postupu pro posouzení zanášení půdorysně přímých vývarů obdélníkového příčného průřezu dnovými splaveninami.

Vzhledem k rozsahu problematiky bylo stanovení postupu omezeno na posouzení zanášení (dnovými splaveninami) a vymílání (usazenin) půdorysně přímých zahloubených i nezahloubených vývarů obdélníkového příčného průřezu při vzniku vzdutého vodního skoku ve vývaru s mírou vzdutí 1,05. Posouzení zanášení a vymílání vývarů bylo založeno na porovnání bezrozměrného smykového napětí s jeho kritickou hodnotou a rovněž na porovnání densimetrického Froudova čísla s jeho kritickou hodnotou. Důvodem použití dvou veličin bylo, že každá z nich je vhodná v jiných podmínkách. Kritické hodnoty pro vymílání a zanášení byly stanoveny experimentálním výzkumem a byly porovnány s hodnotami doporučenými pro rovnoměrné proudění.

Práce z důvodu vymezení předmětu výzkumu a uvedení postupu posouzení obsahuje teorii popisující problémy spojené se zanášením vývarů dnovými splaveninami, teorii vodního skoku s vlivem povrchové drsnosti dna na jeho charakteristiky, způsob tlumení kinetické energie aplikací vývaru, dělení vývarů a rozrážečů a návrh vývaru.

Pro stanovení kritických hodnot posuzovaných veličin práce obsahuje experimentální výzkum s popisem experimentálního zařízení, měřidel, měření, analýzu aplikovatelnosti změřených dat pro větší délkové rozměry vývaru a vlastní měření s nezahloubeným a zahloubeným vývarem. Z důvodu široké aplikovatelnosti je použito sedm frakcí částic. Měřeno je zanášení i vymílání. Hlavními vyhodnocovanými veličinami jsou bezrozměrné smykové napětí a densimetrické Froudovo číslo. Dalšími vyhodnocovanými veličinami jsou délka vodního skoku, která je porovnána s jinými autory a délka nezanesení vývaru (s ojedinělým přítokem splavenin) a délka vymletí (bez přítoku splavenin).

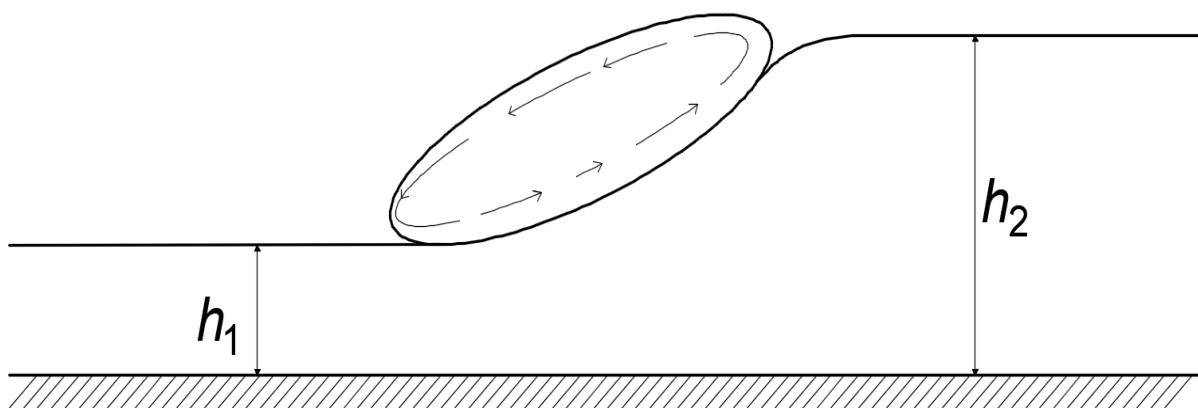
Výsledky experimentálního výzkumu spolu s teorií umožnily stanovit doporučení pro posouzení zanesení vývaru dnovými splaveninami a vymletí usazenin z vývaru za výše specifikovaných podmínek.

## 3 Teorie

### 3.1 Vodní skok

#### 3.1.1 Definice vodního skoku

Vodní skok je hydraulický jev, který vzniká při přechodu z pohybu bystřinného do říčního [5], ke kterému dochází např. při přepadu přes jezovou konstrukci, při výtoku pod stavidlem, při změně sklonu dna v podélném profilu toku. Vodní skok se projevuje náhlým zvětšením hloubky vody a poklesem rychlosti proudění (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Prostý vodní skok

Vodním skokem se mění část kinetická energie na energii polohovou za velké ztráty celkové mechanické energie [2]. Díky vířivému pohybu se většina ztrátové energie transformuje v teplo. Hlavní předností použití vodního skoku jako disipátoru kinetické energie je, že k utlumení kinetické energie dochází na relativně krátkém úseku.

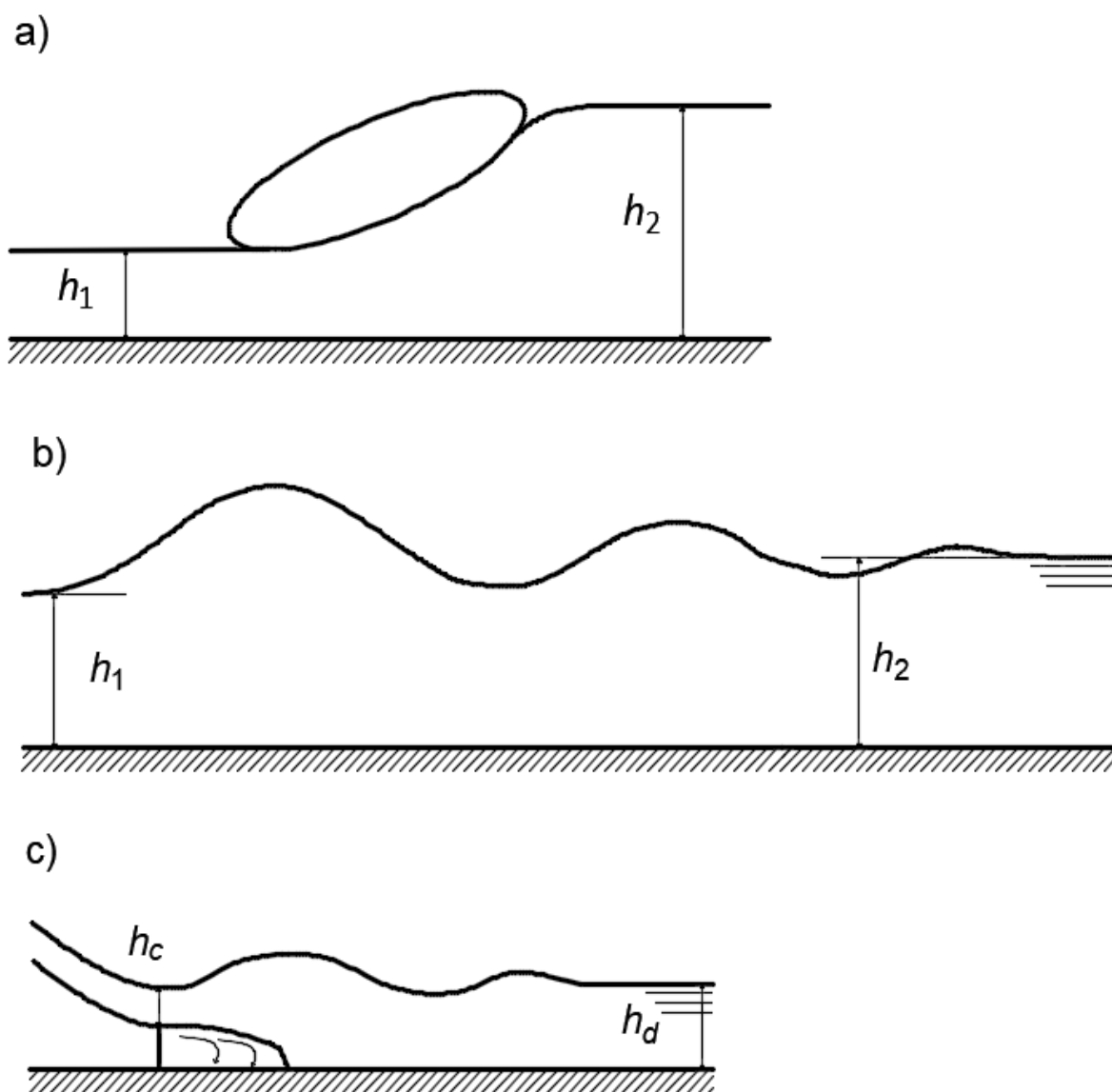
Základní teorii vodního skoku popsal v roce 1820 Giorgio Bidone [3]. Popsal ho jako jev, při kterém se kinetická energie rozptýlí, když rychle tekoucí proud dosáhne pomalejšího proudu. Na našem území se vodnímu skoku věnoval Smetana a Novák [6].

### 3.1.2 Členění vodního skoku

Členění vodního skoku lze provést podle různých kritérií. Níže jsou uvedena některá z nich [6].

Podle podmínek vzniku vodního skoku se rozeznává:

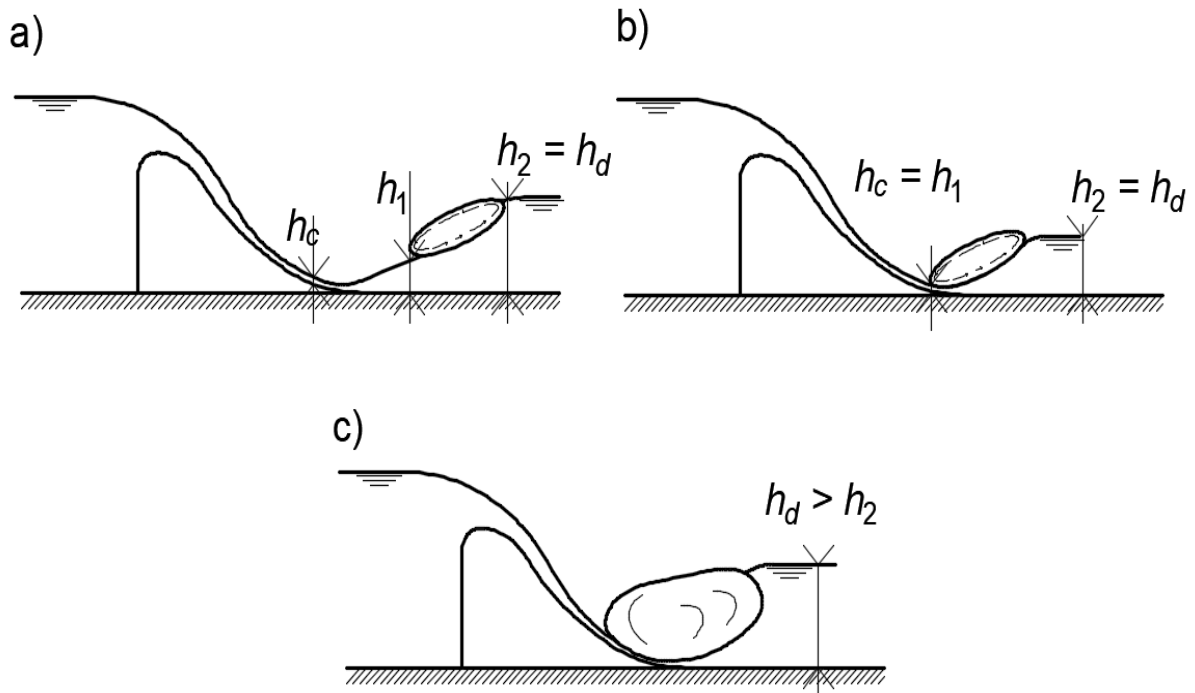
- a) **Vlnovitý vodní skok** (Obr. 3.2 b) – vzniká při  $Fr_1 < 1,7$ . Projevuje se řadou tlumených vln bez vzniku povrchového, či dnového válce.
- b) **Prostý vodní skok** (Obr. 3.2 a) – projevuje se kompaktním rozbíhajícím se proudem při dně a silně provzdušněným vodním válcem na povrchu.
- c) **Povrchový vodní skok** (Obr. 3.2 c) – má kompaktní rozbíhavý proud při povrchu a vodní válec při dně.



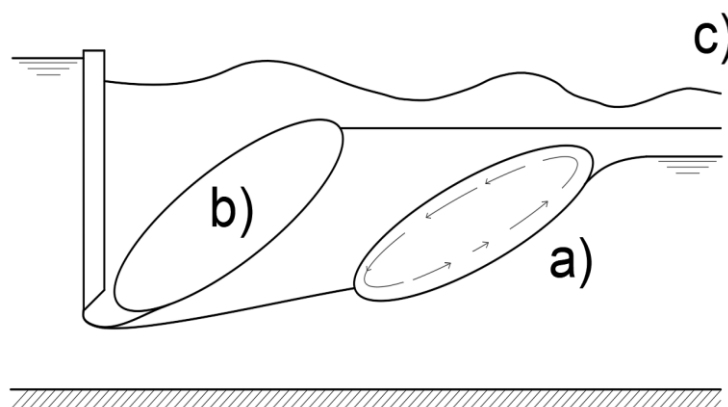
Obr. 3.2 Členění vodního skoku podle podmínek vzniku: a) prostý, b) vlnovitý, c) povrchový

Podle polohy vodního skoku vzhledem k vodní stavbě se rozeznává vodní skok:

- a) oddálený (Obr. 3.3 a),
- b) přilehlý (Obr. 3.3 b),
- c) vzdutý (Obr. 3.3 c).



Obr. 3.3 Polohy vodního skoku: a) oddálený, b) přilehlý, c) vzdutý.

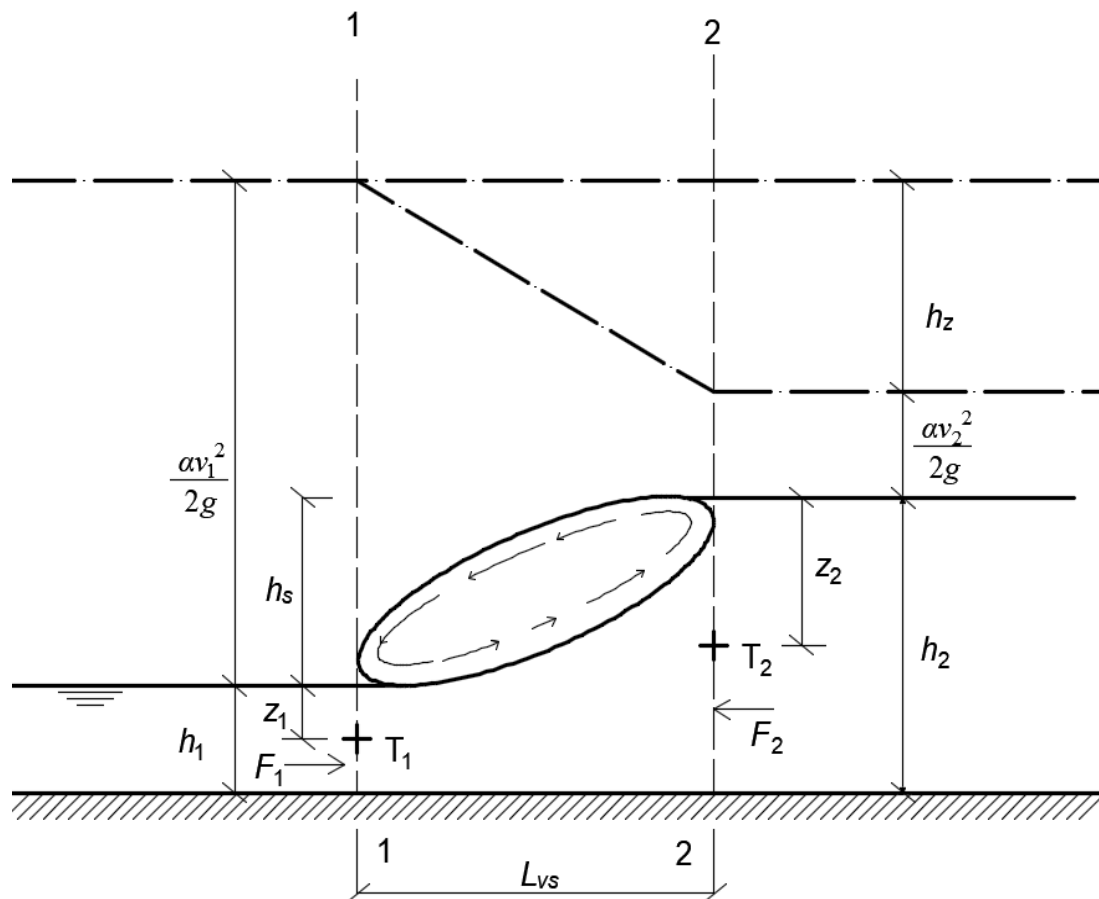


Obr. 3.4 Druhy vodního skoku vzhledem poloze stavidla: a) oddálený, b) přilehlý, c) vzdutý

Na polohu vodního skoku vzhledem k vodní stavbě má hlavní vliv úroveň hladiny dolní vody  $h_d$  v toku, kterou je možné ovlivňovat technickými úpravami.

### 3.1.3 Vzájemné hloubky vodního skoku

Hloubky v průřezu těsně před vodním skokem  $h_1$  a v průřezu těsně za vodním skokem  $h_2$  se nazývají vzájemnými hloubkami vodního skoku [2]. Rozdíl těchto vzájemných hloubek ( $h_2 - h_1$ ) se nazývá výška vodního skoku  $h_s$ .



Obr. 3.5 Schéma k výpočtu vodního skoku

Vztah mezi vzájemnými hloubkami se odvodí z rovnice hybnosti se zanedbáním ztrát třením. Pro obdélníkové prizmatické koryto jsou vzájemné hloubky dány rovnicemi

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \cdot \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot \beta \cdot Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_2^3}} \right], \quad (3.1)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot \beta \cdot Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3}} \right], \quad (3.2)$$

kde  $\beta$  je součinitel hybnosti (Boussinesqovo číslo),  $Q$  je průtok a  $g$  je tíhové zrychlení.



### 3.1.4 Délka vodního skoku

Dalším důležitým parametrem vodního skoku je jeho délka  $L_{vs}$ . Délka vodního skoku je vymezena profilem, kde bystřinný proud ještě není ovlivněn vodním skokem (obvykle v profilu počátku vodního válce) a profilem, kde říční proud již není ovlivněn vodním skokem (na konci vodního válce, při vyrovnání rychlostního pole). Vzhledem k pulzaci vodního válce a silné turbulenci za vodním skokem je určení konce vodního skoku obtížné a projevuje se velkou mírou subjektivity v závislosti na použitém přístupu. Touto problematikou se zabývalo v 19. a 20. století značné množství autorů. Níže jsou uvedeny rovnice platící pro obdélníkové prizmatické koryto nebo přímý vývar, které byly při výpočtech pro porovnání s vlastním měřením použity [2]:

dle Smetany

$$L_{vs,S} = 6 \cdot (h_2 - h_1), \quad (3.3)$$

dle Pavlovského

$$L_{vs,Pa} = 2,5 \cdot (1,9 \cdot h_2 - h_1), \quad (3.4)$$

dle Čertousova

$$L_{vs,C} = 10,3 \cdot h_1 \cdot (\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81}, \quad (3.5)$$

dle Pikalova

$$L_{vs,Pi} = 4 \cdot h_1 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot Fr_1}, \quad (3.6)$$

dle Boora

$$L_{vs,B} = 22,4 \cdot h_k - 32,9 \cdot \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{Fr_1}}, \quad (3.7)$$

dle Nováka

$$L_{vs,N} = K \cdot (h_2 - h_1). \quad (3.8)$$

Pro použití rovnice dle Nováka je parametr  $K$  určen z Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Hodnoty  $K$  pro výpočet délky vodního skoku podle Nováka

$h_2/h_1$	$K$
3-4	5,5
4-6	5,0
6-20	4,5
>20	4,0

Hodnota Froudova čísla se vypočítá z rovnice

$$Fr_1 = \frac{\beta \cdot q^2}{g \cdot h_1^3} \quad (3.9)$$

U vodního skoku se rozlišuje ještě délka provzdušnění, která je dána vzájemnou vzdáleností profilu s počátkem a koncem provzdušnění proudu (je měřítkově závislá) a délka vodního válce (časově střední), která se určuje z měření rychlostního pole [5].

### 3.1.5 Ztráta energie ve vodním skoku – ztrátová výška

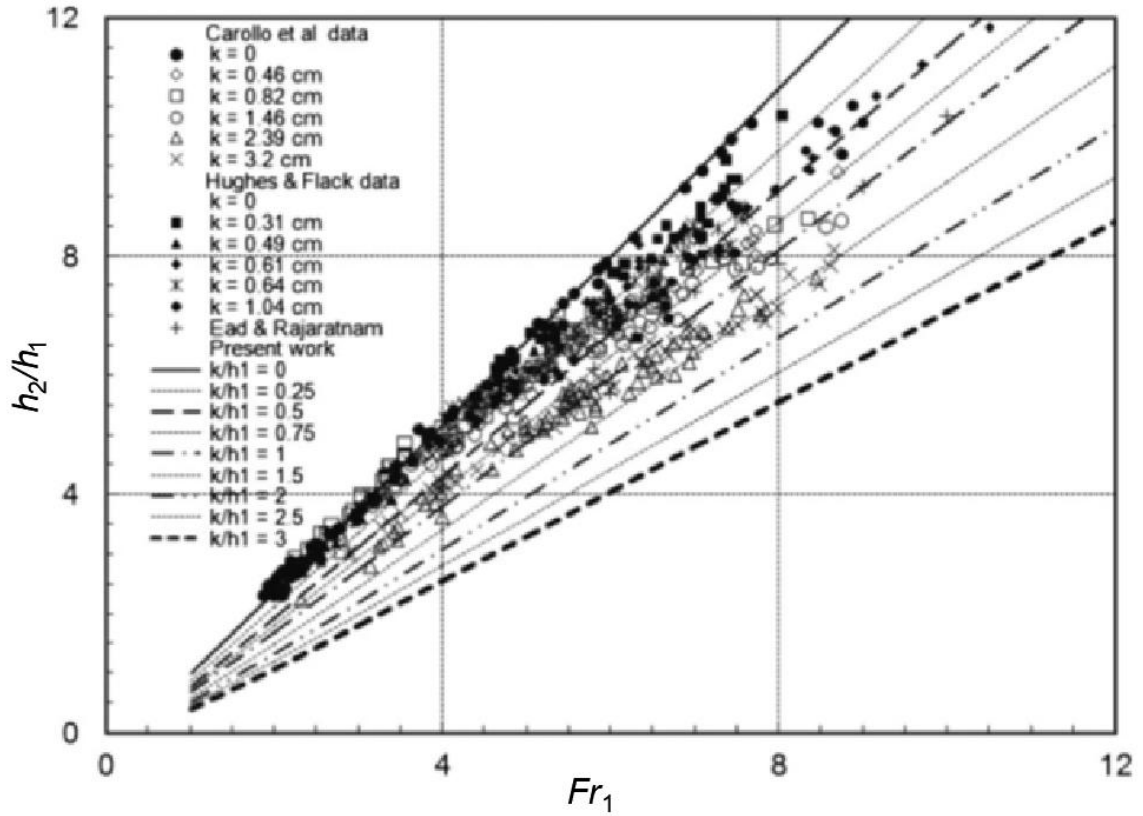
Ztráta energie ve vodním skoku se vyjadřuje ztrátovou výškou  $h_z$ . Lze ji spočítat z Bernoulliho rovnice pro profil 1 a 2

$$h_z = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_1 \cdot h_2} \quad (3.10)$$

### 3.1.6 Vliv drsnosti povrchu dna na charakteristiky vodního skoku

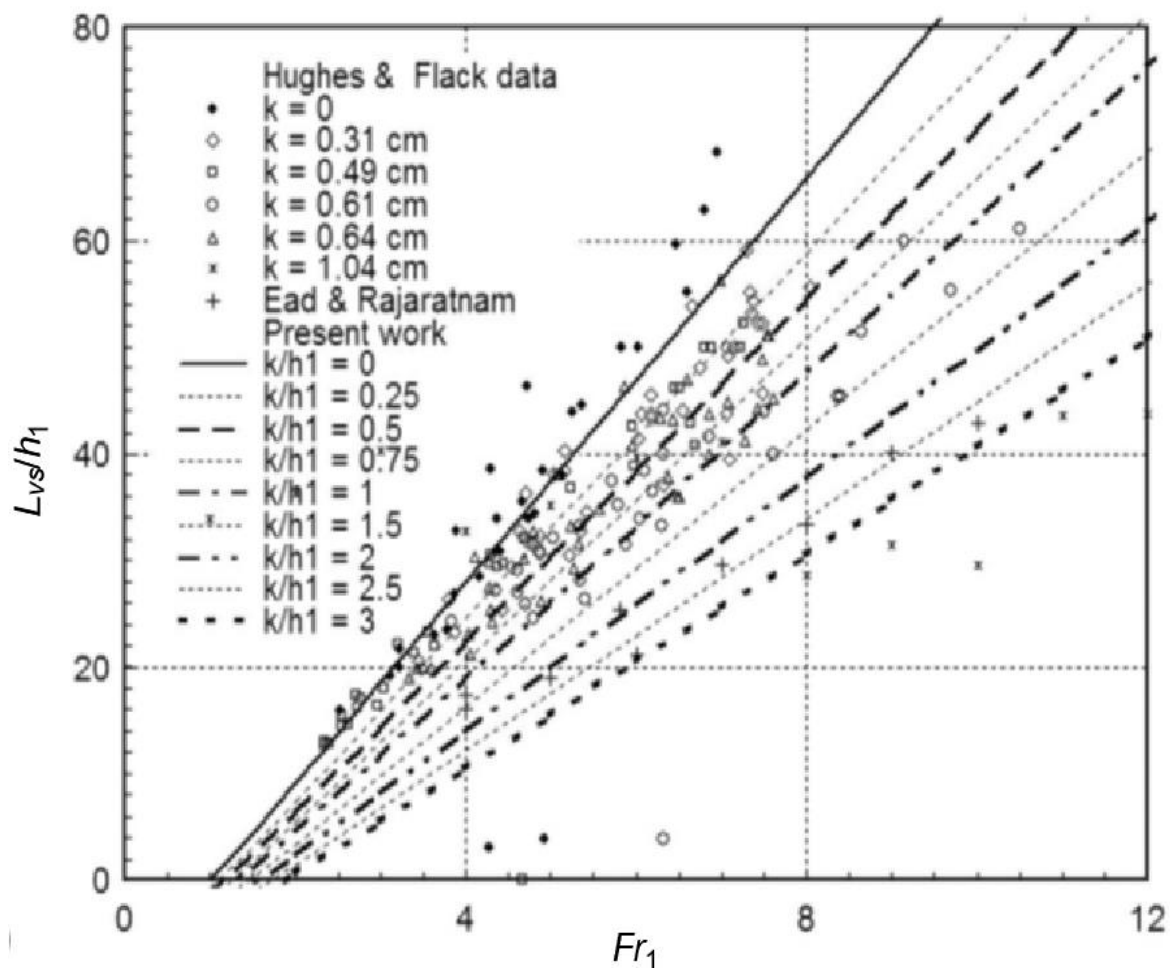
Drsnost povrchu dna má přímý vliv na charakteristiku vodního skoku. Hydraulická drsnost  $k$  vyjadřuje ekvivalentní velikost pískových zrn vytvářejících stejný odpor. Obvykle platí, že čím větší jsou nerovnosti na dně, tím větší je její hodnota. Drsnost povrchu má vliv na velikost druhé vzájemné hloubky  $i$  na délku vodního skoku.

V grafu publikovaném autory Afzal a kol. [1], který je uvedený na Obr. 3.6, je závislost poměru vzájemných hloubek  $h_2/h_1$  k Froudovu číslu  $Fr_1$ . Proložené čáry rozdělují oblast podle relativní drsnosti  $k/h_1$ , kde horní plná čára označuje hladký povrch, níže vykreslené čáry drsný povrch. Z grafu vyplývá, že čím větší je hodnota relativní drsnosti, tím menší je druhá vzájemná hloubka  $h_2$ .



Obr. 3.6 Vliv drsnosti povrchu na velikost hodnoty vzájemných délek [1]

V grafu na Obr. 3.7 je prezentována závislost relativní délky vodního skoku  $L_{vs}/h_1$  na Froudovu číslu  $Fr_1$ , kterou publikovali rovněž autoři Afzal a kol. [1]. Z grafu vyplývá, že při zvětšení hodnoty relativní drsnosti se zmenšuje délka vodního skoku.



Obr. 3.7 Vliv drsnosti povrchu na délku vodního skoku Afzal a kol. [1]

## 3.2 Vývar

Z důvodu možného narušení koryta vodním skokem, se vodní skok umísťuje do vývaru. Aby vodní skok vzniknul pouze ve vývaru, požaduje za všech proudových a hladinových stavů vzduť vodní skok.

### 3.2.1 Členění vývarů

Vývary se člení dle různých kritérií.

Členění vývarů dle zahloubení:

- a) zahloubené,
- b) nezahloubené.

Členění vývarů dle opevnění:

- a) opevněné,
- b) neopevněné.

Členění vývarů dle půdorysného tvaru:

- a) divergentní,
- b) přímé,
- c) konvergentní.

### 3.2.2 Rozrážeče

Pro utlumení kinetické energie a zkrácení délky vývaru je možné použít tělesa vložená do proudu, která se nazývají rozrážeče [8]. Jak je patrné z názvu, hlavní účel těchto těles je rozrazit kompaktní proud na přelivu a ve vývaru a tím zmenšit kinetickou energii.

Členění rozrážečů dle jejich umístění:

- a) přelivové – umístěny na přelivné ploše,
- b) vývarové – umístěny na vývarové desce,
- c) prahové – umístěny na vývarovém prahu.

### 3.2.3 Vývarové prahy

Tvar vývarového prahu ovlivňuje délku vodního skoku a tvorbu výmolů v odtokovém korytě.

Členění vývarových prahů dle tvaru jejich návodního líce:

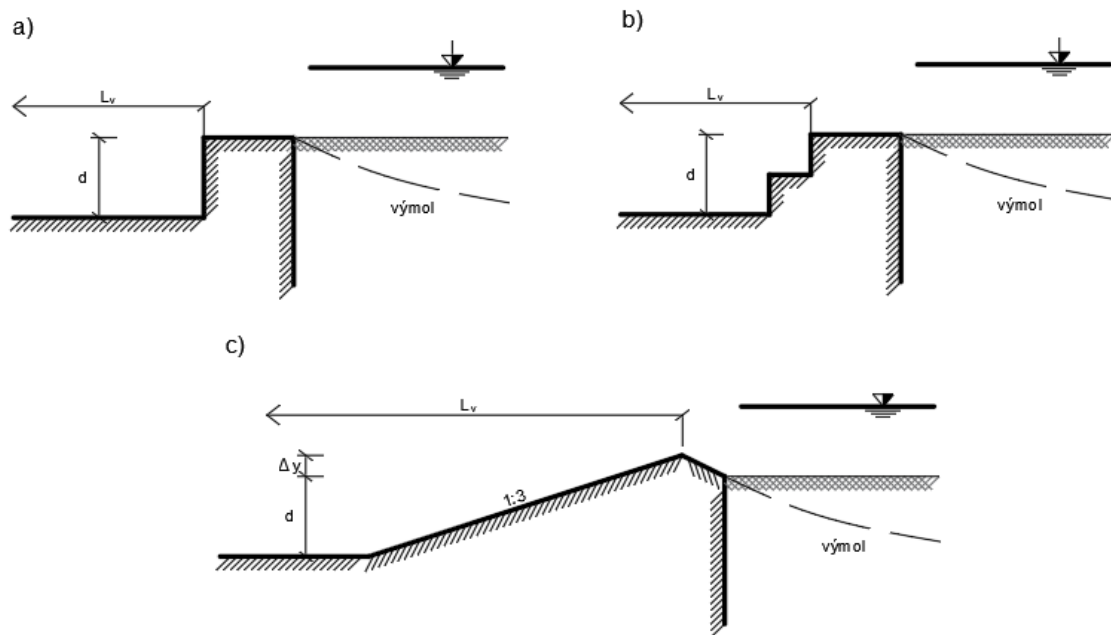
- a) svislý,
- b) šikmý,
- c) stupňovitý.

Tvar prahu má výrazný vliv na tvorbu výmolů za vývarem [7]. Vhodný tvar prahu, může velikost výmolu zmenšit, avšak ne odstranit. Z toho důvodu je snahou oddálit výmol do neškodné vzdálenosti od konstrukce.

Z důvodu nerovnoměrného rozdělení rychlostí je ještě daleko za vývarem čára energie vyšší, než odpovídá říčnímu proudění [7]. Vodní proud s velkými rychlostmi u dna s velkou turbulencí má větší unášecí schopnost a proto je materiál dna rozrušován a unášen, to vede k vytváření výmolů. Velikost výmolů je výrazně ovlivňována materiálem dna v korytě, jistou roli hraje i zakončení vývarového prahu.

Za prahem ukončeným svislou stěnou vznikají výmoly poněkud kratší ale o to hlubší a blíže k prahu [7]. U stupňovitého a šikmého prahu je vytvořený výmol menší. U stupňovitého prahu, vytvořeného ve stejném sklonu jako práh šikmý, vznikají výmoly o něco menší blíž u konstrukce vývaru, nevýhodou toho ukončení je jeho častější poškození plovoucími předměty a jeho nákladnější zhotovení. Z těchto důvodů se nejčastěji navrhuje šikmé ukončení vývarového prahu. Ukončení prahu vodorovnou plochou v úrovni dna se ukázalo jako nevhodné. Výzkum prokázal, že je vhodné práh mírně navýšit o výšku  $\Delta y$  nad úroveň dna pod jezem a jeho poproudí část navrhnout ve sklonu 1:4 až 1:6.

Hloubka vody nad zvýšeným prahem však musí být větší, než hloubka kritická  $h_k$  [7]. Na poproudí straně na něj poté navazuje těžký kamenný zához ve stejném sklonu, který vystihuje tvar vytvářejícího se výmolů.



Obr. 3.8 Úprava prahu vývaru: a) svislý, b) stupňovitý, c) šikmý

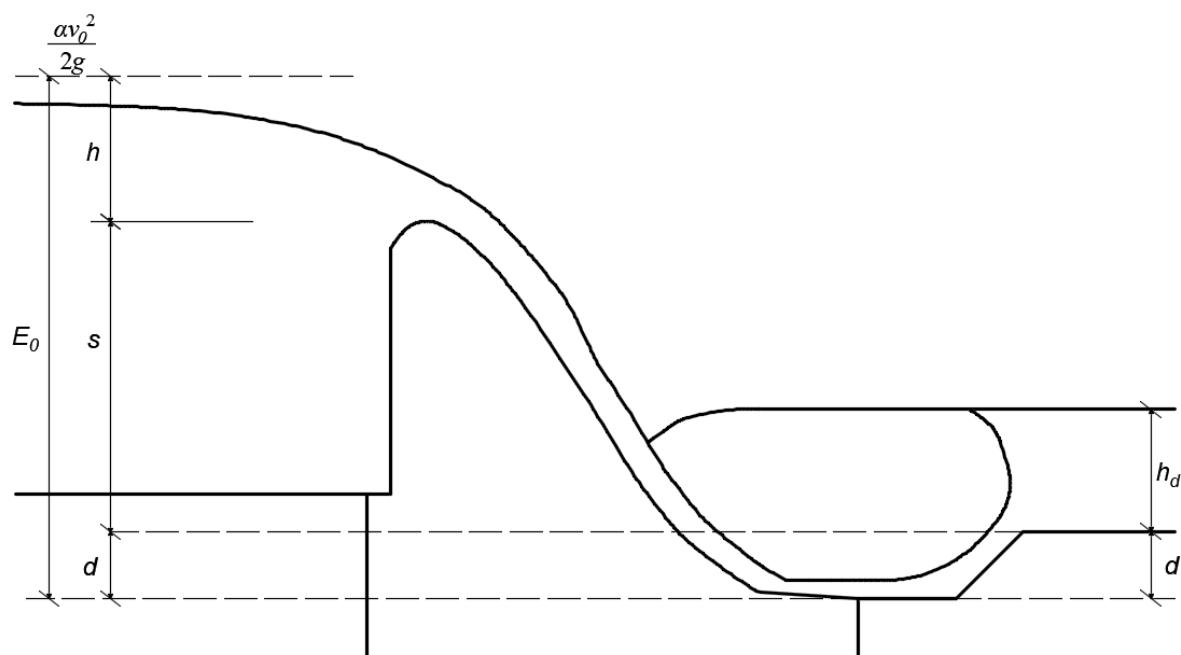
### 3.2.4 Opevnění za vývarem

Opevnění plní dvě funkce:

- 1) zatěžuje povrch zeminy za prahem proti vyplavení částic průsakem vody,
- 2) tvoří plynulý přechod mezi konstrukcí vývaru a dnem za vývarem.

### 3.2.5 Návrh zahloubeného vývaru

Cílem návrhu zahloubeného vývaru je nalezení konstrukce, ve které by při všech možných průtocích vznikl mírně vzdutý vodní skok [4]. Pro tento stav je většinou hloubka v korytě  $h_d$  nedostačující ( $h_2 > h_d$ ), místo vzdutého vodního skoku by nastal vodní skok oddálený a to by způsobovalo namáhání koryta za vývarem vysokými rychlostmi. Uvedenému jde zabránit zahloubením vývaru (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Schéma zahloubení vývaru

Aby docházelo k mírně vzdutému vodnímu skoku, který definuje součinitel zatopení  $\sigma$  (také nazýván „míra vzdutí“)

$$\sigma = \frac{h_d + d}{h_2}, \quad (3.11)$$

tak se dle Čertaousova volí  $\sigma$  v rozmezí 1,05-1,10.

Požadavek na největší hloubku vývaru nemusí nastat při největším průtoku, je třeba pro návrh stanovit tzv. návrhový průtok [4]. Při zvětšujícím se průtoku se může rychleji zvyšovat úroveň hladiny dolní vody než horní, takže rozdíl hladin (spád) se pak zmenšuje. Pro určení návrhového průtoku se vypočítají pro jednotlivé průtoky potřebné hloubky vývaru a ty se vynesou do grafu v závislosti na průtoku. Získané body se proloží křivkou a její maximum pak určuje velikost návrhového průtoku a velikost návrhového zahloubení vývaru.

Druhá vzájemná hloubka v rovnici (3.11) se vypočítá z první vzájemné hloubky pomocí rovnice (3.2). První vzájemná hloubka se stanoví z řešení nerovnoměrného bystřinného proudění na skluzové ploše vzdouvací stavby nebo pomocí rovnice vycházející z energetické výšky před stavbou. Níže je uvedený druhý případ pro spádový stupeň a koryto obdélníkového profilu s jednotnou šířkou.

V případě jednotné šířky koryta  $b$  se specifický průtok  $q$  vypočítá z průtoku  $Q$

$$q = \frac{Q}{b}. \quad (3.12)$$

Koncová hloubka na hraně spádového stupně je

$$h_e = \left( \frac{q}{C \cdot g^{1/2}} \right)^{2/3}, \quad (3.13)$$

kde  $C$  je součinitel průtoku, který pro případ nulového sklonu dna horního koryta a svislou stěnu stupně má hodnotu 1,66 [6]. Z výše uvedeného vztahu a rovnice (3.9) vyplývá, že kritická hloubka je

$$h_k = 0,71 \cdot h_e. \quad (3.14)$$

Energetická přepadová výška je

$$h_0 = \frac{3}{2} \cdot h_k. \quad (3.15)$$

Energetická výška průřezu vztažená ke dnu vývaru je

$$E_0 = s + h_0, \quad (3.16)$$

kde  $s$  je výška jezové konstrukce. První vzájemná hloubka pro případ přilehlého a vzdutého vodního skoku, kdy  $h_1 = h_a$  se pak určí z rovnice (řeší se iteračně)

$$h_c^{(1)} = \frac{Q}{\varphi \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g (E_0 - h_c^{(0)})}}, \quad (3.17)$$

kde  $\varphi$  je rychlostní součinitel zohledňující ztráty (za předpokladu bez ztrát je roven 1). Pro výpočet rychlosti v profilu první vzájemné hloubky platí

$$v_1 = \frac{q}{h_1}. \quad (3.18)$$

V případě nezahloubeného vývaru se rovnice (3.11) upraví na

$$h_d = h_2 \cdot \sigma, \quad (3.19)$$

Pro výpočet rychlosti v profilu dolní vody platí

$$v_d = \frac{q}{h_d}. \quad (3.20)$$

Pro výpočet délek vodního skoku je třeba dopočítat Froudovo číslo  $Fr$  rovnice (3.10) a z poměru  $h_2/h_1$  koeficient  $K$  z Tab. 3.1. Délka vodního skoku se určí z rovnic (3.3) až (3.8).



### 3.3 Počátek pohybu splavenin

Počátek pohybu usazené částice je definován jejím uvedením z klidu do pohybu [12]. Při daném stavu je porušena stabilita částice usazeniny, ze které se stane splavenina. Počátek pohybu splavenin je dobré definovat ve vazbě k známé, či dobře měřitelné (vypočítané) veličině proudu neboli prediktoru. Tento prediktor může být např. smykové napětí, dnová, svislicová či průřezová rychlost, specifický průtok atd. V diplomové práci je zvolena závislost na bezrozměrném smykovém napětí a na densimetrickém Froudově čísle. Bezrozměrné smykové napětí se použije v těch případech, kdy lze stanovit smykové napětí na dně, densimetrické Froudovo číslo se použije v opačném případě např. u silně provzdušněného proudu.

Pro stanovení počátku pohybu splavenin se používají následující metody [12]:

- a) Vizuální pozorování – přímé pozorování částice. U stejnozrnných částic se určuje množství částic v pohybu, u nestejnorznných částic se určuje velikost určité frakce částic v pohybu. Rozlišují se 3 stádia:
  - Počáteční pohyb – stav, kdy se pohybují pouze ojedinelé částice na dně (malé částice).
  - Střední pohyb – stav, kdy se pohybuje přibližně polovina částic na dně (středně velké částice).
  - Všeobecný pohyb – stav, kdy se pohybují všechny částice na dně (velké částice).
- b) Extrapolace křivky průtoku splavenin k referenční hodnotě – Tato metoda je založena na měření průtoku splavenin a smykového napětí. Dalším krokem je převedení těchto hodnot na bezrozměrnou podobu a proložení vhodné aproximační křivky. Následuje extrapolace křivky do nulové hodnoty bezrozměrného průtoku splavenin, nebo také do smluvené hodnoty bezrozměrného průtoku splavenin (tento postup je častější).
- c) Teoretické odvození – tato metoda je založena na deterministickém odvození počátku pohybu částic, za použití silové, momentové, hybností nebo energetické rovnováhy. Může být dále založena na stochastickém přístupu, či rozměrové analýze doplněné o příslušné součinitele.

#### 3.3.1 Namáhání koryta toku prouděním vody

Při průtoku vody korytem dochází na rozhraní vody a podkladu (stěny, dno) k vzájemné interakci. Je snaha popsat k čemu dochází a jak se mohou dané hodnoty ovlivňovat. V této části bylo provedeno zaměření na posouzení při jaké hodnotě dochází k pohybu usazenin či usazování splavenin.

Posouzení dle [9]:

- a) Metoda průřezové rychlosti  $v$  – je založena na stanovení nevymílací (průřezové) rychlosti  $v_v$  a nezanášecí (průřezové) rychlosti  $v_n$ . Obecně se požaduje, aby byla splněna podmínka

$$v_n < v < v_v. \quad (3.21)$$

Podle podmínky musí být průřezová rychlost daného průtoku menší než nevymílací průřezová rychlost pro danou zrnitost dnového materiálu říčního koryta, a zároveň větší než nezanášecí rychlost pro tutéž zrnitost. Přitom se nezanášecí rychlost určuje ze vztahu

$$v_n = 0,7 \cdot v_v. \quad (3.22)$$

- b) Metoda svislicové rychlosti.

- c) Metoda dnové rychlosti.
- d) Metoda smykového napětí.

V současné době se doporučuje pro posouzení metoda bezrozměrného smykového napětí [12].

### 3.3.2 Bezrozměrné smykové napětí

Bezrozměrné smykové napětí na dně je základní vlastností proudu pro stanovení pohybu částic, s jeho pomocí se určuje i průtok splavenin [12].

Smykového napětí na dně  $\tau_d$  při rovnoměrném proudění je závislé na hloubce  $h$ , hustotě kapaliny  $\rho$ , tíhovém zrychlení  $g$  a podélném sklonu  $i$ , vypočítá se z rovnice [12]

$$\tau_d = h \cdot \rho \cdot g \cdot i. \quad (3.23)$$

Úpravou rovnice (3.23) je možné vyjádřit třecí rychlost na dně  $u_*$ , která charakterizuje hustotně vyjádřené smykové napětí, má tvar

$$u_* = (h \cdot g \cdot i)^{1/2}. \quad (3.24)$$

Bezrozměrné smykové napětí na povrchu  $\tau^*$  se vypočítá z rovnice

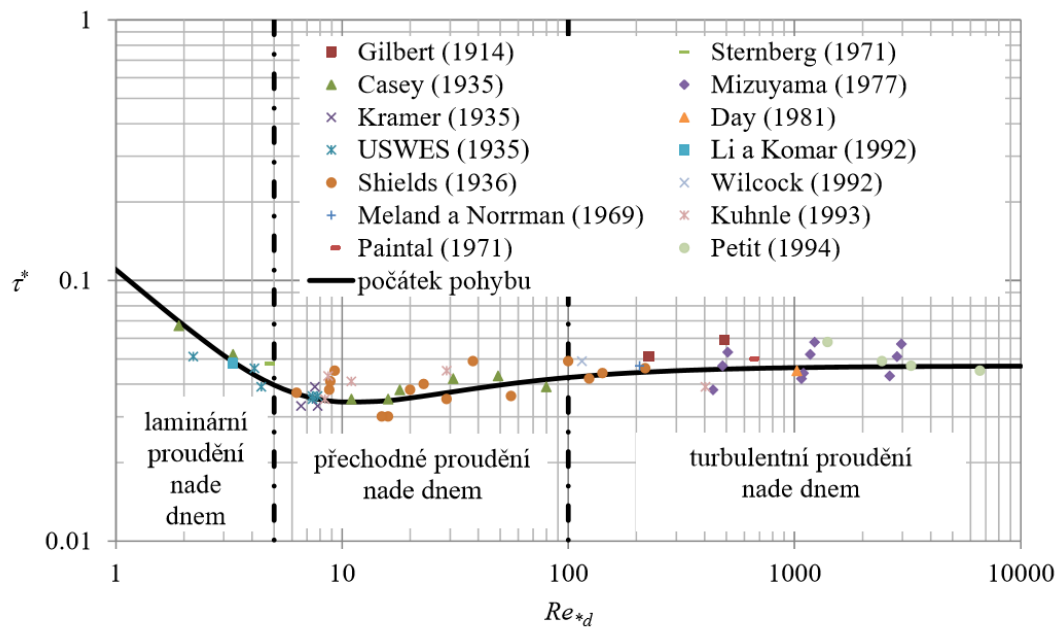
$$\tau^* = \frac{\tau_d}{g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho)}. \quad (3.25)$$

Výsledný funkční vztah pro počátek pohybu splavenin je možné zapsat ve tvaru

$$\tau_c^* = f\{Re_{*d}\}, \quad (3.26)$$

kde dolní index  $c$  značí počátek pohybu splavenin,  $Re_{*d}$  je Reynoldsovo číslo vyjádřené velikostí částice a třecí rychlostí. Kvantifikace funkčního vztahu do tvaru rovnice se provádí na základě měření. Měřením počátku pohybu částic se zabývalo značné množství autorů, databázi jejich výsledků uvádí např. Brownlie nebo Buffington [12]. Změřenými hodnotami se proloží vhodná aproximační funkce, která určuje počátek pohybu splavenin. Na Obr. 3.10 je uvedený příklad vyhodnocení počátku pohybu splavenin pro tvarově podobné částice s určením počátku pohybu splavenin stejnou metodou. Při použití jiné metody, jinak tvarovaných částic, jinak uložených částic atd. bude křivka určující počátek pohybu částic posunutá ve směru osy  $\tau^*$

Křivka pro počátek pohybu splavenin se skládá ze tří částí [12]. V části  $Re_{*d} \leq 5$  je nade dnem laminární proudění, tedy buď laminární vrstva (hydraulicky hladký povrch), nebo je v celém profilu laminární proudění. V části  $5 < Re_{*d} \leq 100$  je nade dnem přechodné proudění mezi laminárním a turbulentním prouděním, tedy přechodná vrstva. V části  $Re_{*d} > 100$  je nade dnem (hydraulicky drsný povrch) turbulentní proudění, tedy turbulentní vrstva.



Obr. 3.10 Shieldsův graf pro vybraný typ částic a způsob určení počátku pohybu [12]

Vhodnější je použít závislost, která neobsahuje třecí rychlost [12]. Vzhledem k návaznosti na usazování se doporučuje bezrozměrná velikost částice

$$d^* = \left( \frac{Re_{*d}^2}{\tau^*} \right)^{1/3} = \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{v^2} \right)^{1/3} \cdot d. \quad (3.27)$$

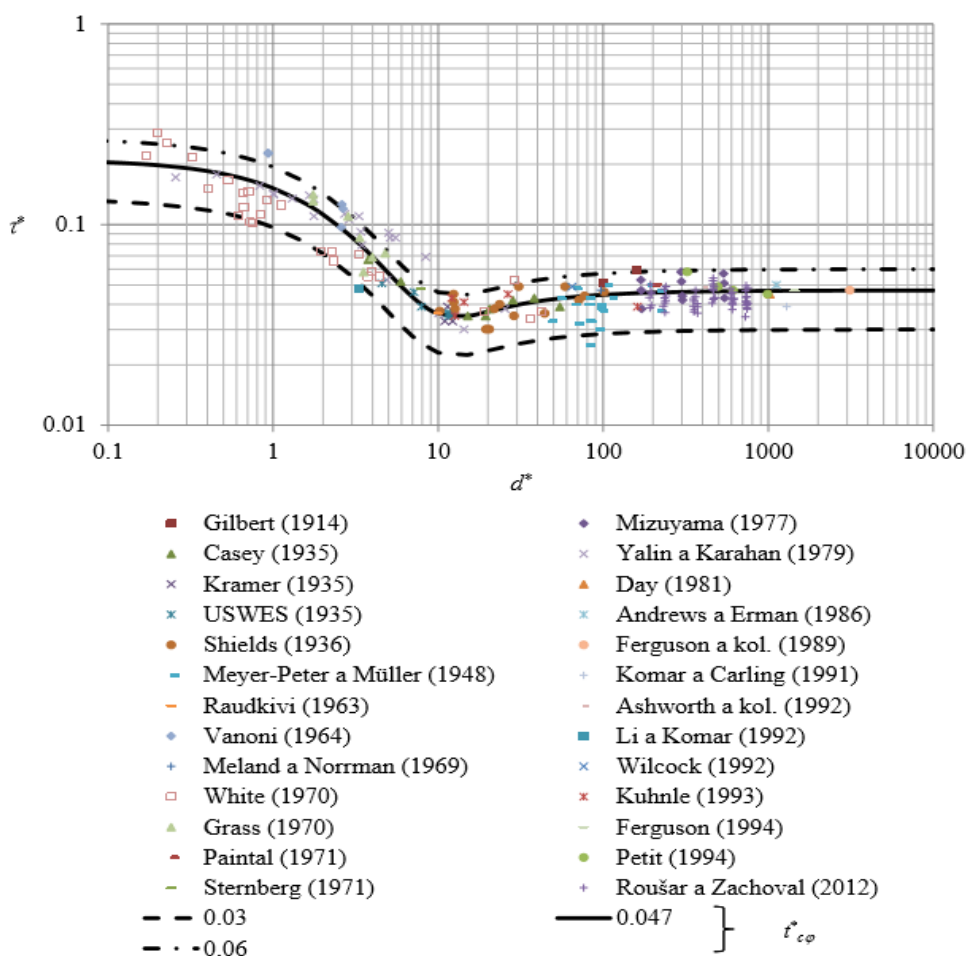
Vzájemný vztah odvozený z měřených dat pro přibližně stejná zrna a počátek stanovený přibližně stejně má tvar

$$\tau_c^* = \tau_{c\varphi}^* \cdot \left( C_{\tau^*} \cdot e^{-d^*/3} + e^{-5/d^*} \right), \quad (3.28)$$

kde  $\tau_{c\varphi}^*$  je bezrozměrné smykové napětí pro příslušný úhel vnitřního tření  $\varphi$  určený pro plně turbulentní proudění z rovnice

$$\tau_{c\varphi}^* = \frac{\tan \varphi}{6,5 + 14 \cdot \tan \varphi}. \quad (3.29)$$

Nejčastěji používanou hodnotou je  $\tau_{c\varphi}^* = 0,047$ .  $C_{\tau^*}$  je součinitel určený metodou minima čtverců ze změřených dat  $C_{\tau^*} = 4,5$ . Závislost je vyobrazena na Obr. 3.11. Plná čára zde určuje hodnotu nejčastěji očekávatelnou pro  $\tau_{c\varphi}^* = 0,047$ , což odpovídá přibližně  $\varphi = 42^\circ$ . Pro nejběžnější rozsah úhlu vnitřního tření jsou na Obr. 3.11 vyobrazeny i křivky pro  $\tau_{c\varphi}^* = 0,030$  ( $\varphi = 19^\circ$ ) čárkovaně a  $\tau_{c\varphi}^* = 0,060$  ( $\varphi = 68^\circ$ ) čerchovaně.

Obr. 3.11 Počátek pohybu splavenin vyjádřený závislostí  $\tau^*$  na  $d^*$  [12]

### 3.3.3 Úhel tření usazenin

Na základě pohybu částic se rozlišuje statický úhel tření  $\varphi$  (částice jsou v klidu) a dynamický úhel tření  $\varphi_d$  (částice jsou v pohybu) [12]. Na základě polohy místa, ve které se tření určuje, se rozlišuje úhel vnitřního a vnějšího tření (na rozhraní s pevnými povrchy). Statický (klidový) úhel vnitřního tření usazenin  $\varphi$  je důsledkem geometrických charakteristik částic (tvar zrnitostní křivky, tvar částic, zaoblenost částic, povrchová struktura částic), uložení částic, relativní ulehlosti a vlhkosti.

Úhel vnitřního tření se používá u výpočtu stability svahů břehů, nánosů atd. [12]. Na rozhraní usazenin a pevného povrchu (betonové a ocelové povrchy vodohospodářských konstrukcí a povrch skalní horniny) se používá úhel vnějšího (stěnového) tření. Úhel vnějšího tření má menší nebo stejnou hodnotu jako úhel vnitřního tření (USDA, 1994).

Dynamické úhly (vnějšího a vnitřního) tření  $\varphi_d$  mají menší hodnotu než statické úhly (vnějšího a vnitřního) tření  $\varphi$  [12]. Madsen doporučuje pro dnové splaveniny

$$\tan \varphi_d = 0,5 \cdot \tan \varphi, \quad (3.30)$$

Dynamické úhly tření jsou důsledkem charakteristik částic, relativní vlhkosti a vzájemného pohybu částic [12]. Při počátku pohybu splavenin a při pohybu dnových splavenin je důležité znát

hodnotu statického a dynamického úhlu tření částic. Každá obecná částice usazenin je ve směsi částic uložena jinak, proto má svůj vlastní statický úhel tření  $\varphi$

### 3.3.4 Densimetrické Froudovo číslo

V případě vzniku provzdušněného proudu nelze přímo stanovit bezrozměrné smykové napětí, protože nelze stanovit charakteristiky provzdušněného proudu (úroveň dna, úroveň hladiny, hustota atd.) [12]. Z toho důvodu se místo bezrozměrného smykového napětí použije densimetrické (hustotně vyjádřené) Froudovo číslo

$$Fr_{\Delta} = \frac{q}{(g \cdot \Delta \cdot d^3)^{1/2}}, \quad (3.31)$$

se specifickým průtokem  $q$ . Z dat z experimentálního výzkumu publikovaného Pařílkovou a kol. [12] je stanovena rovnice pro jeho kritickou hodnotu při počátku pohybu splavenin

$$Fr_{\Delta c} = \frac{0,22}{i_d}, \quad (3.32)$$

s platností v rozsahu  $0,2 \leq i_d \leq 0,5$ , kde  $i_d$  je podélný sklon dna.

## 3.4 Posouzení zanášení a vymílání vývarů

Pro posouzení je zvolena metoda stupně bezpečnosti, kde  $SF$  je stupeň bezpečnosti. Odolný povrch proti vymletí je, když

$$\tau^* \cdot SF \leq \tau_{c\alpha\beta}^*, \quad (3.33)$$

$$Fr_{\Delta} \cdot SF \leq Fr_{\Delta c}. \quad (3.34)$$

$SF$  závisí na významnosti konstrukce, návrhové situaci (trvalá, náhodná a mimořádná zatížení), spolehlivosti určení bezrozměrného smykového napětí, jeho kritické hodnoty a vlastnostech částic. Pro stanovení kritické hodnoty z hodnot měřených platí  $SF=1$ . Kritická hodnota pro zanášení je jiná než kritická hodnota pro vymílání.

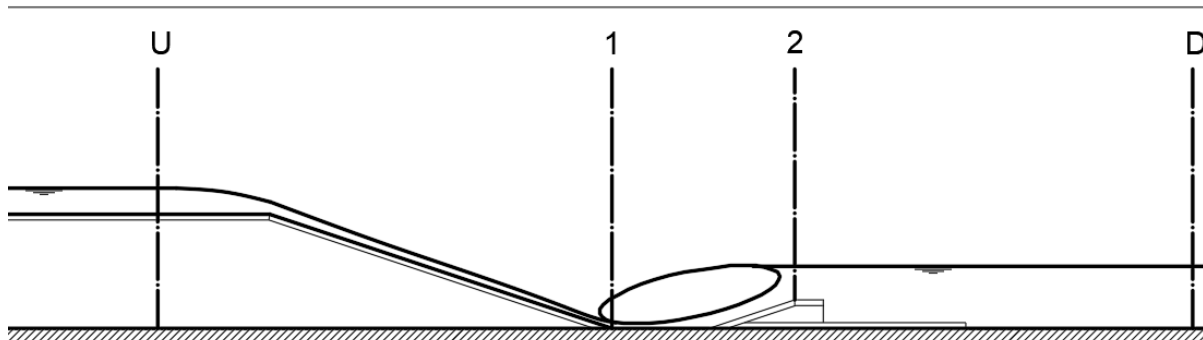
Ve vývaru lze definovat několik specifických profilů, které lze použít pro posouzení:

Profil U – umístěný před spádovým objektem, kde nedochází k ovlivnění hladiny dolní vodou ani spádovým stupněm, je zde vodorovné dno.

Profil 1 – umístěný v patě spádového objektu, kde vzniká první vzájemná hloubka vzdutého vodního skoku, je zde vodorovné dno.

Profil 2 – umístěný za vývarem, tento profil se pro každý průtok lišil, byl ovlivňován polohou vodního skoku, nachází se v místě druhé vzájemné hloubky. Do tohoto profilu byla nastavována horní hrana vývarového prahu.

Profil D – umístěný ve větší vzdálenosti od profilu 2, není ovlivněn vodním skokem a hladina je ustálená.



Obr. 3.12 Schéma umístění profilů

### Posouzení podmínek počátku zanášení a vymílání na základě bezrozměrného smykového napětí

Na chování splavenin a jejich případné usazování v konstrukci vývarů má vliv hodnota bezrozměrného smykového napětí v daných profilech. Vztah bezrozměrného smykového napětí na dně a její hraniční hodnoty pro uvedení splavenin do pohybu (či uvedení do klidu) ukazuje, jak se budou splaveniny v daných profilech chovat.

Zanášení vývaru je možné v případě, že přitékají dnové splaveniny, což nastane, když

$$\tau_U^* > \tau_{ca\beta,U}^* \quad (3.35)$$

a opačně, nedochází-li k pohybu splavenin v horním korytě, nemůže dojít k zanášení

$$\tau_U^* < \tau_{ca\beta,U}^* \quad (3.36)$$

Chování splavenin ve vývaru při ojedinelém přítoku splavenin je ovlivňováno vztahy bezrozměrného smykového napětí v daných profilech a jeho kritické hodnoty s uvážením výše uvedených rovnic, nezanáší se když

$$\tau_1^* > \tau_{ca\beta,1}^*, \quad \tau_2^* > \tau_{ca\beta,2}^* \quad (3.37)$$

zanáší se, když

$$\tau_1^* < \tau_{ca\beta,1}^*, \quad \tau_2^* < \tau_{ca\beta,2}^* \quad (3.38)$$

Kombinací těchto stavů může docházet k částečnému vymletí, nezanesení vývaru

$$\tau_1^* > \tau_{ca\beta,1}^*, \quad \tau_2^* < \tau_{ca\beta,2}^* \quad (3.39)$$

opačný stav nevzniká.

## 4 Experimentální výzkum

### 4.1 Experimentální zařízení

#### 4.1.1 Hydraulický okruh

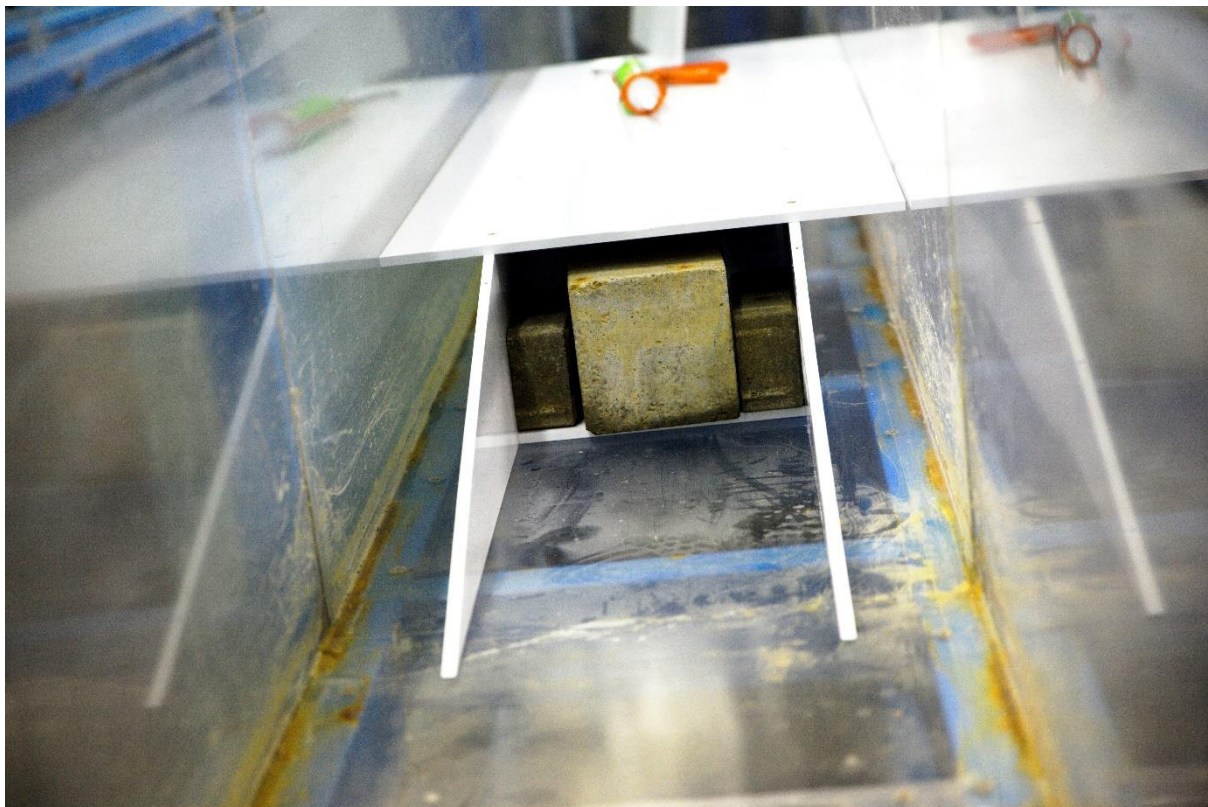
Experimentální výzkum byl proveden v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Sklopný žlab, ve kterém bylo měřeno, byl svařen z ocelové nosné konstrukce. Vnitřní část byla vyložena průhlednými deskami z polymethylmetakrylátu. Žlab byl 6 m dlouhý a 0,5 m široký, pro měření byl žlab nastaven vodorovně.



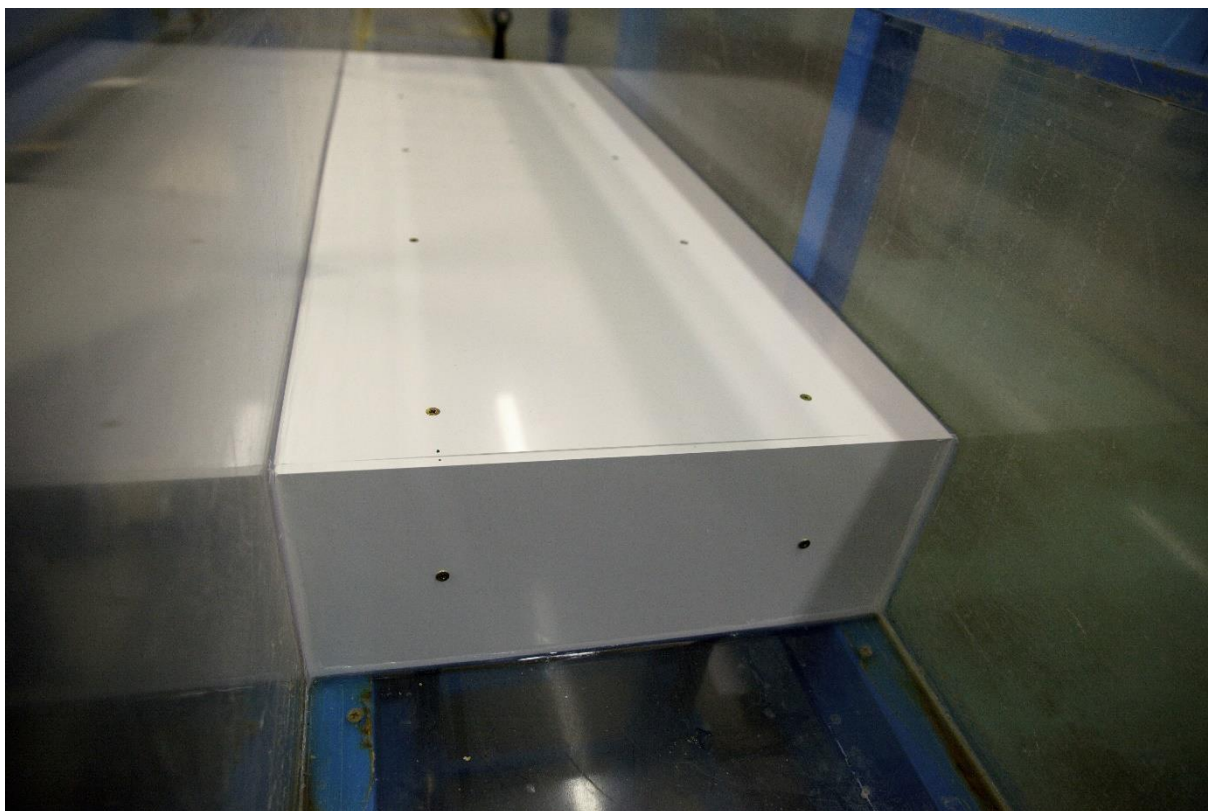
Obr. 4.1 Měrný žlab

#### 4.1.2 Spádový stupeň a vývar

Do žlabu byla připevněna vestavba, která simulovala spádový stupeň. Montáži spádového stupně předcházelo vyčištění a vysušení žlabu. Kontrola míst spojů a jejich přelepení folií. Aby nedošlo k posunu vlivem tekoucí vody a vlivem vztlakové síly při napouštění žlabu, byla vestavba zatížena. Po dostatečném zatížení byla přišroubována svislá a šikmá část přelivné plochy. Místa dotyku přelivné plochy a konstrukce žlabu byla utěsněna silikonem. Jen šikmá část nebyla, aby mohlo docházet k napouštění vody do konstrukce vestavby a k jejímu následnému odtoku při zastavení motorů čerpadla a poklesu hladiny.

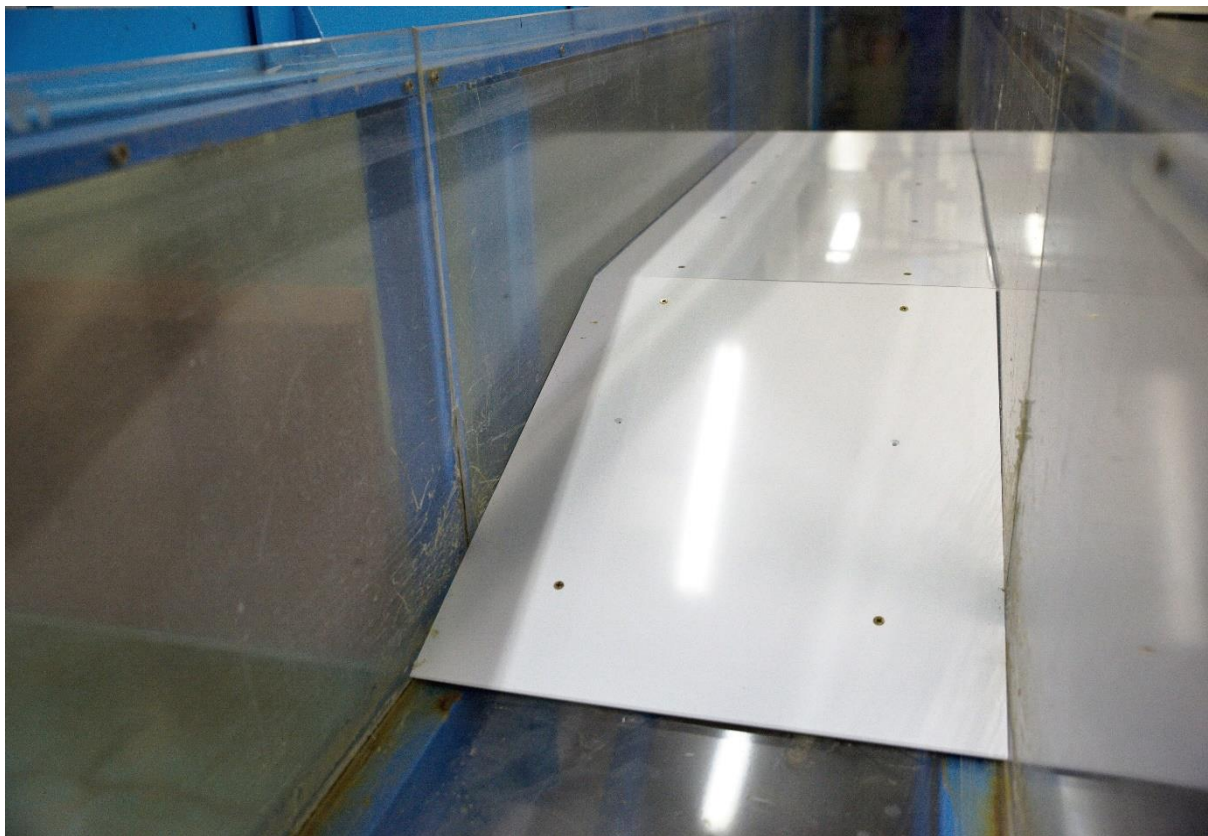


Obr. 4.2 Zatížení konstrukce vestavby



Obr. 4.3 Svislá část návodního líce vestavby





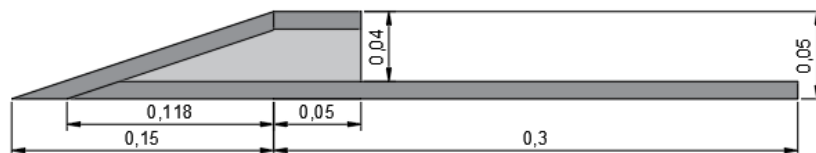
Obr. 4.4 Přelivná plocha

Svislá část návodního líce vestavby tvořila příliš velký odpor a způsobovala vlny na její koruně, proto byla před ni umístěna kamenná rovnanina v proudnicovém tvaru, která umožnila plynulé natékání na konstrukci a snížila velikost vln, které na koruně vznikaly. Dále zvětšila stabilitu konstrukce.



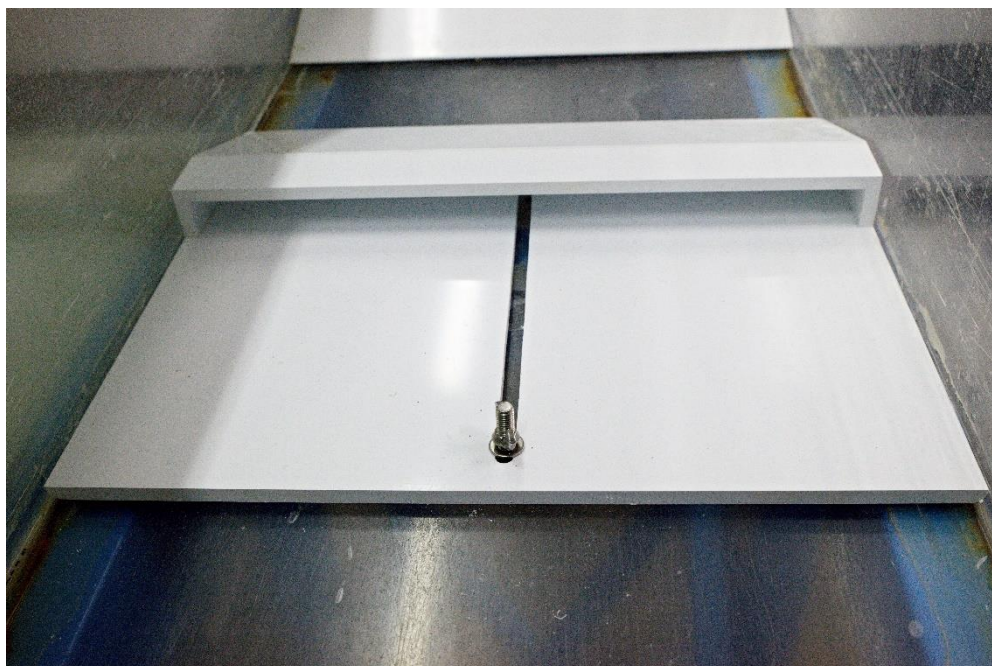
Obr. 4.5 Kamenná rovnanina

Po měření ve vývaru pro usazování a vymílání došlo k vyhodnocení výsledků a návrhu vývarového prahu (Obr. 4.6).



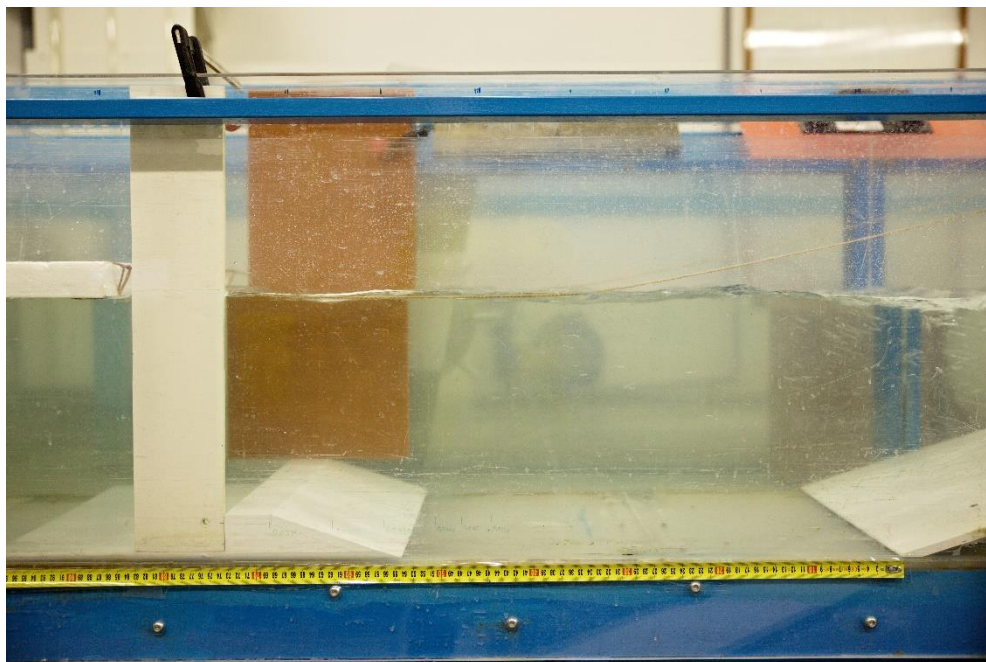
Obr. 4.6 Řez vývarovým prahem

Ve vodorovné části vývarového prahu byla vyvrtána podélná drážka o délce 30 cm. Ve dne byly vyvrtány 2 otvory na šrouby, které po sešroubování přes dno byly v drážce uchyceny křídlovou matkou s podložkou. Díky velkému rozsahu drážky a dvěma otvorům, bylo možné práh posouvat o více než 0,5 m ve vodorovné ose.



Obr. 4.7 Ukázka kotvení prahu

Bylo ovšem nutné v případě uchycení šroubem na kraji desky použít svislou desku na ukotvení konstrukce, protože z důvodu velké páky docházelo k pružné deformaci podkladní desky a následně k mírnému nazvednutí návodní části prahu.



Obr. 4.8 Ukázka ochrany horní části prahu před nadzvednutím

### 4.1.3 Regulace úrovně hladiny dolní vody

Odtok ze žlabu byl zahrazen hradly, která měla za úkol regulovat úroveň hladiny dolní vody. Kvůli mírnému zvlnění hladiny za vývarem byl přidán polystyrénový blok. Ten byl na dvou místech ukotven ke stěně žlabu a díky spojení na provázku reagoval na změny hladiny a zároveň tlumil povrchové vlny, které by jinak znemožňovaly odečítání hloubky dolní vody.

### 4.1.4 Částice

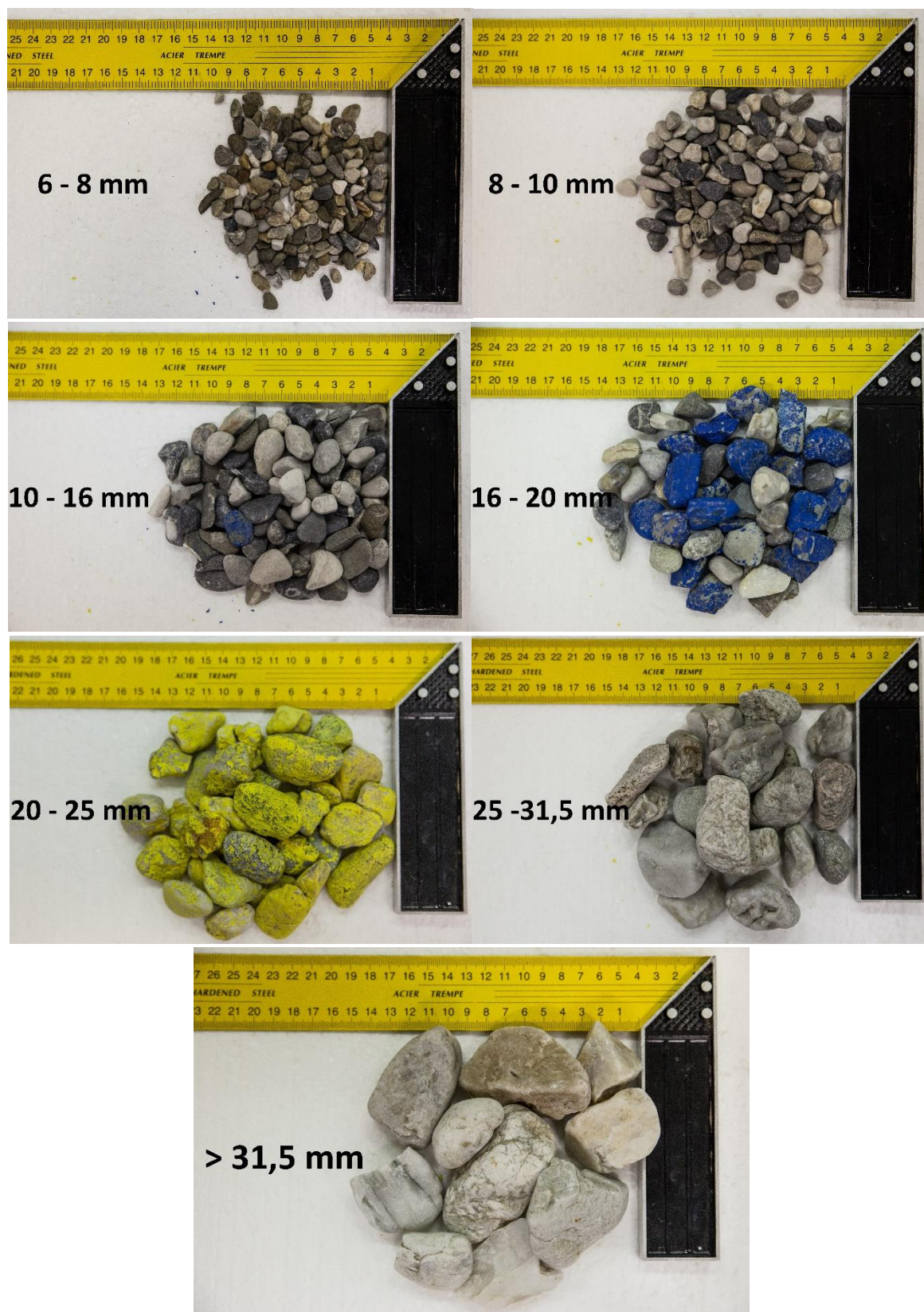
Pro experiment bylo vybráno 7 frakcí kameniva (Tab. 4.1) o objemové hmotnosti přibližně  $\rho_s = 2\,650 \text{ kg/m}^3$ . Od každé frakce bylo vybráno přibližně stejné množství kameniva. Třídění do frakcí bylo provedeno proséváním na normové sadě sít. Sada sít se vzestupně stoupající velikostí ok byla upevněna na vibrující desku. Po 15 minutovém vibrování se kamenivo rozdělilo na síta podle velikosti. Velikost frakce je určeno velikostí ok síta, kterým kamenivo propadlo a na kterém se propad ukončil.

Částice (Obr. 4.9) byly do proudu vkládány ručně. Na konci žlabu bylo připevněno síto pro zachycení částic.

Tab. 4.1 Použité frakce kameniva

Frakce	Průměr
[mm]	[mm]
6 - 8	7
8 - 10	9
10 - 15	12,5
15 - 20	17,5
20 - 25	22,5
25 - 31,5	28,25
> 31,5	42,98*

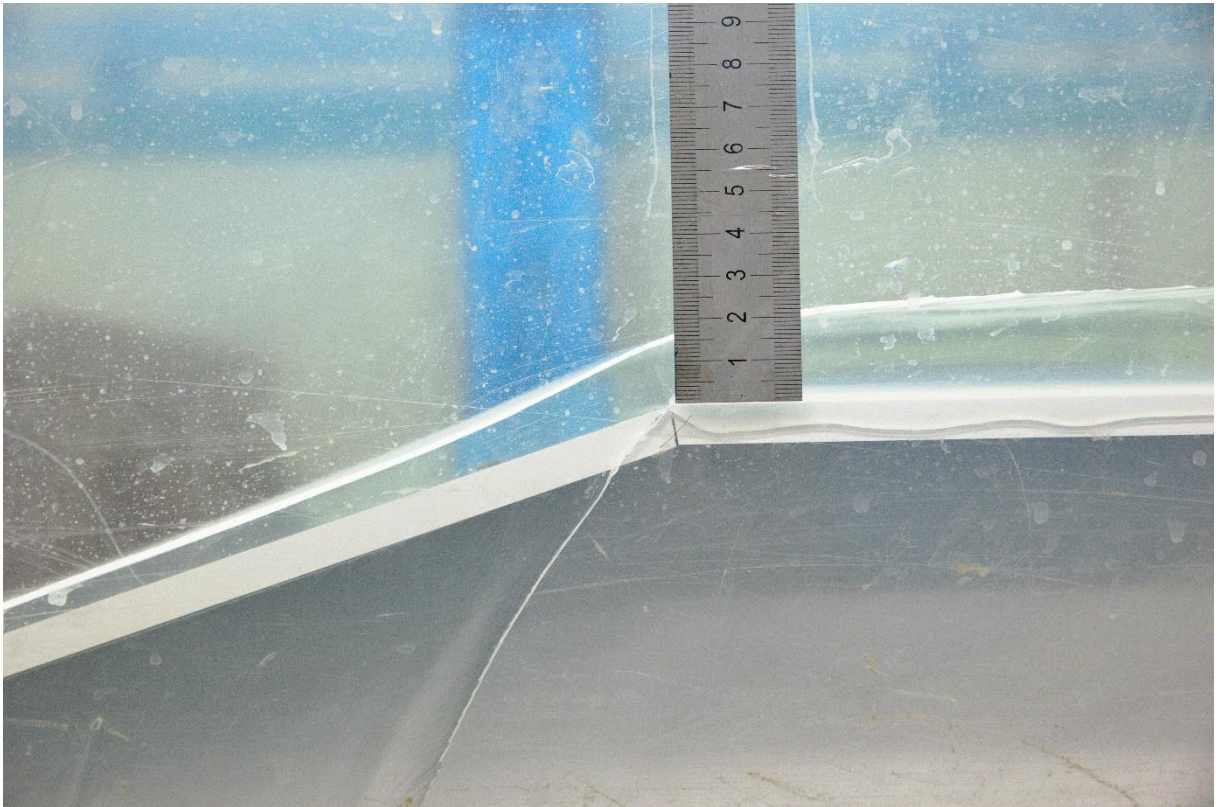
Pozn. \* bylo vybráno 16 částic a změřením jejich šířky a následným zprůměrováním byla určena průměrná velikost zrna



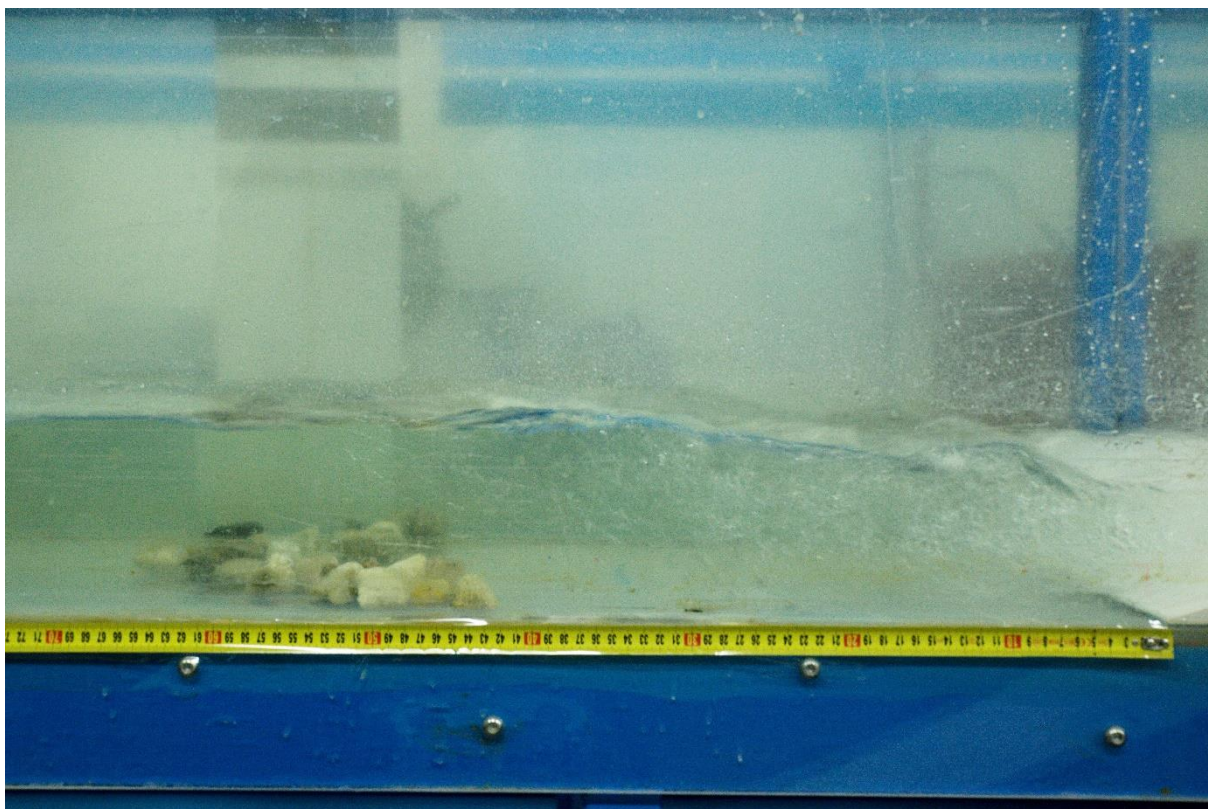
Obr. 4.9 Frakce použitého kameniva

## 4.2 Měřidla

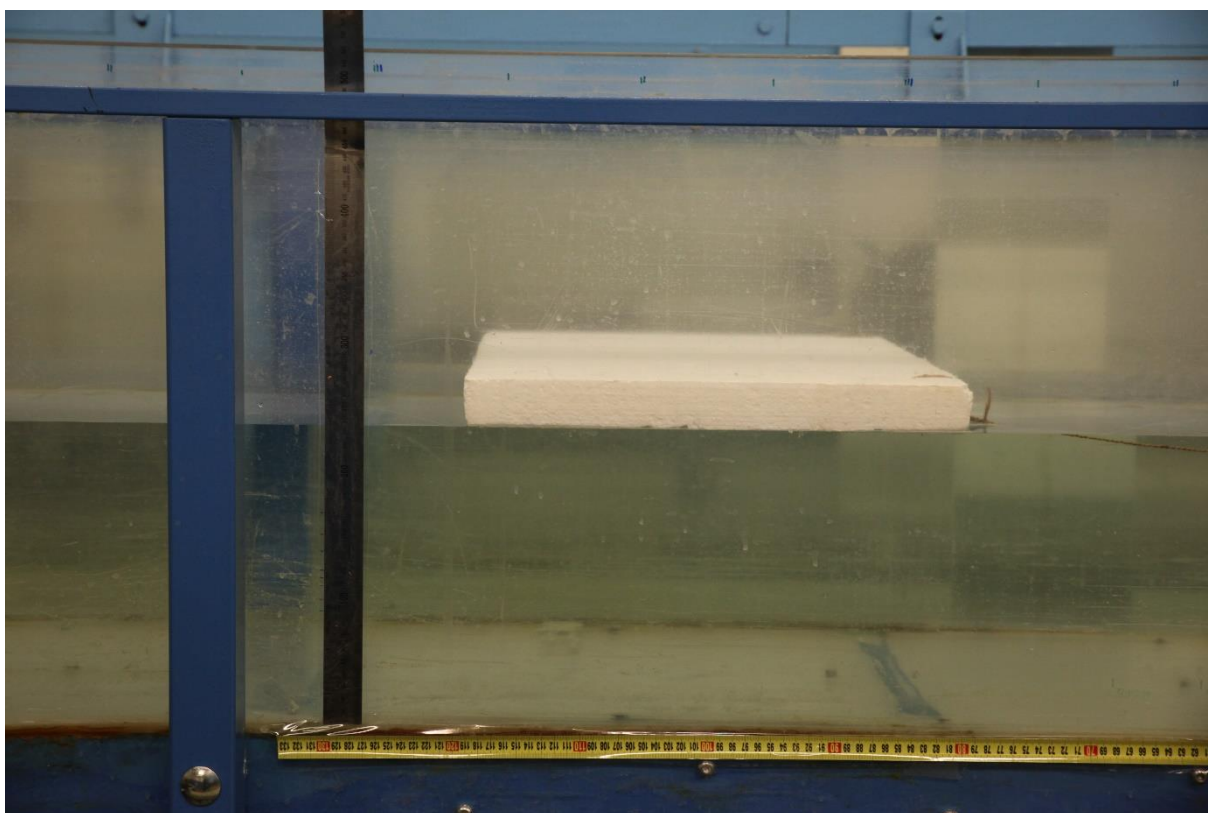
Měření bylo provedeno pomocí 3 délkových měřidel, připevněných z vnější části na stěně žlabu pomocí průhledné lepicí pásky a to ve třech místech. Na horní hraně přelivné plochy se měřila koncová hloubka  $h_e$  (Obr. 4.10). Ve vodorovné části odtokového koryta od paty přelivné plochy se měřily vodorovné délky – délka usazení  $L_{us}$ , délka vymletí  $L_v$  a délka vodního skoku  $L_{vs}$  (Obr. 4.11). Ve vzdálenosti 1,2 m od hrany přelivné plochy docházelo k měření hladiny dolní vody  $h_d$  (Obr. 4.12).



Obr. 4.10 Měření koncové hloubky  $h_e$



Obr. 4.11 Měření délek vymletí  $L_V$  a usazení  $L_{US}$

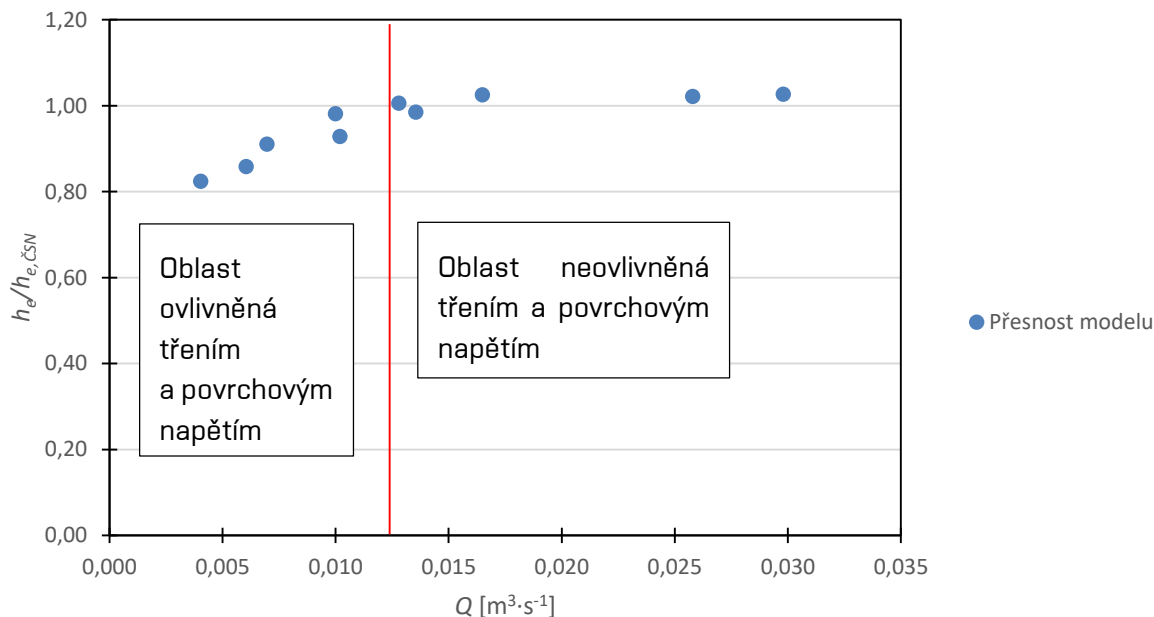


Obr. 4.12 Měření hloubky dolní vody  $h_d$

Před měřením hloubky dolní vody byl umístěn polyesterový tlumící blok, sloužil k utlumení kmitání hladiny a tím napomohl přesnějšímu odečítání hodnot při měření.

### 4.3 Limity použitelnosti modelu

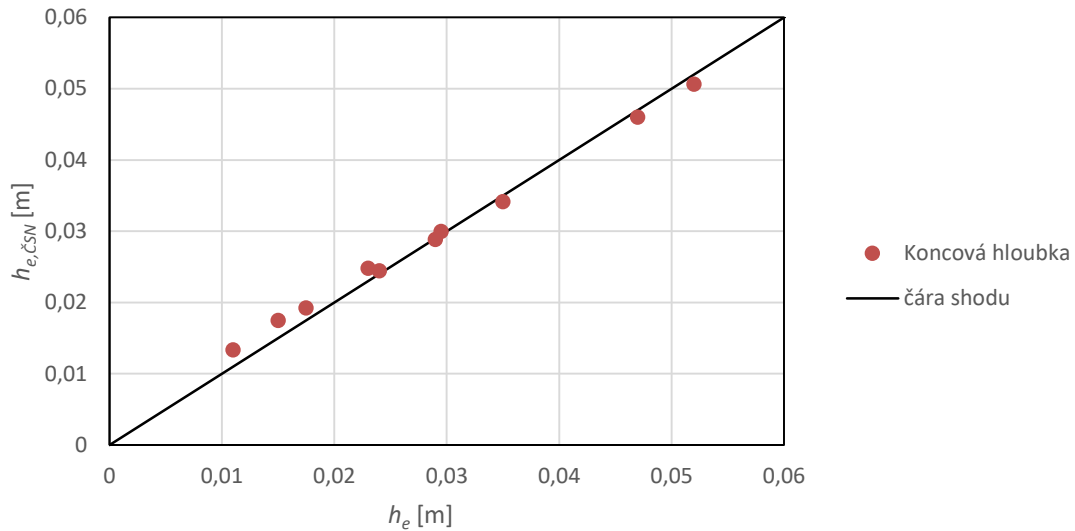
Před začátkem měření s kamenivem bylo nutné stanovit minimální hodnotu průtoku, pro který nedochází k ovlivnění měřítkem modelu – mezní podmínka podobnosti. Hledala se taková hodnota průtoku s takovou koncovou hloubkou, kdy přepad nebyl ovlivněn třením a povrchovým napětím. Na základě měření, byla určena hodnota 13,1 l/s, což odpovídalo koncové hloubce 0,029 m. Při menších hodnotách průtoku (koncové hloubky), docházelo ke změně součinitele průtoku. Uvedené je doloženo graficky na Obr. 4.13.



Obr. 4.13 Limit použitelnosti modelu

V grafu na Obr. 4.13 zastupuje svislou osu poměr měřené koncové hloubky  $h_e$  a vypočtené koncové hloubky  $h_{e, \text{ČSN}}$  která byla vypočtena dle ČSN 75 0255. Vodorovná osa zastupuje dané průtoky. Jak je patrné, při průtoku nižším než 13,1 l/s dochází k značnému rozdílu mezi měřenou a vypočtenou hodnotou.





Obr. 4.14 Shoda mezi měřenou a vypočtenou hodnotou koncové délky

#### 4.4 Měření

Před začátkem měření bylo nutné shrnout vstupní hodnoty a konstanty, posoudit o jaký typ jezové konstrukce se bude jednat a dobře pro ni zvolit koeficienty. Tyto vstupní hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Tabulka vstupních hodnot

Název veličiny	Značka	Hodnota	Jednotka
Rychlostní součinitel	$\varphi$	1	[-]
Coriolisovo číslo	$\alpha$	1	[-]
Boussinoesqovo číslo	$\beta$	1	[-]
Tíhové zrychlení	$g$	9,80665	[m·s <sup>-2</sup> ]
Objemová hmotnost vody	$\rho$	1000	[kg·m <sup>-3</sup> ]
Von Karmánova konstanta	$\kappa$	0,4	[-]
<b>Parametry částic</b>			
poměr mezi vnějším a vnitřním úhlem tření	$\varphi_v / \varphi$	0,5	[-]
úhel vnitřního tření	$\varphi$	40	[°]
úhel vnějšího tření	$\varphi_v$	20	[°]
Objemová hmotnost částice	$\rho_s$	2650	[kg·m <sup>-3</sup> ]
<b>Parametry jezu</b>			
Šířka koryta	$b$	0,503	[m]
Výška přelivné stěny nadednem odpadního koryta	$s$	0,2	[m]
délka sloněné části	$l$	0,6	[m]
Součinitel průtoku	$C$	1,66	[-]
Teplota vody	$T$	20	°C
součinitel drsnosti	$n$	0,01	[-]

#### 4.4.1 Vývar bez vývarového prahu

##### Zanášení

Do prázdného měrného žlabu se pustil požadovaný průtok. Kvůli zavzdušněnému potrubí bylo nutné počkat, než se vyplaví z potrubí vzduchové bublinky a měření průtoku bude přesné. Provedla se případná úprava průtoku, buď změnou frekvence otáčení čerpadla anebo změnou uzavření klapky. Pro takto připravený průtok se pomocí výpočtu v Excelu zjistila hladina dolní vody  $h_d$ , kterou je nutno změnou polohy hrazení odtoku nastavit. Při takto nastavené hladině se vytvořil vzduť vodní skok s mírou vzduť 1,05.

Následoval výběr frakce kameniva. Kamenivo bylo jednotlivě vkládáno do proudu vody v horním korytě. Vodní proud kamenivo odnášel. Pod spádovým stupněm se v určité vzdálenosti začalo usazovat, nebo bylo zachyceno až na sítu. Místo usazení lze popsat jako čelo usazenin. Po jistém čase, kdy dojde k ustálení a čelo usazenin se již dále po proudu nepohybuje, bylo provedeno na vodorovné části dna měření délky usazení částice  $L_{us}$ .

Pro kontrolu výpočtu a získání dalších dat bylo provedeno i měření délky vodního skoku. K tomu účelu sloužil tenký drát, na kterém byla připevněna červená bavlna. Tato bavlna se ponořila těsně pod hladinu a pohybem směrem v ose proudu se hledalo místo, kde se projeví zpětný proud – konec vodního válce. V tomto místě se bavlna otočí a směřuje směrem k vodnímu skoku. Měření bylo náročné na přesnost, vodní válec pulzoval až o 20 %, docházelo k jeho ovlivnění stěnami žlabu. Tímto postupem se změřila délka vodního skoku  $L_{VS,bavl.}$ .

##### Pro vymílání

Měření probíhalo podobně jako u zanášení, rozdílné je vnášení kameniva. Po napuštění měrného žlabu vodou nedochází k regulaci odtékající vody, ale nechá se voda vzdout, aby došlo k zatopení vývaru. Do takto klidné vody u dna žlabu se vyskládala vrstva kameniva, která se chovala jako usazeniny. Při poklesu hladiny se místo pod patou jezové konstrukce chovalo jako zanesený vývar a proud vody se jej snažil vyčistit. Po přípravě vrstvy kameniva se na hladinu umístil tlumicí prvek a změnou polohy hrazení se pomalu začala snižovat úroveň hladiny dolní vody. Postup byl náročnější na čas a pečlivost, po změně hradicích prvků bylo potřeba chvíli počkat na nalezení rovnovážného stavu. Bylo potřeba se vyvarovat rychlému vyhrazení a poklesu hladiny dolní vody až na požadovanou úroveň, aby nedošlo by k vytvoření jiného oddáleného vodního skoku a výsledky měření pohybu kameniva by byly nesprávné. Po správném nastavení hradicích prvků a ustálení hladiny dolní vody bylo možné pozorovat, jak vodní proud postupně odnášel kamenivo a začínal se formovat vodní skok, který se postupně zvětšoval. Pro urychlení měření a z důvodu požadavku na stejnou vrstvu usazenin se vzniklé čelo ručně rozhrnulo na mocnost 2 až 3 průměrů použitého kameniva, tak aby nedocházelo k velkému ovlivnění protékající vody.

Po dosažení ustáleného stavu, kdy nedocházelo k dalšímu vymílání kameniva, se odečetla vodorovná vzdálenost čela vymletého úseku a paty jezové konstrukce. Následovalo měření délky vodního skoku pomocí bavlnky, viz předchozí kapitulu.

#### 4.4.2 Vývar s vývarovým prahem

Pro měření byly vybrány stejné průtoky a frakce kameniva, jako při předchozím měření. Do vývaru byl instalován vývarový práh.

Postup:

- 1) Výběr frakce.
- 2) Nastavení průtoku.
- 3) Nastavení vzdálenosti prahu:
  - a. Z výpočtu podle Nováka – délka vodního skoku.
  - b. Měření délky vodního skoku bavlnkou – splaveniny.
  - c. Měření délky vodního skoku bavlnkou – usazeniny.

Pro zachování nastavení a lepší přesnost měřených hodnot probíhalo měření usazenin a splavenin postupně při jednom nastavení prahu. Pro lepší manipulaci docházelo nejprve k měření usazenin a poté splavenin.



Obr. 4.15 Ukázka kameniva - usazenin ve vývaru

## 4.5 Zpracování a vyhodnocení dat

Naměřená data byla zapsána do tabulky vytvořené v programu Excel (Tab. 4.3 - 4.9), pokud nedošlo k vyčištění vývaru byla zapsána změřená délka vymletí, pokud byl vývar vyčištěný bylo zapsáno V. Pro případ s měřením usazování splavenin se, měřil začátek usazování, pokud nastal ve vývaru, pokud se částice ve vývaru neusadily bylo zapsáno V. Při nastavení vývarového prahu příliš blízko patě přelivné hrany nedošlo k vytvoření vodního skoku ve vývaru, tento případ zastupuje N. Do další části byla zapisována délka vodního skoku. Profil 1 byl zvolen jako reprezentativní a k němu proběhl výpočet. Vypočetla se třecí rychlost v místě první vzájemné hloubky (3.24), kritická hodnota Froudova čísla (3.9) a bezrozměrné smykové napětí (3.25). Proběhl výpočet kritického bezrozměrného smykového napětí pro profil 1, který odpovídá napětí na hladkém dně pro úhel vnějšího tření 20°.

Tab. 4.3 Měřené hodnoty, frakce 0,007 m

Frakce 0,007 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym,s pr}$	$L_{d,us,s pr}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0149	0,57	0,56	0,54	0,476	V	V	0,40	0,40
0,0166	0,64	0,60	0,59	0,503	V	V	0,44	0,44
0,0203	0,74	0,68	0,63	0,556	V	V	0,50	0,50
0,0255	0,9	0,78	0,79	0,622	V	V	0,57	0,57
0,0306	1,01	0,85	0,86	0,679	V	V	0,63	0,63

Tab. 4.4 Měřené hodnoty, frakce 0,009 m

Frakce 0,009 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym,s pr}$	$L_{d,us,s pr}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,014	0,45	0,52	0,43	0,46	V	V	0,38	0,38
0,0168	0,54	0,59	0,56	0,51	V	V	0,44	0,44
0,0208	0,6	0,68	0,61	0,56	V	V	0,50	0,50
0,0251	0,72	0,75	0,7	0,62	V	V	0,56	0,56
0,0311	0,86	0,83	0,84	0,68	V	V	0,64	0,64

Tab. 4.5 Měřené hodnoty, frakce 0,0125 m

Frakce 0,0125 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym, s pr}$	$L_{d,us, s pr.}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0131	0,36	0,51	0,37	0,45	V	V	0,36	0,36
0,015	0,45	0,56	0,47	0,48	V	V	0,42	0,42
0,0168	0,48	0,60	0,5	0,51	V	V	0,44	0,44
0,0208	0,58	0,67	0,58	0,56	V	V	0,50	0,50
0,0251	0,72	0,74	0,68	0,62	V	V	0,56	0,56
0,0311	0,82	0,81	0,78	0,68	V	V	0,64	0,64

Tab. 4.6 Měřené hodnoty, frakce 0,0175 m

Frakce 0,0175 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym, s pr}$	$L_{d,us, s pr.}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0131	0,32	0,54	0,35	0,45	0,27	V	0,30	0,36
0,015	0,4	0,59	0,43	0,48	V	V	0,42	0,42
0,0168	0,44	0,64	0,47	0,51	V	V	0,44	0,44
0,0208	0,51	0,73	0,52	0,56	V	V	0,50	0,50
0,0251	0,62	0,81	0,62	0,62	V	V	0,56	0,56
0,0311	0,76	0,90	0,74	0,68	V	V	0,64	0,64

Tab. 4.7 Měřené hodnoty, frakce 0,0225 m

Frakce 0,0225 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym, s pr}$	$L_{d,us, s pr.}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0131	0,28	0,54	0,34	0,45	0,2	V	0,23	0,37
0,015	0,32	0,59	0,37	0,48	0,28	V	0,30	0,39
0,0168	0,39	0,64	0,42	0,51	0,34	V	0,37	0,44
0,0208	0,49	0,73	0,52	0,56	0,41	V	0,44	0,49
0,0251	0,54	0,81	0,56	0,62	V	V	0,57	0,57
0,0311	0,64	0,90	0,64	0,68	V	V	0,62	0,62

Tab. 4.8 Měřené hodnoty, frakce 0,0275 m

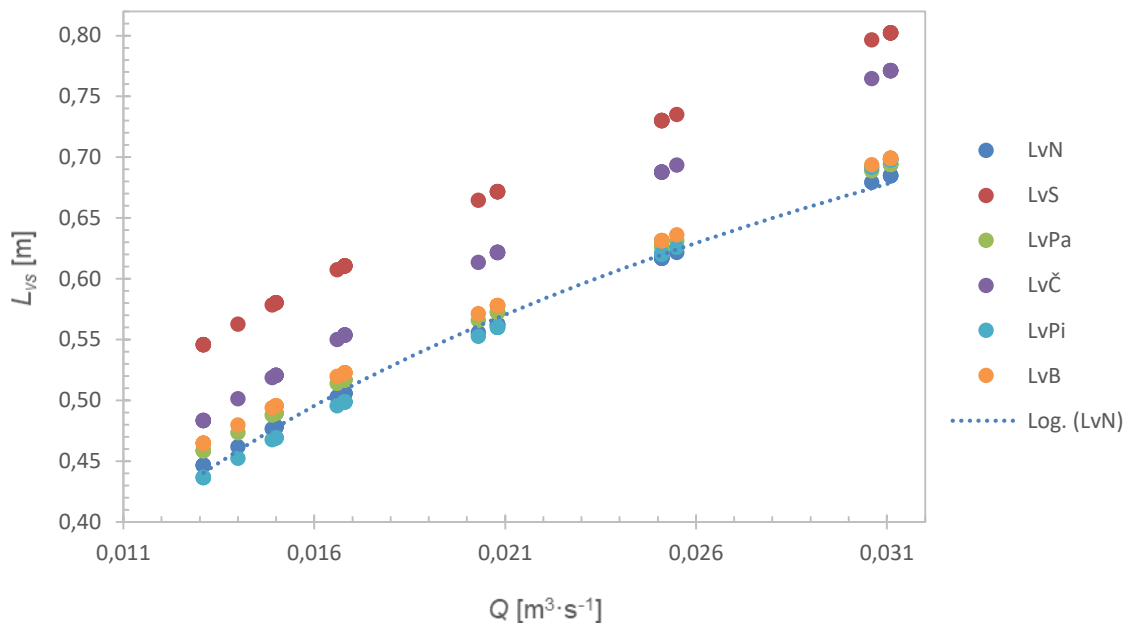
Frakce 0,0275 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym,s pr}$	$L_{d,us,s pr.}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0131	0,25	0,51	0,28	0,45	0,19	V	0,24	0,35
0,015	0,29	0,56	0,32	0,48	0,24	V	0,29	0,40
0,0168	0,33	0,60	0,36	0,51	0,29	V	0,34	0,44
0,0208	0,41	0,67	0,45	0,56	0,37	V	0,43	0,47
0,0251	0,48	0,74	0,5	0,62	0,43	V	0,47	0,55
0,0311	0,61	0,81	0,63	0,68	V	V	0,63	0,63

Tab. 4.9 Měřené hodnoty, frakce 0,043 m

Frakce 0,043 m					Vývar s vývarovým prahem			
Vývar bez vývarového prahu					Nastavení polohy vývarového prahu dle výpočtu délky VS podle Nováka			
Průtok	Délka vymletého úseku	Délka VS při usazování	Délka VS při vymílání	Výpočet délky VS dle Nováka	Délka vymleté části	Vzdálenost počátku usazování	Délka VS při vymílání	Délka VS při usazování
$Q$	$L_{d,v}$	$L_{vs,sp}$	$L_{vs,us}$	$L_{vs,N}$	$L_{d,vym,s pr}$	$L_{d,us,s pr.}$	$L_{vs,s pr,vym}$	$L_{vs,s pr,us}$
$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,0131	0,13	0,48	0,17	0,45	0,09	0,28	0,11	0,36
0,015	0,17	0,53	0,17	0,48	0,18	0,32	0,22	0,38
0,0168	0,19	0,57	0,2	0,51	0,23	V	0,25	0,42
0,0208	0,29	0,65	0,31	0,56	0,26	V	0,32	0,47
0,0251	0,4	0,71	0,41	0,62	0,38	V	0,43	0,53
0,0311	0,55	0,79	0,55	0,68	0,42	V	0,47	0,63

#### 4.5.1 Délka vodního skoku

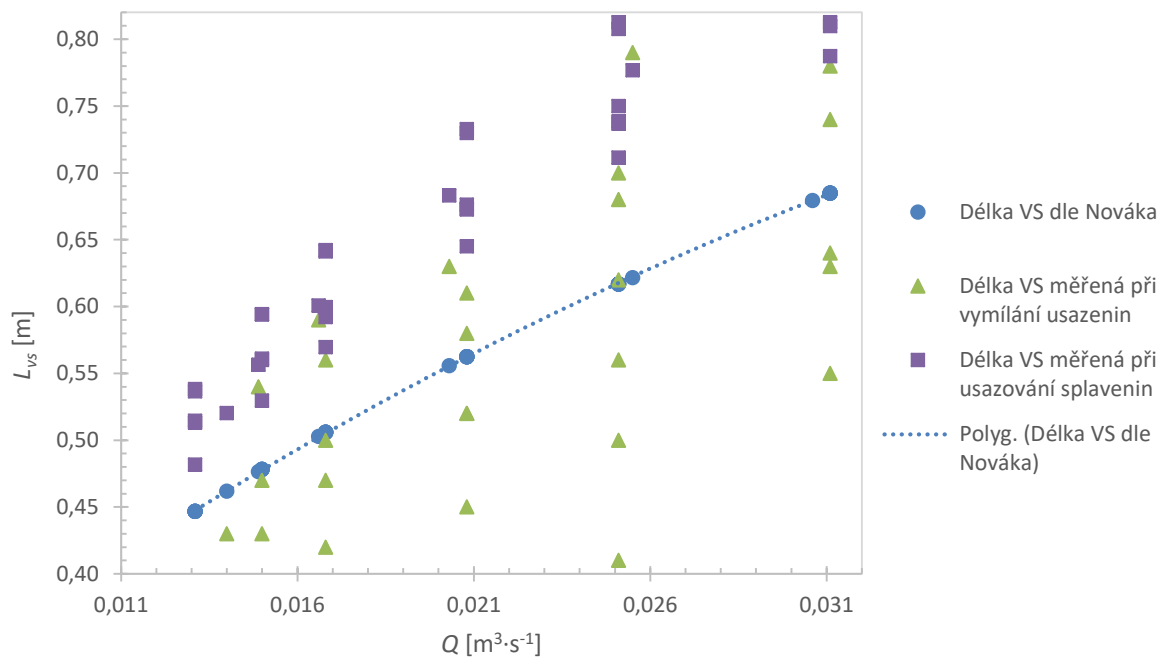
Výsledky vypočítané dle různých autorů se liší, v grafu (Obr. 4.16) je zřetelný rozptyl výsledné délky vodního skoku pro stejný průtok. Tyto hodnoty jsou pro vývar bez vývarového prahu. Při srovnání s ostatními autory je délka vodního skoku podle Nováka, je proto nutné před samotným návrhem či posouzením konstrukce vybrat vhodnou metodu výpočtu a rovnici nejlépe se hodící danému typu vodního skoku.



Obr. 4.16 Porovnání délek vodního skoku bez zahloubení vývaru vypočítaných dle rovnic vybraných autorů

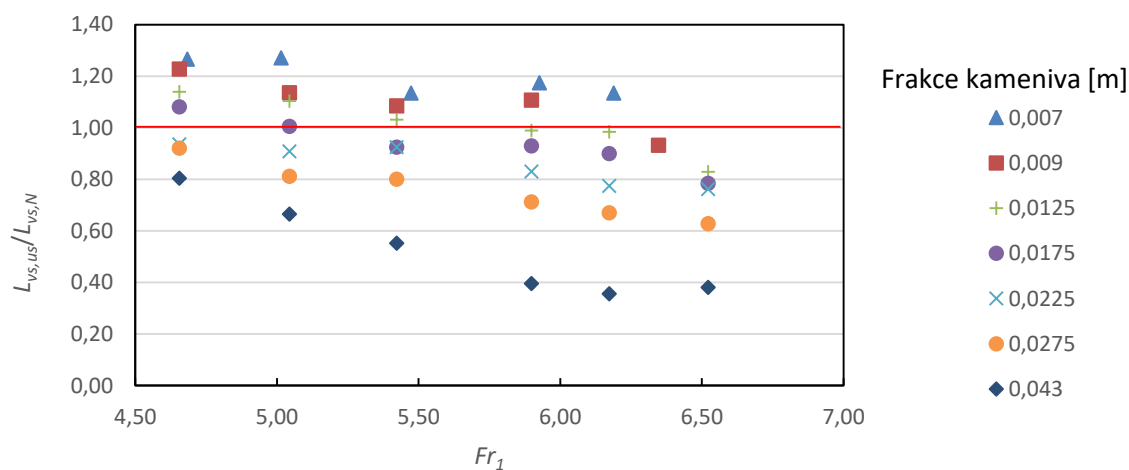
V porovnání s ostatními metodami výpočtu délky vodního skoku vychází zvolená metoda dle Nováka jako ta s menší hodnotou. Od ostatních autorů se odlišuje až o 15 %, této hodnotě by odpovídalo pulzování vodního skoku, které komplikuje jak přesný výpočet délky vodního skoku, tak i měření v laboratořích. Hodnota pulzace by mohla dosahovat až 20 % délky vývaru [2].

V první části experimentu měření délky zanášení a vymílání byla měřena i délka vodního skoku, jak je vyobrazeno na Obr. 4.17.



Obr. 4.17 Porovnání vypočtené a měřené délky vodního skoku bez zahloubení

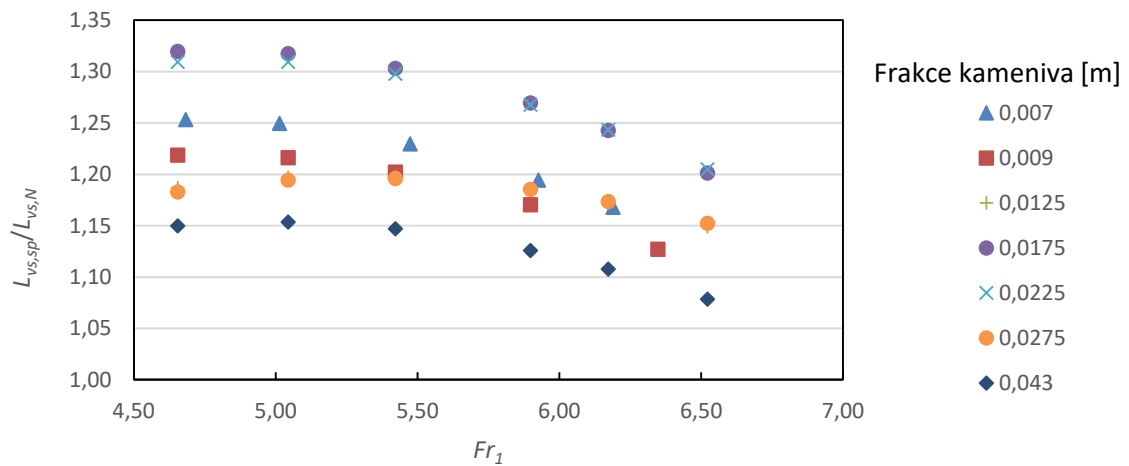
Z Obr. 4.17 je patrný vliv splavenin při vymílání, kdy nedojde k vyčištění vývaru. Délka vodního skoku se zkracuje. U splavenin je výhoda v kinetické energii, kterou obdržely překonáním jezu, a tak se naopak délka vodního skoku prodlužuje.



Obr. 4.18 Vztah podílu délek vodního skoku ku Froudovu číslu pro nezahloubený vývar při vymílání

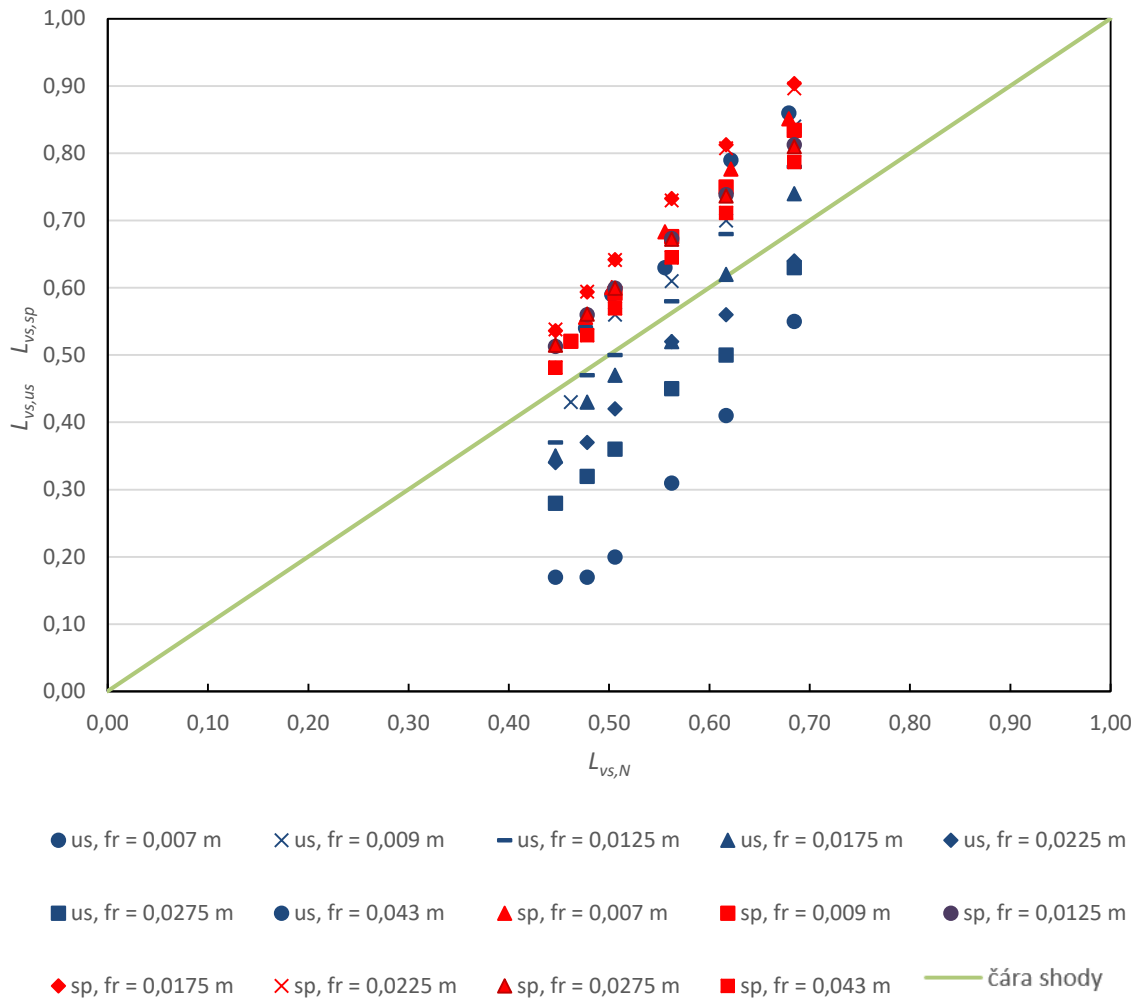
V grafu na Obr. 4.18 je na horizontální ose Froudovo číslo pro profil 1, na vertikální ose je poměr měřené délky vymílání usazenin z prostoru vývaru. Body pod hodnotou 1 reprezentují menší délku vodního skoku než je vypočtená dle Nováka. Jedná se o větší frakce kameniva, kdy nebyl proud dost silný, aby je dokázal vymlet až k místu druhé vzájemné hloubky. Tímto se čelo usazenin přetvořilo na vývarový práh a zkrátila se délka vodního skoku. Pro body nad hodnotou 1 naopak platí, že proud vody byl natolik silný, že kamenivo odnesl dál, než je vypočtená hodnota dle Nováka.





Obr. 4.19 Vztah podílu délek vodního skoku ku Froudovu číslu pro nezahloubený vývar při zanášení

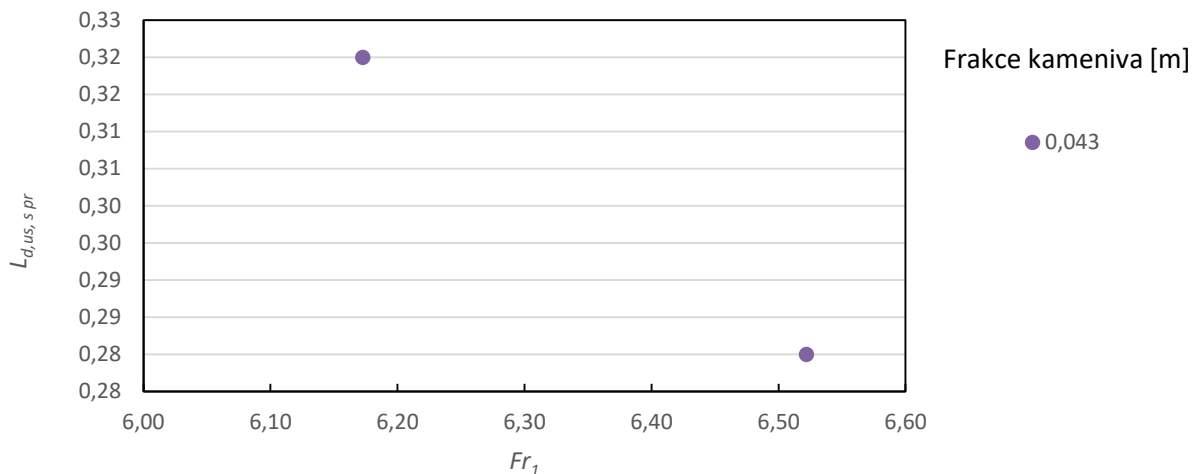
V grafu na Obr. 4.19 je na horizontální ose Froudovo číslo pro profil 1, na vertikální ose je poměr měřené délky začátku usazování splavenin ve vývaru či za ním. V oblasti myšleného vývaru se neusadily žádné usazeniny. Všechny splaveniny byly usazeny až za vývarem. Vzhledem k rozdílu délky vodního skoku vypočteného dle Nováka a změřeného by bylo možné délku vývaru zvětšit pro vyšší bezpečnost.



Obr. 4.20 Závislost délek vodního skoku měřených k délce vypočtené dle Nováka pro nezahluobený vývar

#### 4.5.2 Délka nezanesení vývaru dnovými splaveninami

Při nastavení prahu do vzdálenosti vypočítané délky vodního skoku dle Nováka, došlo k usazení splavenin ve vývaru jen ve 2 případech ze 40 měření. Při frakci kameniva 0,043 m a průtoku 0,0131 m<sup>3</sup>/s a 0,015 m<sup>3</sup>/s.

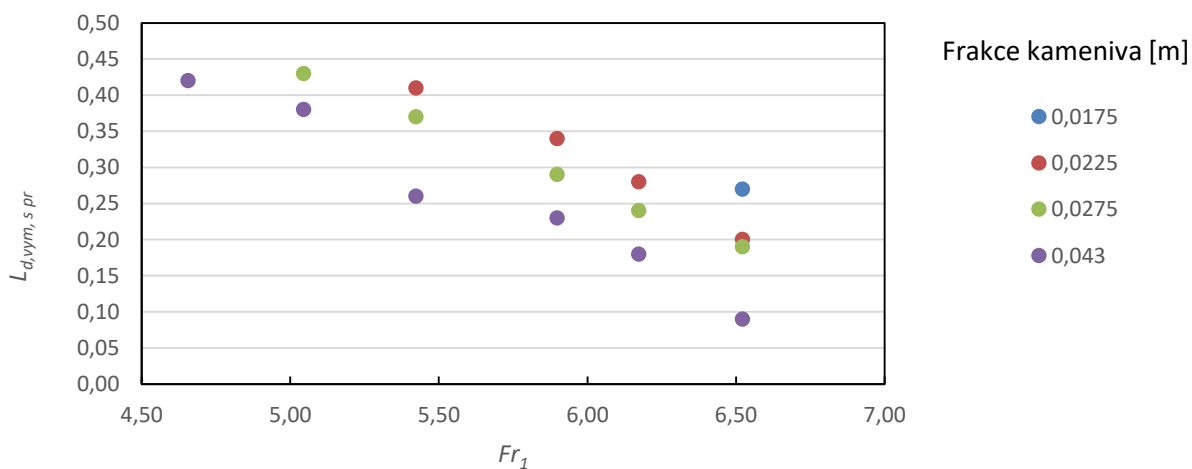


Obr. 4.21 Závislost délky zanášení úseku na Froudovu číslu

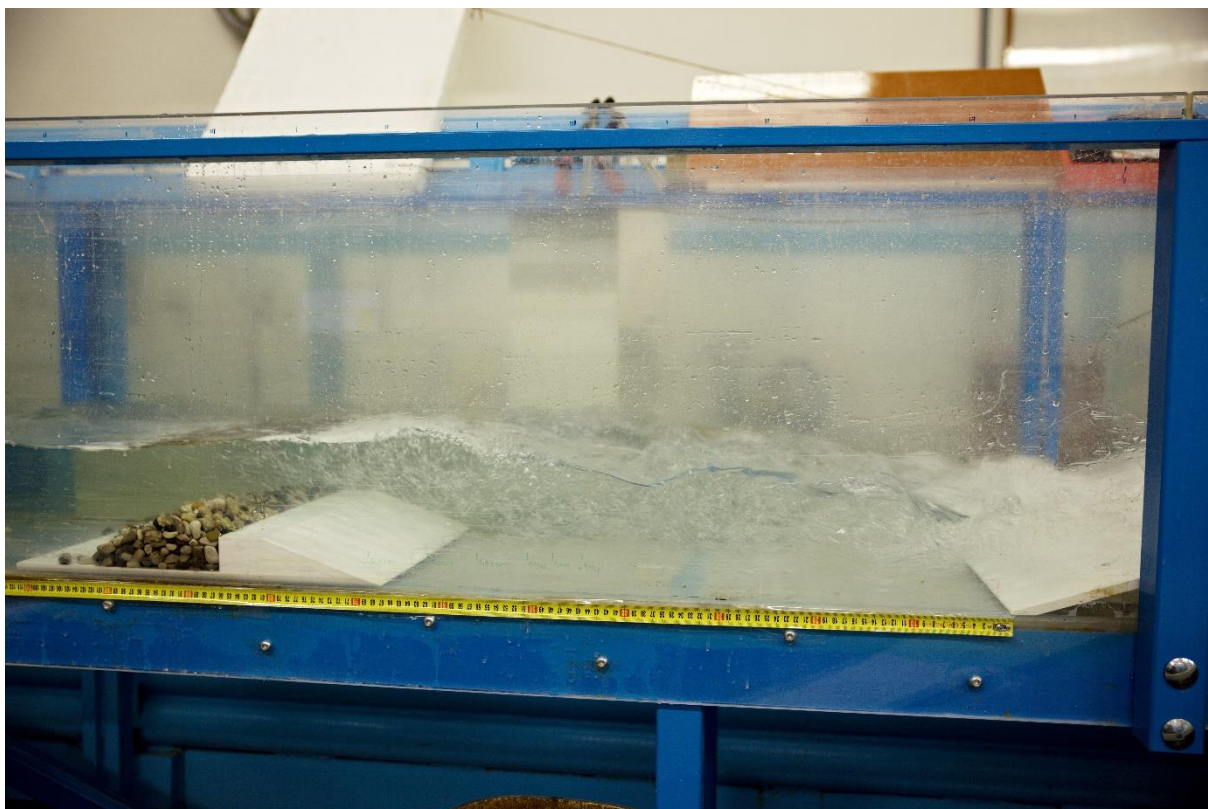
Bohužel při tak nízkém množství hodnot není možné provést odpovídající vyhodnocení, které by bylo dostatečné.

#### 4.5.3 Délka vymletí usazenin ve vývaru

Usazeniny mají vyšší hodnotu kritického bezrozměrného napětí, z toho důvodu (oproti splaveninám) nedošlo k vyčištění vývaru a je možné porovnat délky vymletí ku Froudovu číslu v profilu 1.



Obr. 4.22 Závislost délky vymletého úseku na Froudovu číslu



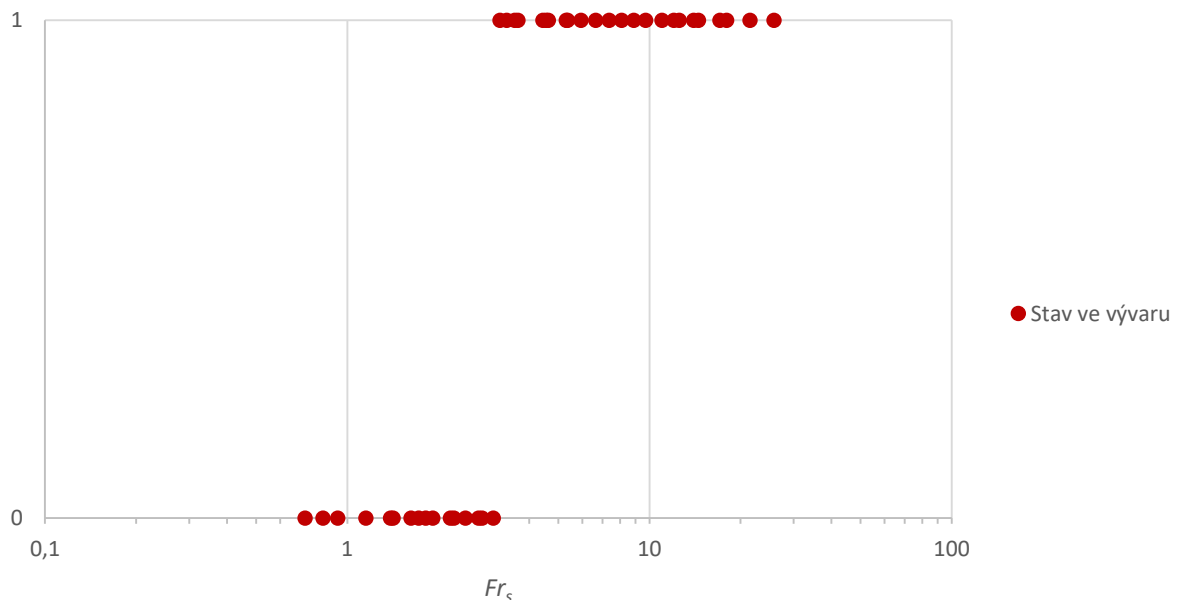
Obr. 4.23 Ukázka vyčištěného vývaru

## 5 Výsledky a doporučení pro posouzení

Experimentální výzkum ukázal, při kterém průtoku došlo k usazení splavenin, či vymletí usazenin z prostoru vývaru. Pro prezentaci výsledků byl zvolen vztah, vztažený k profilu 1 v místě první vzájemné hloubky a nastavení polohy vývarového prahu dle Nováka. Profil 1 je výhodný z důvodu neměnné polohy a snadného výpočtu první vzájemné hloubky. Oproti tomu Profil 2 mění svou polohu pro každé nastavení průtoku a je hůře uchopitelný. Profil U a D necharakterizují vodní skok.

### 5.1 Vyčištění vývaru od usazenin

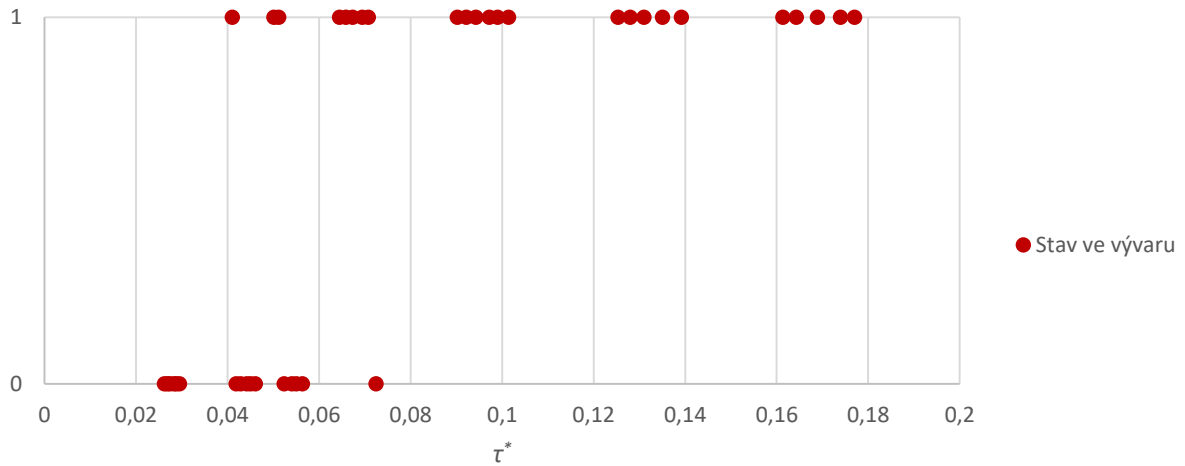
Z grafu na Obr 5.1 je patrné při jaké hodnotě densimetrického Frouдова čísla došlo k vymletí částic (vyčištění vývaru) s vývarovým prahem. Hodnota na svislé ose vyjadřuje stav vývaru, pro zanesený vývar nabývá hodnoty 0 a pro vyčištěný vývar 1.



Obr. 5.1 Graf vyjadřující stav vývaru v závislosti na hodnotě densimetrického Frouдова čísla

Z grafu je patrný ostrý přechod z vývaru zaneseného k vývaru vyčištěnému, tento přechod je v hodnotě Frouдова čísla  $Fr_s = 3$ , která charakterizuje kritickou hodnotu pro vymílání. Demonstruje to přesnost měření a vhodně zvolený způsob vyhodnocení.

Z grafu na Obr. 5.2 je patrné při jaké hodnotě bezrozměrného smykového napětí došlo k vymílání (vyčištění vývaru). Hodnota na svislé ose zastupuje stav vývaru, pro zanesený vývar nabývá hodnoty 0 a pro vyčištěný nabývá hodnoty 1.

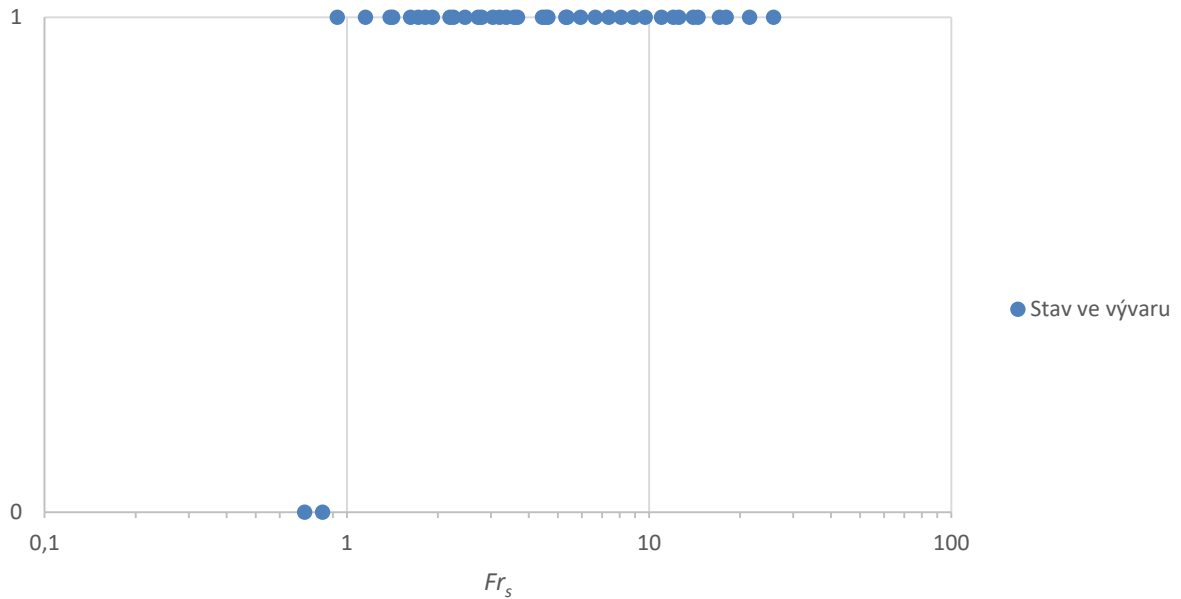


Obr. 5.2 Graf vyjadřující stav vývaru v závislosti na bezrozměrném smykovém napětí na dně

Průběh vyčištění vývaru od usazenin je při vztažení k bezrozměrnému smykovému napětí relativně neostrý. Pravděpodobně je to způsobeno různými frakcemi kameniva. Kritická hodnota by se dala učit přibližně  $\tau^* = 0,055$ , tato hodnota koresponduje s vypočtenou kritickou hodnotou pro vnitřní úhel tření  $40^\circ$ .

## 5.2 Zanešení vývaru dnovými splaveninami

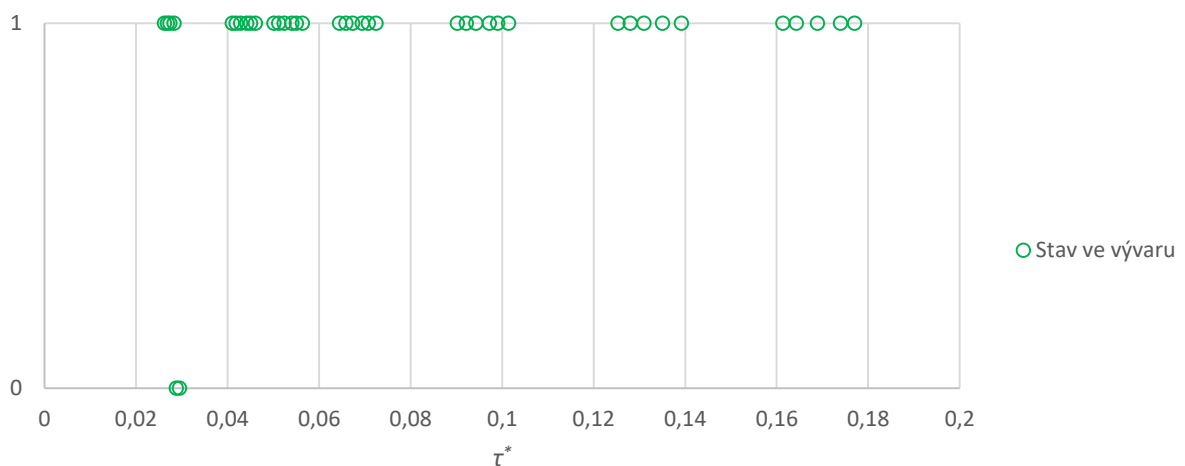
Z grafu na Obr. 5.3 je patrné při jaké hodnotě densimetrického Froudova čísla došlo k usazování částic (zanášení vývaru) s vývarovým prahem. Hodnota na svislé ose vyjadřuje stav vývaru, pro zanesený vývar nabývá hodnoty 0 a pro vyčištěný nabývá hodnoty 1.



Obr. 5.3 Závislost usazování splavenin na densimetrickém Froudově čísle

K usazování splavenin došlo při hodnotě densimetrického Froudova čísla  $Fr_s = 0,9$ .

Při nastavení vzdálenosti vývarového prahu podle Nováka, by nemělo docházet k usazování dnových splavenin ve vývaru. V grafu Obr. 5.4 je vztah počátku zanášení, vodorovná osa reprezentuje průtok a svislá stav ve vývaru, 1 zastupuje stav, kdy se splaveniny ve vývaru neusadí a pokračují dále za vývar. 0 zastupuje stavy, kdy se usazeniny ve vývaru začaly usazovat.



Obr. 5.4 Závislost usazování splavenin na bezrozměrném smykovém napětí

K zanesení vývaru došlo při hodnotě bezrozměrného smykového napětí  $\tau_{cp}^* = 0,03$ .

### 5.3 Doporučený postupu pro posouzení zanášení vývarů

Pro posouzení zanášení půdorysně přímých vývarů obdélníkového příčného průřezu dnovými splaveninami je pro neprovzdušněný proud nejvhodnější bezrozměrné smykové napětí. Jako vhodný vztažný profil se jeví profil 1 s první vzájemnou hloubkou. Z dat snadno získaných, jako je průtok, šířka průřezu a hloubka se rovnicí (3.16) vypočteme první vzájemná hloubka. Z ní se rovnicí (3.23) vypočítá bezrozměrné smykové napětí. Z důvodu rozdílné velikosti uhlu vnitřního tření pro splaveniny a usazeniny je nutné určit pro každou skupinu kritickou hodnotu bezrozměrného smykového napětí odděleně. K uvedení usazenin do pohybu je potřeba větší energie než pro usazení částice (splaveniny) pohybující se tokem. Tyto hodnoty se použijí jako limity pro posouzení.

Rovnice (3.26) popisuje bezrozměrné smykové napětí při pohybu splavenin, je vyjádřen bezrozměrným smykovým napětím na povrchu (3.25). Bezrozměrná velikost částice (3.27) je závislá na objemové hmotnosti splavenin a velikosti částice. Počátek pohybu je poté vypočten rovnicí (3.28), pro který se z uhlu vnitřního tření pro plně turbulentní proudění vypočítá příslušné bezrozměrné smykové napětí (3.29).

Další možnou srovnávací veličinou vhodnou pro provzdušněný proud je densimetrické (hustotně vyjádřené) Froudovo číslo, které se vypočte z rovnice (3.31) v závislosti na velikosti částice, z experimentálního výzkumu je stanovena kritická hodnota pro počátek pohybu splavenin (3.32). Pro posouzení zanášení vývaru je poté vyjádřeno nerovnostmi (3.33) a (3.34), kdy je na stranu bezpečnosti přidán stupeň bezpečnosti pro odolnost povrchu. Zdali dojde k pohybu splavenin je vyjádřeno nerovnostmi (3.35 až 3.39), které je ovlivňováno vztahy bezrozměrného smykového napětí v daných profilech a jeho kritické hodnoty.



## 6 Závěr a zhodnocení

Cílem práce bylo stanovení postupu pro posouzení zanášení půdorysně přímých vývarů obdélníkového příčného průřezu dnovými splaveninami. Vzhledem k velikosti problematiky byl vybrán stav pro půdorysně přímý zahloubený i nezahloubený vývar při vzniku vzdutého vodního skoku s mírou vzdutí 1,05. Pro tento případ byla popsána teorie jejich návrhů a vhodné metody výpočtu. Dále bylo definováno bezrozměrné smykové napětí a densimetrické Froudovo číslo, pro každou veličinu byla nalezena kritická hodnota, při které dochází k pohybu splavenin či usazování.

Provedený experimentální výzkum umožnil stanovit hodnoty kritického bezrozměrného smykového napětí a kritického densimetrického Froudova čísla pro vymílání i zanášení.

Výsledky byly shrnuty do doporučení pro posouzení zanášení vývarů při výše specifikovaném stavu. Pro další experimentální měření by bylo vhodné zvýšit počet frakcí kameniva a zkoušet pro větší rozsah průtoků. Je důležité najít hranici, kdy nedochází k usazení a druhou hranici, kdy dojde k usazení splavenin v místě první vzájemné hloubky.

Jsem přesvědčen, že tato problematika by měla být dále řešena a mohla by vést k nalezení vhodné metody určení bezrozměrného smykového napětí a tím lepší pochopení chování splavenin při přechodu přes jezovou konstrukci a případnou sedimentaci ve vývaru. Problematika zanášení na vodních tocích je v naší zemi aktuální a nalezení způsobu jak navrhnout a manipulovat s jezovou konstrukcí tak aby nedocházelo jak v zanášení vývaru, tak případnému vymílání za patou vývaru.

Přínosem pro posouzení zanášení vývarů by bylo stanovení zanášení s kontinuálním přítokem splavenin a hledáním ustáleného stavu mezi usazováním splavenin a vymíláním usazenin. Další obtížnější možností (o to bližší reálným podmínkám) by bylo používat nestejnوزrnné materiály a sledovat jaké budou probíhat interakce mezi jednotlivými frakcemi ve vývaru. Uvedené je ovšem obtížné pro kvantifikování bezrozměrné velikosti částice a určení kritických hodnot pro zanášení a vymílání.

Při nesprávné údržbě či návrhu vývarové konstrukce může dojít k vytvoření oddáleného vodního skoku, který by mohl poškodit koryto za vývarem. Na druhou stranu je nutné zachovat tok splavenin rovnoměrný, aby nedocházelo k vymílání dolního koryta hladovou vodou.

Věřím, že tato práce bude podkladem k dalšímu výzkumu a její výsledky budou použity při výuce, či praktických demonstrací chování splavenin a usazenin ve vývaru.

## 7 Seznamy

### 7.1 Seznam zdrojů

- [1] AFZAL, N. a BURSHRA, A. Structure of the turbulent hydraulic jump in a trapezoidal channel. *J. Hydraul. Res.*, 40(2), 2002, 205–214.
- [2] BOOR, Boris, Cyril PATOČKA a Jiří KUNŠTÁTSKÝ. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: Celostátní učebnice pro vysoké školy*. Praha: SNTL, 1968.
- [3] CABRERA, Enrique. *Water Engineering and Management through Time: Learning from History*. CRC Press. 2010. ISBN 0415480027.
- [4] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [5] JANDORA, Jan, UHMANNOVÁ, Hana. *Proudění v systémech říčních koryt - studijní opora*. FAST VUT v Brně, 2007.
- [6] KOVÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. Praha: SNTL/Alfa, 1983.
- [7] MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA. *Hydrotechnické stavby 1: navrhování jezů*. Vyd. 2., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04309-7.
- [8] PETERKA, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Denver: USDI, 1984.
- [9] RAPLÍK, Milan; VÝBORA, Pavel; MAREŠ, Karel. *Úprava tokov*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1989. 640 s. ISBN 80-05-00128-2
- [10] TLAPÁK, Václav a Jaroslav HERÝNEK. *Malé vodní nádrže*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 80-7157-635-2.
- [11] VOTRUBA, Ladislav, Vojtěch BROŽA a Ivo KAZDA. *Přehrady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1978.
- [12] ZACHOVAL, Zbyněk. *Splaveniny ve vodních tocích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016.

### 7.2 Seznam zkratk

- N Nedošlo k vytvoření vodního skoku
- V Vyčištěný vývar

## 7.3 Seznam veličin

### 7.3.1 Latinská označení

$B$	[m]	šířka obdélníkového koryta
$b$	[m]	šířka žlabu
$C$	[-]	součinitel průtoku
$d$	[m]	zahloubení vývaru
$d^*$	[m]	bezrozměrná velikost částice
$E_1$	[m]	energetická výška v profilu $h_1$
$E_2$	[m]	energetická výška v profilu $h_2$
$E_n$	[m]	ztrátová energetická výška
$Fr$	[-]	Froudovo číslo (kritérium)
$Fr_1$	[-]	Froudova číslo (kritérium) v profilu 1
$Fr_\Delta$	[-]	densimetrické Froudovo číslo (kritérium)
$Fr_{\Delta c}$	[-]	kritická hodnota densimetrického Froudova čísla (kritéria)
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$h_D$	[m]	energetická přepadová výška
$h_1$	[m]	první vzájemná hloubka
$h_2$	[m]	druhá vzájemná hloubka
$h_d$	[m]	hloubka dolní vody
$h_e$	[m]	koncová hloubka - vypočtená
$h_e^*$	[m]	koncová hloubka - měřená
$h_k$	[m]	kritická hloubka
$h_s$	[m]	výška vodního skoku
$h_z$	[m]	ztrátová výška
$i$	[-]	podélný sklon dna
$i_k$	[-]	kritický sklon dna
$K$	[-]	součinitel pro výpočet vodního skoku dle Nováka
$l$	[m]	délka skloněné části jezu
$L_{d,us,s pr.}$	[m]	vzdálenost počátku usazování s prahem
$L_{d,v}$	[m]	délka vymletého úseku
$L_{d,vym,s pr}$	[m]	délka vymleté části s prahem
$L_{us}$	[m]	délka usazení
$L_v$	[m]	délka vymletí

---

$L_{vs,B}$	[m]	délka vodního skoku podle Boora
$L_{vs,Č}$	[m]	délka vodního skoku podle Čertousova
$L_{vs,N}$	[m]	délka vodního skoku podle Nováka
$L_{vs,Pa}$	[m]	délka vodního skoku podle Pavlovského
$L_{vs,Pl}$	[m]	délka vodního skoku podle Pikalova
$L_{vs,s,pr,us}$	[m]	délka VS při usazování s prahem
$L_{vs,s,pr,vym}$	[m]	délka VS při vymílání s prahem
$L_{vs,S}$	[m]	délka vodního skoku podle Smetany
$L_{vs,sp}$	[m]	délka VS při usazování
$L_{vs,us}$	[m]	délka VS při vymílání
$n$	[-]	součinitel drsnosti
$q$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	specifický průtok
$Q$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	průtok
$Re_{*d}$	[-]	Reynoldsovo číslo (kritérium)
$s$	[m]	výška jezové konstrukce
$SF$	[-]	stupeň bezpečnosti
$T$	[°C]	teplota
$u^*$	[m·s <sup>-1</sup> ]	třecí rychlost na dně
$v_1$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost v profilu 1
$v_2$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost v profilu 2
$v_D$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost v profilu D
$v_n$	[m·s <sup>-1</sup> ]	nevymílací (průřezová) rychlost
$v_v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	nezanášecí (průřezová) rychlost
$y$	[m]	navýšení šikmého vývarového prahu oproti dnu pod jezem

### 7.3.2 Řecká označení

$\alpha$	[-]	Coriolisovo číslo
$\beta$	[-]	Boussinesqovo číslo
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vody
$\rho_s$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota částic
$\sigma$	[-]	součinitel zatopení (míra zatopení)
$\tau^*$	[-]	bezrozměrné smykové napětí na povrchu
$\tau_{*c}^*$	[-]	kritická hodnota bezrozměrného smykového napětí
$\tau_{*c1}^*$	[-]	kritická hodnota bezrozměrného smykového napětí v profilu 1
$\tau_{*\varphi}^*$	[-]	bezrozměrné smykové napětí pro příslušný úhel vnitřního tření
$\tau_d$	[-]	smykové napětí na dně
$\varphi$	[-]	rychlostní součinitel
$\varphi$	[-]	úhel vnitřního tření
$\varphi_d$	[-]	dynamický úhel tření
$\varphi_v$	[-]	úhel vnějšího tření

## 7.4 Seznam obrázků

Obr. 1.1 Zanesený vývar, jez Vyšší Lhoty (Tureček).....	1
Obr. 3.1 Prostý vodní skok.....	3
Obr. 3.2 Členění vodního skoku podle podmínek vzniku: a) prostý, b) vlnovitý, c) povrchový .....	4
Obr. 3.3 Polohy vodního skoku: a) oddálený, b) přilehlý, c) vzdutý.....	5
Obr. 3.4 Druhy vodního skoku vzhledem poloze stavidla: a) oddálený, b) přilehlý, c) vzdutý.....	5
Obr. 3.5 Schéma k výpočtu vodního skoku.....	6
Obr. 3.6 Vliv drsnosti povrchu na velikost hodnotu vzájemných délek [1] .....	9
Obr. 3.7 Vliv drsnosti povrchu na délku vodního skoku Afzal a kol. [1] .....	10
Obr. 3.8 Úprava prahu vývaru: a) svislý, b) stupňovitý, c) šikmý .....	12
Obr. 3.9 Schéma zahloubení vývaru.....	13
Obr. 3.10 Shieldsův graf pro vybraný typ částic a způsob určení počátku pohybu [12] .....	17
Obr. 3.11 Počátek pohybu splavenin vyjádřený závislostí $\tau^*$ na $d^*$ [12] .....	18
Obr. 3.12 Schéma umístění profilů.....	20
Obr. 4.1 Měrný žlab .....	21
Obr. 4.2 Zatížení konstrukce vestavby .....	22
Obr. 4.3 Svislá část návodního líce vestavby.....	22
Obr. 4.4 Přelivná plocha.....	23
Obr. 4.5 Kamenná rovnanina .....	24
Obr. 4.6 Řez vývarovým prahem.....	24
Obr. 4.7 Ukázka kotvení prahu.....	25
Obr. 4.8 Ukázka ochrany horní části prahu před nadzvednutím .....	25
Obr. 4.9 Frakce použitého kameniva.....	27
Obr. 4.10 Měření koncové hloubky $h_e$ .....	28
Obr. 4.11 Měření délek vymletí $L_v$ a usazení $L_{us}$ .....	29
Obr. 4.12 Měření hloubky dolní vody $h_d$ .....	29
Obr. 4.13 Limit použitelnosti modelu.....	30
Obr. 4.14 Shoda mezi měřenou a vypočtenou hodnotou koncové délky .....	31
Obr. 4.15 Ukázka kameniva - usazenin ve vývaru.....	33
Obr. 4.16 Porovnání délek vodního skoku bez zahloubení vývaru vypočítaných dle rovnic vybraných autorů.....	37
Obr. 4.17 Porovnání vypočtené a měřené délky vodního skoku bez zahloubení .....	38

Obr. 4.18 Vztah podílu délek vodního skoku ku Froudovu číslu pro nezahlužený vývar při vymílání .....	38
Obr. 4.19 Vztah podílu délek vodního skoku ku Froudovu číslu pro nezahlužený vývar při zanášení .....	39
Obr. 4.20 Závislost délek vodního skoku měřených k délce vypočtené dle Nováka pro nezahlužený vývar.....	40
Obr. 4.21 Závislost délky zanášení úseku na Froudovu číslu.....	41
Obr. 4.22 Závislost délky vymletého úseku na Froudovu číslu.....	41
Obr. 4.23 Ukázka vyčištěného vývaru .....	42
Obr. 5.1 Graf vyjadřující stav vývaru v závislosti na hodnotě densimetrického Froudova čísla .....	43
Obr. 5.2 Graf vyjadřující stav vývaru v závislosti na bezrozměrném smykovém napětí na dně .....	44
Obr. 5.3 Závislost usazování splavenin na densimetrickém Froudově čísle.....	45
Obr. 5.4 Závislost usazování splavenin na bezrozměrném smykovém napětí.....	45

## 7.5 Seznam tabulek

Tab. 3.1 Hodnoty $K$ pro výpočet délky vodního skoku podle Nováka.....	7
Tab. 4.1 Použité frakce kameniva .....	26
Tab. 4.2 Tabulka vstupních hodnot .....	31
Tab. 4.3 Měřené hodnoty, frakce 0,007 m.....	34
Tab. 4.4 Měřené hodnoty, frakce 0,009 m .....	34
Tab. 4.5 Měřené hodnoty, frakce 0,0125 m.....	35
Tab. 4.6 Měřené hodnoty, frakce 0,0175 m .....	35
Tab. 4.7 Měřené hodnoty, frakce 0,0225 m .....	35
Tab. 4.8 Měřené hodnoty, frakce 0,0275 m .....	36
Tab. 4.9 Měřené hodnoty, frakce 0,043 m.....	36