VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES


# VYHODNOCENÍ HYDRODYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ PŘELÉVANÉ MOSTOVKY

EVALUATION OF HYDRODINAMIC LOAD ON A BRDGE DECK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS


AUTOR PRÁCE — Bc. Jindřich Řezník
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MIROSLAV ŠPANO, Ph.D.
SUPERVISOR


BRNO 2018

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
# FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|---|---|
| **Studijní program** | N3607 Stavební inženýrství |
| **Typ studijního programu** | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| **Studijní obor** | 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby |
| **Pracoviště** | Ústav vodních staveb |

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|---|---|
| **Student** | Bc. Jindřich Řezník |
| **Název** | Vyhodnocení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky |
| **Vedoucí práce** | Ing. Miroslav Špano, Ph.D. |
| **Datum zadání** | 31. 3. 2017 |
| **Datum odevzdání** | 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

Boor,B., Kunštácký,J., Patočka,C. (1968) Hydraulika pro vodohospodářské stavby, SNTL Praha.
ČSN 73 6201. Projektování mostních objektů, 2008.
ČSN 75 2130. Křížení a souběhy vodních toků s dráhami, pozemními komunikacemi a vedeními, 2012.
TP 204. Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích – Technické podmínky, 2009.
Bradley, J., B., Richards, D., L., Bahner, C., D. Debris Control Structures Evaluation and Countermeasures, Hydraulic Engineering Circular No. 9 Third edition, Office of Bridge Technology FHWA, 2005.
Hamil L. Bridge Hydraulics, School of Civil and Structural Engineering, University of Plymouth, 1999.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce bude přehledně členěna do kapitol úvod a cíle práce, teoretický popis problému, praktická aplikace, výsledky a závěr.

## 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).

Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Předmětem této práce je vyhodnocení hydrodynamického zatížení na fyzikálním modelu mostovky, především stanovení vztahu mezi mediánem a krajními kvantily jednotlivých složek hydrodynamického zatížení a posouzení vlivu tvaru mostovky na velikost tohoto zatížení. Zjištěné vztahy mohou být použity k určení návrhových hodnot zatížení od proudící vody, například při návrhu uložení mostovky na podpěrách.

## KLÍČOVÁ SLOVA

most, mostovka, hydrodynamické zatížení, laboratorní model, fyzikální model, tlaková síla, vztlaková síla, silový moment, tvar mostovky, hloubka, median, kvantil, voda, podobnost

## ABSTRACT

The subject of this thesis is the evaluation of hydrodinamic load on a physical model of a bridge deck, especially to find the relation between the median and extreme quantiles of each hydrodanamic load part and to evaluate the influence, which has the shape of the bridge deck on the size of this load. Relations, that was found may be used to determine characteristic values of loads, caused by water flow, for example, when designing the bridge bearings.

## KEYWORDS

bridge, bridge deck, hydrodinamical load, laboratory model, phycsical model, pressure force, buoyancy force, moment, shape of bridge deck, depth, median, quantile, water, similarity

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

ŘEZNÍK, Jindřich. *Vyhodnocení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky*. Brno, 2018. 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 9. 1. 2018

Bc. Jindřich Řezník
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Španovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

V Brně dne 9. 1. 2018

Bc. Jindřich Řezník
autor práce

# OBSAH

**1 Úvod a cíle práce** **9**

**2 Teoretická část** **11**

2.1 Hydraulika mostních objektů . . . . . 11

2.1.1 Proudění mostním otvorem o volné hladině . . . . . 12

2.1.2 Proudění pří kontaktu hladiny s konstrukcí mostovky . . . . . 15

2.1.3 Proudění s přelévanou mostovkou . . . . . 19

2.2 Hydrodynamické zatížení přelévané mostovky . . . . . 21

2.3 Mechanická podobnost v hydraulice . . . . . 25

2.3.1 Geoemtrická podobnost . . . . . 26

2.3.2 Kinematická podobnost . . . . . 27

2.3.3 Dynamická podobnost . . . . . 27

2.4 Popisná statistika . . . . . 30

**3 Vyhodnocení hydraulického zatížení přelévané mostovky na fyzikálním modelu** **32**

3.1 Popis zkušební trati a fyzikálního modelu . . . . . 32

3.2 Použitá měřící technika . . . . . 32

3.3 Kalibrace . . . . . 34

3.4 Postup měření . . . . . 35

3.5 Postup vyhodnocení výsledků . . . . . 36

3.6 Porovnání vlivu tvaru mostovky na jednotlivé veličiny . . . . . 39

3.6.1 Horizontální síla $F_x$ . . . . . 39

3.6.2 Vertikální síla $F_y$ . . . . . 42

3.6.3 Moment $M$ . . . . . 45

3.6.4 Rozdíl hloubek před a za modelem $\Delta H$ . . . . . 48

3.7 Vyhodnocení hydrodynamického zatížení po úpravě podobnostními čísly . . . . . 51

3.7.1 Horizontální síla $F_x$ . . . . . 51

3.7.2 Vertikální síla $F_y$ . . . . . 55

3.7.3 Moment $M$ . . . . . 59

3.7.4 Rozdíl hloubek před a za modelem $\Delta H$ . . . . . 63

**4 Závěr** **67**

**Literatura** **69**

**Seznam symbolů, veličin a zkratek** **71**

# 1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Podle ČSN EN 1990 je návrhová životnost mostů sto let. Za dobu své existence musejí odolat celé řadě extrémních zatížení spojených například s výskytem extrémních srážek způsobujících povodně nebo nárazy různých dopravních prostředků.

Tato práce se zabývá vyhodnocením hydrodynamického zatížení přelévané mostovky, to je způsobeno prouděním vody kolem konstrukce mostovky. Stanovení velikosti hydrodynamického zatížení je důležité především pro bezpečný a spolehlivý návrh mostního objektu[1].

Zkušenosti z posledních dvou dekád ukazují [2], že při zvýšených povodňových průtocích může nastat situace, kdy se hladina vody dotyká konstrukce mostovky, nebo je mostovka dokonce přelévána. Tato situace může nastat především na menších tocích, kde kapacita mostního otvoru nebývá často dostatečná.

Mosty se běžně jako přelévané nenavrhují, norma [1] požaduje při návrhu nového mostu dodržení minimální volné výšky nad NH[2] a KNH[3], stanovené podle návrhové kategorie mostu. Dříve se mosty navrhovaly na NP[4], ovšem po poslední úpravě normy [1] z roku 2008 se požadavky na návrhy mostů z hlediska převádění povodňových průtoku zvýšily a to především zvětšením NP a zavedením KNP[5]. NP je určen dobou opakování 20 až 100 let, dle návrhové kategorie mostu a KNP je dán jako 1~1,5 násobek NP. Také hydrologická data nejsou konstantní a v posledních letech se hodnoty N-letých průtoků na mnoha tocích zvýšily. Z toho důvodu mosty, které dříve z hlediska kapacity vyhovovaly, dnes již nevyhovují a je potřeba přistoupit k opatřením na zvětšení jejich průtočného profilu.

Dle [1], pokud není možné upravit niveletu dráhy, nebo pozemní komunikace, je možné navrhnout mostní objekt tak, aby nebyla zmenšena jeho stávající kapacita. Je ale nutné, stanovit průběh hladiny při průchodu kulminačního povodňového průtoku a velikost vzdutí způsobené mostovkou na vodohospodářské objekty, pozemky a stavby v ovlivněném úseku toku nad mostem. Dále je nutné omezit účinky hydrodynamického zatížení přelévané mostovky pomocí vhodného konstrukčního a tvarového řešení mostu.

Z těchto důvodů je velice přínosný výzkum na fyzikálním modelu. Na základě zjištěné velikosti hydrodynamického zatížení je možné upravit tvar rekonstruované mostovky nebo lze pro definované podmínky přelití navrhnout statické zabezpečení mostu proti odplavení mostovky. Při relativně nízkých investičních nákladech je též

[1] Dle definice z ČSN 73 6200 je mostní objekt nedílná součást dopravní cesty v místě, kde je třeba překonat přírodní nebo umělou překážku přemostěním, např. údolí, nebo vodní tok.

[2] návrhová hladina, jedná se o úroveň hladiny při návrhovém průtoku

[3] kontrolní návrhová hladina, jedná se o úroveň hladiny při kontrolním návrhovém průtoku

[4] návrhový průtok dle [1]

[5] kontrolní návrhový průtok dle [1]

možné zlepšit situaci v profilu mostu instalací zařízení pro zachycení plovoucích předmětů.

Cílem práce je stanovení vztahu mezi mediánem (střední hodnotou) a krajními kvantily hydrodynamického zatížení. Zjištěné vztahy mohou být použity k určení návrhových hodnot zatížení od proudící vody, např. při návrhu uložení mostovky na podpěrách.

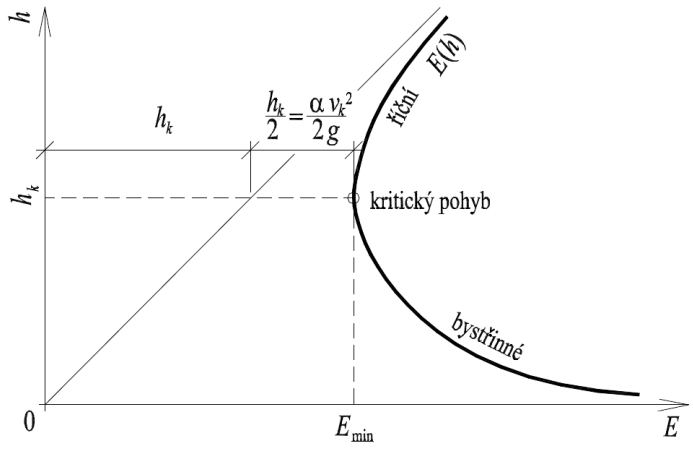
# 2 TEORETICKÁ ČÁST

## 2.1 Hydraulika mostních objektů

Mostní objekt se definuje podle [4] jako nedílná součást dopravní cesty v místě, kde je třeba překonat přírodní nebo umělou překážku přemostěním, např. údolí, nebo vodní tok. Existují dva druhy mostních objektů: mosty a propustky. Most se definuje jako mostní objekt s kolmou světlostí alespoň jednoho otvoru větší, než 2,0 m sloužící k převádění dopravních cest, např. komunikací nebo železnic, vodních koryt, potrubních komunikací, stavebně montážním účelům a revizí. Propustek se od mostu liší tím, že má kolmou světlostí otvoru do 2,0 m včetně. [4]

Z hydraulického hlediska bývá u mostu délka objektu proti rozměrům příčného průřezu malá, proto jsou ztráty třením zanedbatelné oproti ztrátám místním. U propustků je nutné uvažovat i ztráty třením. [3] Zasahuje-li konstrukce mostu do průtočného profilu přemostěného toku, dochází k zúžení průtočné plochy koryta. Zúžením koryta obvykle dojde ke zvýšení vodní hladiny, tzv. vzdutí před mostem a k zvětšeným rychlostem proudění v mostním profilu. [5]

Při proudění v otevřených korytech rozlišujeme v závislosti na hloubce a rychlosti vody v korytě proudění říční, bystřinné a kritické. Při kritickém proudění je energetická výška průřezu (Obr. 2.1) minimální, tedy minimální součet tlakové a rychlostní výšky podle rovnice (2.5). Tento jev nastává, pokud je v korytě dosaženo tzv. kritické hloubky $h_k$ a tvoří rozmezí mezi říčním a bystřinným režimem proudění. Rychlost při kritickém proudění se nazývá kritická rychlost $v_k$ a je přibližně rovna rychlosti šíření translačních vln na hladině.




Obr. 2.1: Energetická výška průřezu [5]

Jak je znázorněno v grafu na (Obr. 2.1), při přechodu do proudění říčního se rychlostní výška zmenšuje a naopak tlaková výška se zvětšuje. Rychlost vody je menší

než kritická, proto mohou vlny postupovat po proudu i proti němu. Hladina říčního proudu je od pohledu nerovná a zvlněná. [5] Naopak při přechodu do proudění bystřinného je rychlost proudění větší, než rychlost kritická, vlny nemohou postupovat proti proudy a hladina je při pohledu hladká a lesklá.

Režim proudění lze určit například na základě bezrozměrného Froudova kritéria:

$$Fr = \frac{\alpha v^2}{g\, h_s}, \tag{2.1}$$

kde $h_s$ je střední hloubka průřezu

$$h_s = \frac{S}{B}, \tag{2.2}$$

$S$ je průtočná plocha průřezu s šířkou v hladině $B$, $v$ je střední průřezová rychlost průřezu, $\alpha$ je Coriolisovo číslo [1] a $g$ je tíhové zrychlení[2]. Střední průřezová rychlost se stanoví jako

$$v = \frac{Q}{S}, \tag{2.3}$$

kde $Q$ je průtok.

Podle hodnoty Froudova čísla rozlišujeme proudění

- říční pro $Fr < 1$,
- kritické pro $Fr = 1$
- a bystřinné pro $Fr > 1$.

Polohu vzduté hladiny před mostem je potřeba určit výpočtem v závislosti na poloze hladiny vzhledem k mostovce. Dle [6] mohou při proudění vody mostním otvorem za předpokladu říčního proudění nastat čtyři různé případy:

- proudění mostním otvorem o volné hladině,
- proudění mostním otvorem se zatopeným vtokem a volným výtokem,
- tlakové proudění mostním profilem,
- proudění s přelévanou mostovkou.

### 2.1.1 Proudění mostním otvorem o volné hladině

Za běžné situace hladina vody nedosahuje konstrukce mostovky a proudí pod ní s volnou hladinou. Proudění mostním profilem v režimu říčního proudění, vyznačující

[1] Coriolisovo číslo $\alpha$ vyjadřuje podíl skutečné kinetické energie $E_k$ v průřezu stanovené z bodových rychlostí ku kinetické energii vyjádřené z průřezové rychlosti. [5] V případě otevřených koryt se nejčastěji pohybuje v rozmezí od $1,02 \leq \alpha \leq 1,1$.

[2] Pro dostatečnou přesnost výpočtu se na povrchu Země uvažuje hodnota $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$.

se bočním zúžením je dle [5] analogické ke schématu proudění na přepadu se širokou korunou. Podle [6] se mohou za předpokladu říčního proudění vyskytnout v mostním profilu dva případy proudění o volné hladině:

- vtokový profil mostu ovlivněn dolní vodou,
- vtokový profil mostu neovlivněn dolní vodou.

### Vtokový profil mostu ovlivněný dolní vodou

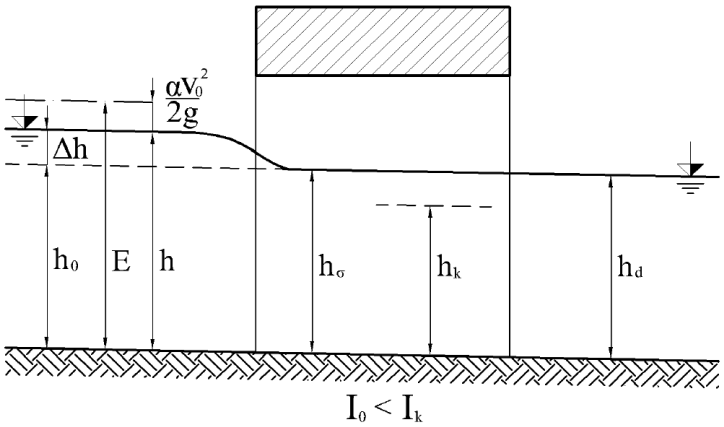
Dle [5] a [6] je vtokový profil mostu ovlivněn spodní vodou (Obr. 2.2), jestliže platí:

$$h_d > \kappa E, \tag{2.4}$$

kde $h_d$ je hloubka dolní vody, $\kappa$ (Tab. 2.1) je součinitel úměrnosti odpovídající tvaru vtokového otvoru a energetická výška v profilu před mostem je $E$, dle [3] ji lze vypočítat jako

$$E = h + \frac{\alpha {v_0}^2}{2g}, \tag{2.5}$$

kde hloubka vody před mostem je $h$ a výraz $\frac{\alpha {v_0}^2}{2g}$ se nazývá rychlostní výška, ta obsahuje Coriolisovo číslo $\alpha$, přítokovou rychlost $v_0$ a gravitační zrychlení $g$.




Obr. 2.2: Říční proudění pod mostem s vtokem ovlivněným dolní vodou. [6]

Průtok vody mostním otvorem pak lze dle [3] spočítat podle vztahu:

$$Q = \varphi\, b\, h_d \sqrt{2g(E - h_d)}, \tag{2.6}$$

popřípadě pro dno s prahem dle [6]

$$Q = \varphi\, b\, h_\sigma \sqrt{2g(E - h_\sigma)}, \tag{2.7}$$

kde $\varphi$ (Tab. 2.1) je rychlostní součinitel, $b$ - šířka mostního pole a $h_\sigma$ je hloubka dolní vody nad prahem pod mostem. V případě, že je dno mostu v úrovni dna koryta, platí

$$h_d = h_\sigma, \tag{2.8}$$

Vzdutí způsobené mostem je dle [6] dáno vztahem

$$\Delta h = h - h_0, \tag{2.9}$$

kde původní nevzdutá hloubka před mostem je $h_0$.

Tab. 2.1: Součinitele pro výpočet mostních objektů dle [5]

| typ | křídla kolmá | | | křídla rovnoběžná | | | křídla šikmá | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varphi$ | $\kappa$ | $m$ | $\varphi$ | $\kappa$ | $m$ | $\varphi$ | $\kappa$ | $m$ |
| A | 0,96 | 0,72 | 0,36 | 0,94 | 0,75 | 0,35 | 0,95 | 0,74 | 0,36 |
| B | 0,94 | 0,75 | 0,35 | 0,91 | 0,79 | 0,33 | 0,92 | 0,78 | 0,35 |
| C | 0,91 | 0,79 | 0,33 | 0,87 | 0,85 | 0,28 | 0,88 | 0,83 | 0,32 |
| D | 0,9 | 0,81 | 0,32 | 0,86 | 0,87 | 0,27 | 0,87 | 0,85 | 0,3 |
| E | 0,85 | 0,88 | 0,26 | 0,79 | 0,95 | 0,16 | 0,81 | 0,93 | 0,23 |

A dno mostu je v úrovni dna přítokového koryta
B ve dně mostu je práh se zaoblenou vstupní hranou
C ve dně mostu je práh se zkosenou vstupní hranou
D ve dně mostu je práh s pravoúhlou vstupní hranou
E ve dně mostu je práh s pravoúhlou vstupní hranou (nepříznivé podmínky, nerovný povrch)

### Vtokový profil mostu neovlivněný dolní vodou

Dle [5] a [6] není vtokový profil mostu ovlivněn spodní vodou (Obr. 2.3), jestliže platí nerovnost:

$$h_d > \kappa E. \tag{2.10}$$

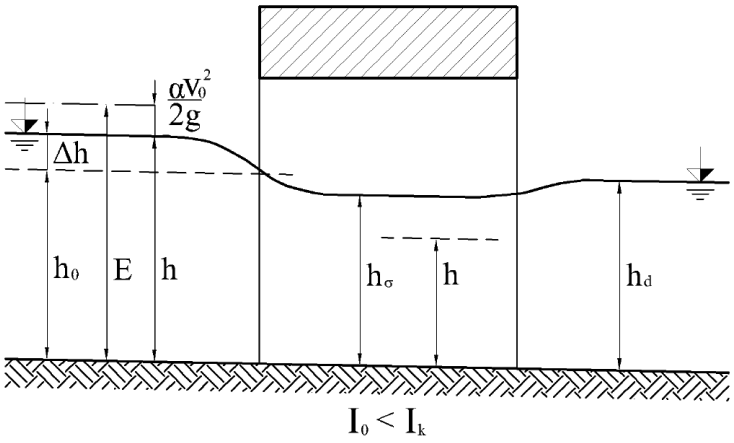
Energetická výška $E$ se spočte podle vztahu

$$E = \left( \frac{Q}{m\, b\, \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \tag{2.11}$$

kde $m$ (Tab. 2.1) je součinitel přepadu.

Průtok vody mostním otvorem, lze potom dle [5] a [6] vypočítat podle vztahu analogického s dokonalým přepadem přes širokou korunu

$$Q = m\, b\, \sqrt{2g}\, E^{3/2}. \tag{2.12}$$




Obr. 2.3: Říční proudění pod mostem s vtokem neovlivněným dolní vodou. [6]

### 2.1.2 Proudění pří kontaktu hladiny s konstrukcí mostovky

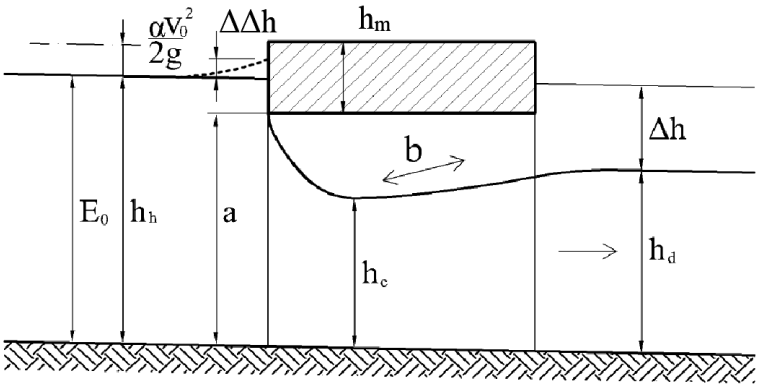
Přestože se mosty běžně jako přelévané nenavrhují, extrémní povodně z posledních dvou dekád ukazují, že zejména na menších tocích nebývá kapacita mostů vždy dostatečná. Z toho důvodu, může docházet vlivem extrémního průtoku ke kontaktu hladiny s konstrukcí mostovky, čímž může docházet k tlakovému proudění mostním profilem či dokonce k přelévání mostovky.

#### Proudění mostním otvorem se zatopeným vtokem a volným výtokem

V tomto případě, je mostní otvor zatopen, avšak nedochází ke kontaktu hladiny s dolním lícem mostovky (Obr. 2.4). Podle [7] odpovídá tato situace schématu výtoku pod stavidlem. K zaplavení horního čela mostovky obvykle dochází, pokud je dle [6] splněna podmínka

$$E_0 > 1,1a, \tag{2.13}$$

kde $E_0$ je energetická výška v profilu nad mostním objektem a $a$ je výška mostního otvoru




Obr. 2.4: Prouděním mostním otvorem se zatopeným vtokem a volným výtokem. [6]

Energetickou výšku lze dle [6] vyjádřit vztahy

$$E_0 = h_h + \frac{\alpha {v_0}^2}{2g} \tag{2.14}$$

nebo

$$E_0 = h_c + \frac{Q^2}{{\mu_v}^2\, 2\, g\, {S_M}^2}, \tag{2.15}$$

kde $h_h$ je vzdutá hloubka vody v profilu před mostem, $v_0$ - střední rychlost proudění v profilu před mostem, $\mu_v$ je součinitel výtoku, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí $0,7 \leq \mu_v \leq 0,9$, průtočná plocha profilu mostu $S_M$

$$S_M = a\, b \tag{2.16}$$

a $h_c$ je snížená hloubka v profilu mostního objektu, která je dle [6] funkcí výšky mostního otvoru

$$h_c = \varepsilon\, a, \tag{2.17}$$

kde $\varepsilon$ je součinitel kontrakce vodního proudu, ten se pohybuje v rozmezí $0,75 > \varepsilon > 0,5$, dle [6] se v praxi často uvažuje $\varepsilon \approx 0,5$.

Kapacitu mostního otvoru je možné v tomto případě stanovit z rovnice [6]

$$Q = \mu_v\, S_M \sqrt{2g \left( h_h + \frac{\alpha {v_0}^2}{2g} - \varepsilon\, a \right)}. \tag{2.18}$$

Také v případě proudění se zatopeným vtokem se rozlišuje proudění s vtokem ovlivněným a neovlivněným dolní vodou. Dojde-li k zatopení snížené hloubky vody $h_c$, dle [6] je pro výpočet určující hloubka dolní vody $h_d$. K zatopení dojde za předpokladu, že platí

$$h_d > \frac{h_c}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8q^2}{g\, {h_c}^3}} - 1 \right), \tag{2.19}$$

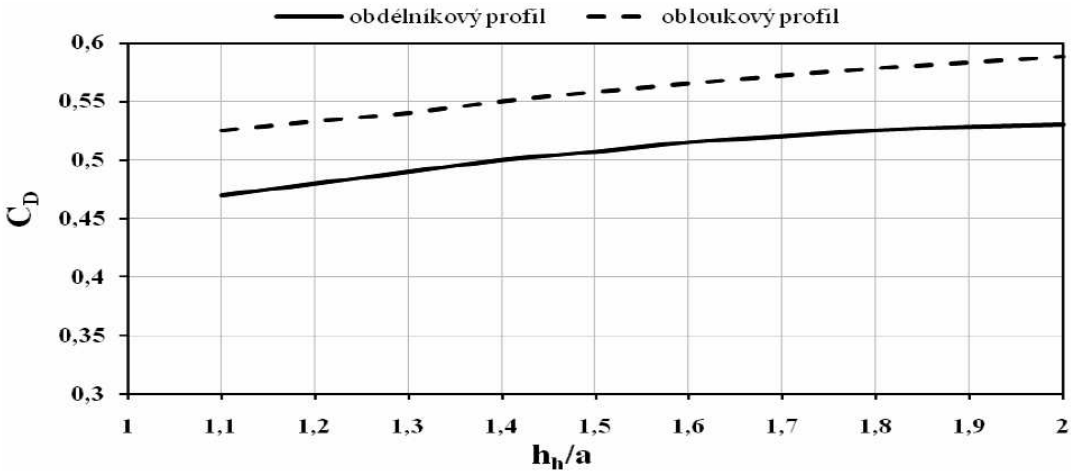
kde $q$ je specifický průtok

$$q = \frac{Q}{S_M} \ [m^2/s], \tag{2.20}$$

v tom případě se stanoví průtok mostním profilem dle [6]

$$Q = C_D \, S_m \sqrt{2g(E_0 - h_d)}, \tag{2.21}$$

kde $C_D$ je průtokový součinitel pro proudění s volnou hladinou a zatopeným vtokem. Ten je závislý na poměru $h_h/a$ (Obr. 2.5).




Obr. 2.5: Hodnoty průtokového součinitele $C_D$ [6].

V obou případech ovlivněného i neovlivněného vtoku dolní vodou lze stanovit vzdutí před mostem jako

$$\Delta h = h_h - h_0, \tag{2.22}$$

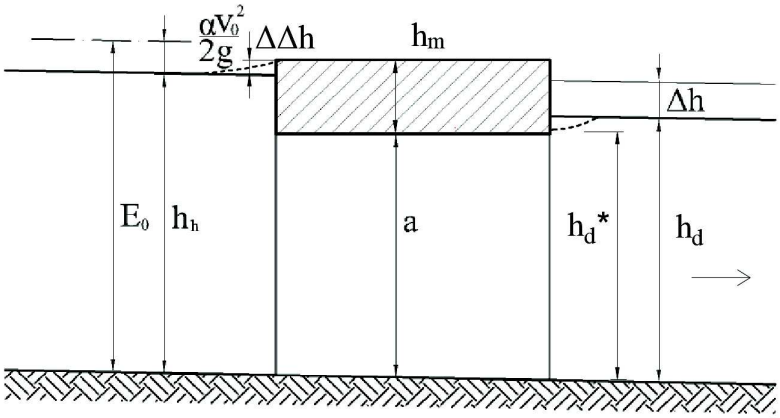
kde původní hloubka vody před mostem je označena $h_0$. Po dosazení rovnice (2.15) do (2.21) lze iteračním způsobem získat hodnotu vzduté hloubky $h_h$.

### Tlakové proudění mostním profilem

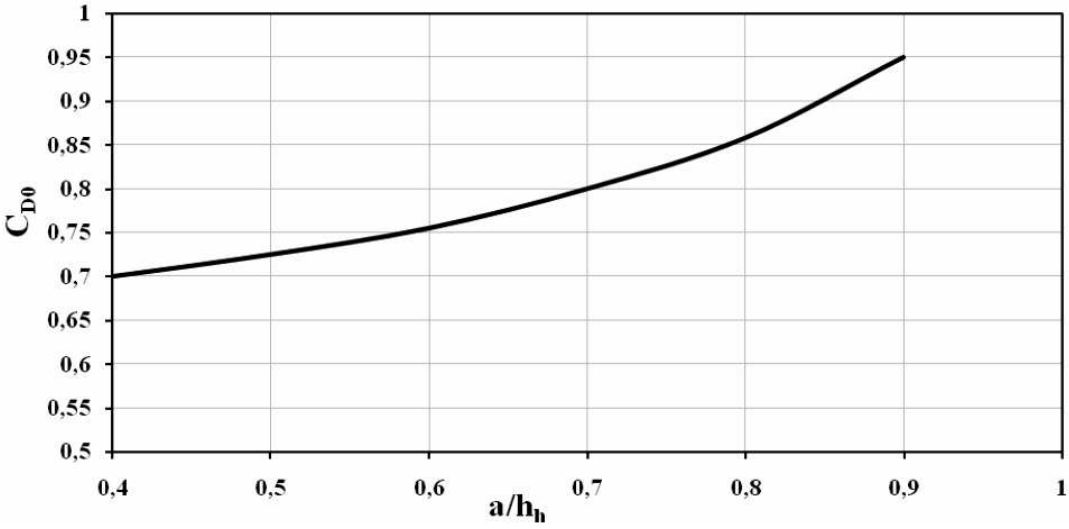
Zřejmě nejčastějším případem, kdy je hladina vody v kontaktu s mostovkou, ale ta ještě není přelévána, je zatopení celého mostního otvoru jak na vtoku, tak na výtoku a tím dochází k tlakovému proudění v celé délce mostního otvoru. (Obr. 2.6). V tom případě je možné použít schéma zatopeného výtoku otvorem. Průtok mostním otvorem je možné stanovit dle [10]

$$Q = C_{D0} \, S_M \, \sqrt{2g(E_0 - h_d)}, \tag{2.23}$$

kde $C_{D0}$ je výtokový součinitel pro zatopený výtok mostním otvorem. Jeho průběh v závislosti na hodnotě $a/h_h$ je znázorněn v grafu (Obr. 2.7). Jako hodnota typická pro mostní otvory je dle [7] doporučována hodnota $C_{D0} = 0,8$.




Obr. 2.6: Schéma tlakového proudění mostním otvorem [6].




Obr. 2.7: Závislost průtokového součinitele $C_{D0}$ na poměru $a/h_h$ [6].

Hodnotu vzduté hloubky před mostem je opět možné stanovit iteračně z rovnice (2.23) a po dosazení do (2.22) stanovit vzdutí způsobené mostním objektem $\Delta h$.

Jak však dokazují Picek a Havlík v [8], je výpočet průtoku podle (2.23) značně podhodnocen a výpočet vzdutí zase nadhodnocen. Skutečné hladiny před a za mostem nejsou zcela rovné, ale dochází k lokálnímu navýšení hladiny před mostovkou $\Delta\Delta h$ (Obr. 2.4) a (Obr. 2.6) a ke vzniku zúžené hloubky $h_d{}^*$ za mostovkou (Obr. 2.6), ze ktreré se teprve hladina postupně zvyšuje na úroveň průměrné hloubky v korytě za mostem $h_d$.

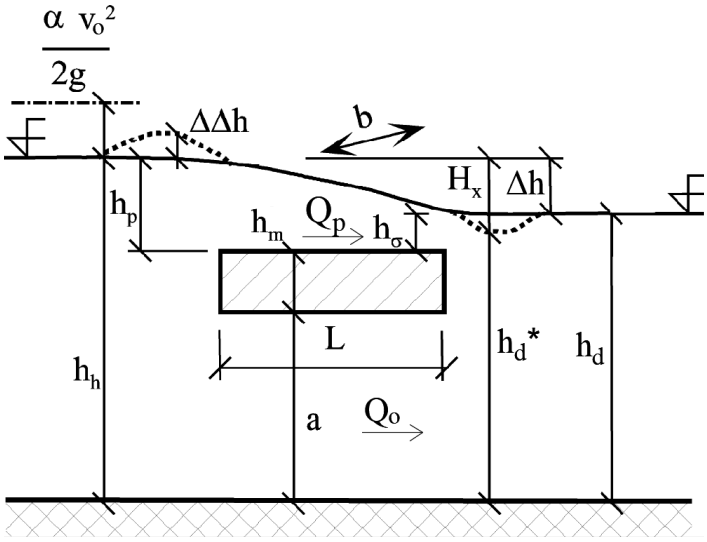
Dle [8] jsou tyto nepřesnosti způsobeny nesprávnou interpretací rovnice výtoku zatopeným otvorem (2.23), ve které má být správně namísto hloubky $h_d$ zúžená hloubka $h_d{}^*$. Vzhledem k problematickému stanovení zůžené hloubky $h_d{}^*$ se však v praktické aplikaci tato úprava prozatím nepoužívá.

Oproti tomu lokální zvýšení hladiny před mostem $\Delta\Delta h$ má jistý praktický význam, protože díky němu dojde k přelití mostovky dříve, než při uvažování vzduté hloubky bez tohoto jevu. Dle [7] se $\Delta\Delta h$ dává do souvislosti s rychlostní výškou na přítoku a je možné jej stanovit ze vztahu

$$\Delta\Delta h = 0,88\frac{{v_0}^2}{2g}. \tag{2.24}$$

### 2.1.3 Proudění s přelévanou mostovkou

Především na menších vodních tocích, u nedostatečně kapacitních mostů může při vysokých průtocích dojít k přelití mostovky. V tomto případě je proudění rozděleno na dvě části, dolní proud procházející mostním otvorem a proud přepadající přes msotovku (Obr. 2.8).




Obr. 2.8: Schéma přelévané mostovky [7].

Průtok protékající mostním otvorem je možné stanovit z rovnice zatopeného výtoku otvorem [6]

$$Q_o = C_{D0}\, S_M \sqrt{2g\left(h_h + \frac{\alpha {v_0}^2}{2g} - h_d\right)}, \tag{2.25}$$

stanovení výtokového součinitele $C_{D0}$ je opět možné z grafu (Obr. 2.7).

Průtok vody přepadající přes mostovku lze stanovit z rovnice přepadu [6]

$$Q_p = \frac{2}{3}\sigma_z\, \mu\, b\, \sqrt{2g}\left(h_p + \frac{\alpha {v_0}^2}{2g}\right)^{3/2}, \tag{2.26}$$

kde $\sigma_z$ je součinitel zatopení, $\mu$ značí součinitele přepadu, $b$ je šířka přepadového paprsku a jeho výška nad mostovkou je $h_p$. Dle [6] je součinitelem zatopení $\sigma_z$ do

rovnice přepadu zaveden vliv úrovně hladiny za přelivem na průtočnou kapacitu přelivu a jeho hodnoty závisejí především na poměru $h_\sigma/h_p$ (Tab. 2.2), kde výška $h_\sigma$ značí převýšení hladiny v dolním korytě nad úrovní přelivné hrany a jak je zřejmé z (Obr. 2.8), lze ho stanovit jako

$$h_\sigma = h_d - (h_m + a). \tag{2.27}$$

Tab. 2.2: hodnoty součinitelů zatopení $\sigma_z$ v závislosti na $h_\sigma/h_p$ [6]

| $h_\sigma/h_p$ | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_z$ | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,94 | 0,906 | 0,858 | 0,79 |
| $h_\sigma/h_p$ | 0,85 | 0,9 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 1 | |
| $\sigma_z$ | 0,699 | 0,575 | 0,515 | 0,449 | 0,412 | 0 | |

Hodnota součinitele přepadu $\mu$ závisí na tvaru přelivné konstrukce a přepadové výšce a v případě přelévané mostovky se pohybuje v rozmezí $0,6 \leq \mu \leq 0,7$.

Celkový průtok je dán součtem [6]

$$Q = Q_o + Q_p. \tag{2.28}$$

Podle [6] je stanovení vzdutí hladiny mostním objektem v případě přelévané mostovky početně velmi náročné a vyžaduje opakovaný iterační postup. Pro danou hodnotu průtoku $Q$ a k němu vztaženou hloubku dolní vody $h_d$ se postupně volí různé hodnoty hloubky horní vody $h_h$ až do chvíle, kdy je součet průtoků $Q_o$ a $Q_p$ roven návrhovému průtoku $Q$ v korytě před a za mostem.

Stejně jako v případě tlakového proudění bez přelévané mostovky, jak uvádí [7], může dojít vlivem výskytu zúžené hloubky za mostem $h_d{}^*$ a neuváženou aplikací rovnice přepadu (2.26) a rovnice výtoku zatopeným otvorem (2.25) pří výpočtu vzdutí k nezanedbatelným chybám. Dle [7] vykazuje největší shodu s experimenty výpočet vzdutí z empirického vztahu [7]

$$\Delta h = 11 \left(\frac{h_m}{h_h}\right)^{1,94} \frac{{v_0}^2}{2g}, \tag{2.29}$$

kde $h_m$ je výška mostovky.

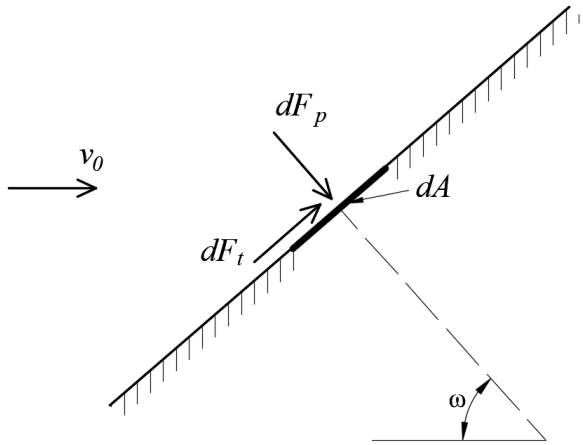
Pro snadnější použití bez nutnosti iterace je možné též použít odvozený výraz [7]

$$\Delta h = 6,51 \left(\frac{h_m}{h_d}\right)^{1,68} \frac{{v_0}^2}{2g}. \tag{2.30}$$

## 2.2 Hydrodynamické zatížení přelévané mostovky

Při obtékání mostovky se působením viskozity vody a její objemové hmotnosti vyvolává hydrodynamické zatížení, jehož vlivem může dojít k nadzdvižení mostovky z ložisek a jejímu následnému posunutí nebo převrácení. Při určování hydrodynamického zatížení mostovky se vychází z klasického schématu obtékaného tělesa kapalinou.

Dle [9] může dojít mezi kapalinou a tuhým tělesem ke dvěma různým vztahům. Buď se tuhé těleso pohybuje v kapalině, nebo je těleso nehybné a obtékáno kapalinou. V obou případech se určují vzájemná silová působení tuhého tělesa a kapaliny a vlastnosti proudění. Jak uvádí [11], pokud je tuhé těleso ponořeno v pohybující se kapalině, je vystaveno jejímu hydrodynamickému zatížení, jehož silové účinky se obecně dělí na objemovou (vztlakovou) sílu $F_y$, která působí kolmo na rychlost nenarušeného proudu před tělesem a vzniká při nesymetrickém obtékání symetrického tělesa, nebo při obtékání symetrického tělesa a povrchovou (odporovou) sílu působící ve směru pohybu $F_x$. Odporové síly se dělí na sílu třecí $F_t$ a sílu tlakovou $F_p$. (Obr. 2.9)




Obr. 2.9: Schéma tlakové a třecí síly od hydrodynamického zatížení na elementární plochu povrchu tělesa

Síla tlaková je dle [3] výslednicí všech normálových napětí, vyplývajících z viskozity kapaliny, odtržením proudu a tím vzniklého úplavu[3]. Velikost tlakové (normálové) síly na elementární povrch tělesa se určí ze vztahu [12]

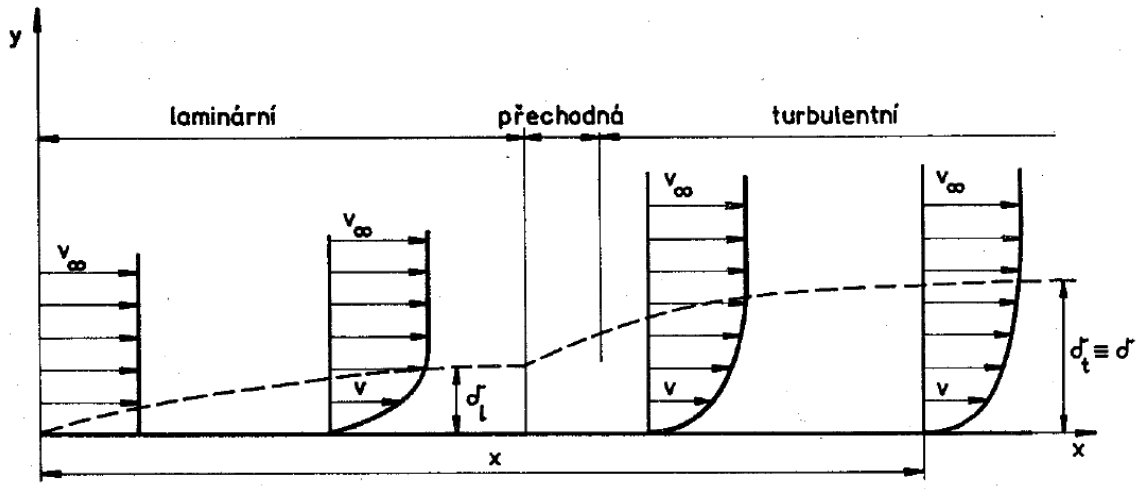
$$dF_p = p\,dA, \tag{2.31}$$

kde $dF_p$ je diferenciál tlakové síly působící na elementární plochu povrchu tělesa, tlak proudící kapaliny je $p$ a $dA$ značí elementární plochu povrchu obtékaného tělesa.

[3]Úplav je prostor vyplněný víry při odtržení proudu od obtékané stěny, vzniká následkem tření a zpětného pohybu, kdy se zpomalená kapalina u stěny dostane do rotačního pohybu.[3]

Třecí síla je dle [3] výsledným silovým účinkem všech tangenciálních napětí na povrch tělesa, závisejících na drsnosti povrchu, velikosti plochy a relativní rychlosti kapaliny vůči tělesu. Vlivem viskozity kapaliny je u povrchu tělesa proudění brzděno až na nulovou rychlost a dojde k přilnutí kapaliny, čímž vzniká takzvaná mezní vrstva. [3] Se vzdáleností od povrchu tělesa se rychlost opět zvětšuje.

Pojem mezní vrstvy byl zaveden Prandtlem a dle [11] ho lze popsat na příkladu obtékání tenké rovinné desky umístěné rovnoběžně s proudnicemi. Částice kapaliny, které se k desce přibližují mají stejnou rychlost $v_\infty$ a částice, které ulpí na povrchu desky mají rychlost nulovou. Pokud se částice pohybují blízko desky, jsou brzděny pomalejšími částicemi u povrchu. Tato změna rychlosti částic probíhá v poměrně tenké vrstvě kapaliny, která se nazývá mezní vrstva. Třením po délce desky se částice stále zbrzďují, tím do mezní vrstvy vstupují další částice kapaliny a mezní vrstva narůstá. Po délce desky tak mezní vrstva přechází z laminárního proudění na začátku desky do turbulentního proudění s laminární vrstvou v dalším úseku. K přechodu do turbulentní vrstvy dochází postupně v takzvané přechodové oblasti. Rozdělení rychlostí v mezní vrstvě po délce desky je znázorněno na (Obr. 2.10).




Obr. 2.10: Vývoj mezní vrstvy po délce desky [11]

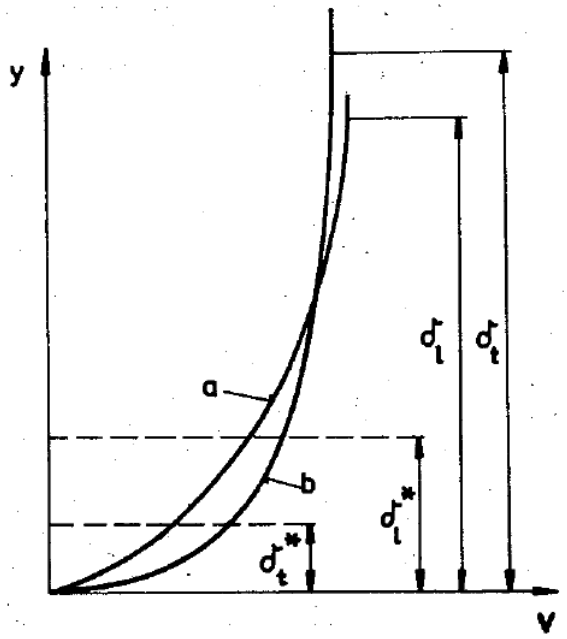
Dle [11] v dostatečné vzdálenosti $x_t$ od oběžné hrany jsou si rychlostní profily velice podobné a jejich tvar již nezávisí na vzdálenosti $x_t$. Tvar rychlostního profilu může být buď laminární, nebo turbulentní, v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla $Re$.

$$Re = \frac{v_\infty \, x_t}{\nu}, \tag{2.32}$$

kde $v_\infty$ je rychlost nenarušeného proudu, $x_t$ je délka obtékání desky a $\nu$ je kinematická viskozita. Dle [11] je možné podle velikosti Reynoldsova kritéria rozlišit dva typy proudění:

- laminární pro $Re < 10^5$,
- turbulentní pro $Re > 10^5$.

V grafu na (Obr. 2.11) je patrné, že ve srovnání s laminární vrstvou má turbulentní mezní vrstva plnější rychlostní profil, což je způsobeno tubulencí v části turbulentní mezní vrstvy. Rychlostní profil mezní vrstvy nejsou zakresleny ve stejném měřítku. Tloušťka mezní vrstvy $\delta$ je ve skutečnosti o rozměrech v řádech setiny až tisíciny charakteristické délky tělesa. Jak popisuje [11], konvenční vrstva $\delta$ mezní vrstvy je kolmá vzdálenost od stěny, kde rychlost dosahuje zpravidla 99 % rychlosti vnějšího proudu. Za mezní vrstvu se tím pádem počítá ta část toku, kde je rychlost menší, než 99 % rychlosti vnějšího proudu (Obr. 2.11).




Obr. 2.11: Tloušťka mezní vrstvy pro oblast proudění a)laminární, b)turbulentní, $\delta$ je tloušťka mezní vrstvy. [11]

Velikost tangenciálního napětí na povrchu tělesa je dáno vztahem [12]

$$\tau_w = \eta \frac{\partial u}{\partial y}, \tag{2.33}$$

kde $\eta$ je součinitel dynamické viskozity a výraz $\partial u/\partial y$ je gradient rychlosti ve směru kolmém na vektor rychlosti.

Velikost třecí síly se pak vypočte [12]

$$dF_t = \tau_w \, dA, \tag{2.34}$$

kde $dF_t$ je diferenciál třecí síly.

Výslednici rozložení tření a tlaku lze získat integrací těchto dvou složek po povrchu obtékaného tělesa. Jak je znázorněno na (Obr. 2.12), tato výslednice se skládá z horizontální síly $F_x$ a vertikální síly $F_y$ , výsledné složky hydrodynamické síly, jsou tedy určeny vztahy: [12]

$$F_x = \cos\omega \int p\, dA + \sin\omega \int \tau_w\, dA, , \tag{2.35}$$

a

$$F_y = -\sin\omega \int p\, dA + \cos\omega \int \tau_w\, dA, , \tag{2.36}$$

kde $\omega$ je úhel mezi vektorem tlakové síly a vodorovnou rovinou.

Mimo směrových složek hydrodynamické síly působí na mostovku také ohybový moment $M$, který je vyvozován právě složkami hydrodynamické síly $F_x$ a $F_y$. Moment k těžišťové ose mostovky je určen vztahem [13]

$$M = \sum r_{F_p} F_p + \sum r_{F_t} F_t, \tag{2.37}$$

ve kterém $r_{F_p}$, respektive $r_{F_t}$ značí ramena jednotlivých složek hydrodynamické síly vzhledem k těžišťové ose profilu mostovky.

Aby dle [12] bylo možné zintegrovat a určit velikosti jednotlivých složek hydrodynamické síly, musíme znát tvar a rozměry tělesa a rozdělení tečného napětí $\tau$ a normálového napětí $p$ po jeho povrchu. Ačkoliv jsou rovnice (2.35) a (2.36) platné pro jakýkoliv tvar tělesa, obtížnost jejich použití, ale spočívá právě ve stanovení odpovídajícího rozdělení tečného a normálového napětí po povrchu tělesa.

Široce využívanou alternativou je zavedení bezrozměrných odporových součinitelů $C_i$ a určení jejich průměrné hodnoty zjednodušenou analýzou, některou z numerických metod, nebo experimentálně.[12] Definice odporového součinitele pro vodorovnou sílu $F_x$, $C_D$ závisí dle [14] na relativním zatopení mostovky.

$$h^* = \frac{h_h - a}{h_m}, \tag{2.38}$$

čím vyšší hodnota $h^*$, tím více je mostovka zatopena.

V závislosti na relativním zatopení $h^*$ lze dle [14] použít pro výpočet odporového součinitele $C_D$ následující vztahy: Pro $h^* \geq 1$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\,\rho_w\, {v_0}^2\, h_m\, b}, \tag{2.39}$$

a pro $h^* < 1$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\,\rho_w\, {v_0}^2\, (h_h - a) b}, \tag{2.40}$$

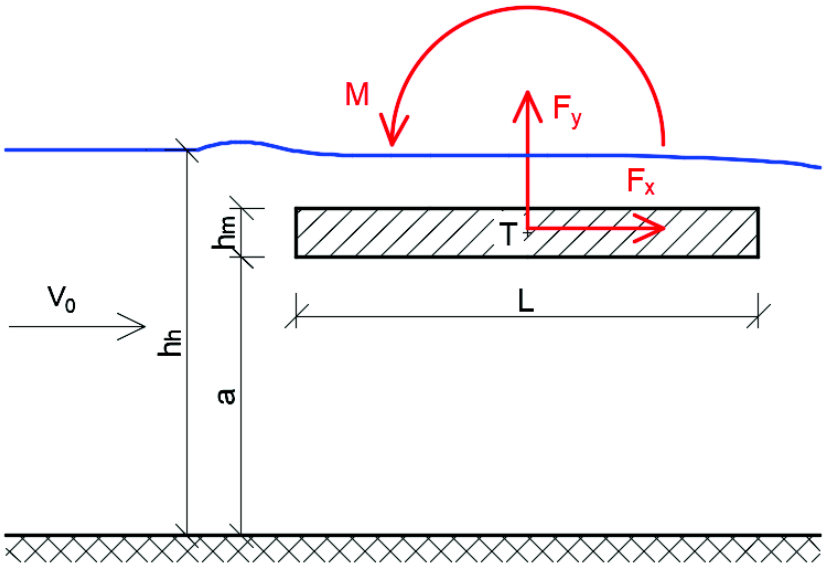
kde $F_x$ je vodorovná složka hydrodynamické síly, $\rho_w$ je hustota vody, střední průřezová rychlost před mostem je $v_o$, $m$ označuje výšku mostovky a $b$ je délka mostu.

Velikost odporového součinitele $C_L$ pro svislou sílu $F_y$ lze zjistit ze vztahu

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\,\rho_w\, {v_0}^2\, L\, b}, \tag{2.41}$$

kde $L$ je šířka mostovky a velikost odporového součinitele $C_M$ pro výpočet momentu $M$ lze zjistit ze vztahu

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\,\rho_w\, {v_0}^2\, L^2\, b}. \tag{2.42}$$




Obr. 2.12: Schéma mostovky se složkami hydrodynamického zatížení s vyznačením kladné konvence sil.

## 2.3 Mechanická podobnost v hydraulice

Přestože jsou současné matematické výpočetní aparáty velice sofistikované, v některých případech je jejich použití velice obtížné, nebo je pro něj nedostatek vstupních dat, případně je velice časově náročné z důvodu potřeby enormního výpočetního výkonu. V těchto případech je velice přínosná práce na hydraulických laboratorních modelech, kde je dle [9] možné řešit složité případy proudění, ověřovat teoretické závěry a analýzy jednotlivých případů proudění nebo zjišťovat empirické koeficienty.

V případě mostních objektů neumožňují matematické modely stále simulovat některé průvodní jevy při povodních, jejichž výskyt může být pro stávající, nebo navrhované mostní objekty velice nebezpečný. Jde například o erozi dna, tvorbu výmolů, zatížení mostu od vodou nesených předmětů, ledů, ucpávání mostního otvoru splaveninami, vliv mostního objektu na průběh kulminační hladiny povodňového

průtoku, přesná stanovení hydrodynamického zatížení obtékaných, nebo přelévaných objektů a podobně. [6]

Teorie podobnosti umožňuje aplikovat výsledky experimentu na skutečný případ. Návrh fyzikálního modelu musí vždy splňovat podmínky podobnosti, aby zkoumané jevy měly u skutečného díla i u modelu podobný průběh, při němž odpovídající veličiny si jsou v odpovídajících bodech a časech úměrné. [9]

Dva jevy jsou si mechanicky podobné, pokud jsou splněny podobnosti:

- geometrické,
- kinematické,
- dynamické.

### 2.3.1 Geoemtrická podobnost

Geometrická podobnost vyžaduje, aby byl pro libovolné dvě sobě odpovídající rozměry zachován stálý poměr, nazývaný délkové měřítko $M_L$. To znamená, že platí [3]

$$M_L = \frac{L_2}{L_1}, \tag{2.43}$$

z toho

$$L_2 = M_L\, L_1, \tag{2.44}$$

Hydraulické veličiny na zmenšeném modelu jsou označeny indexem 1 a ve skutečnosti 2. Pro měřítka plochy platí [5]

$$M_S = \frac{S_2}{S_1}, \tag{2.45}$$

protože plocha $S$ je kvadrátem délky $l$, platí pro měřítka délkové a plošné podobnosti vztah [5]

$$M_S = {M_L}^2. \tag{2.46}$$

Pro měřítka objemů platí [5]

$$M_V = \frac{V_2}{V_1}. \tag{2.47}$$

Pro měřítka délkové a plošné podobnosti platí vztah [5]

$$M_V = {M_L}^3. \tag{2.48}$$

Při splnění podmínek geometrické podobnosti jsou odpovídající úhly na modelu a ve skutečnosti stejné.

### 2.3.2 Kinematická podobnost

Dle [3] se kinematická podobnost vztahuje na kinematické veličiny, které jsou též v poměru příslušných měřítek. Dráhy, které opisují sobě odpovídající částice proudu v úměrně odpovídajících si dobách jsou si vzájemně podobné. Pro měřítka času proto platí [5]

$$M_t = \frac{t_2}{t_1}, \tag{2.49}$$

$$t_2 = M_t\, t_1, \tag{2.50}$$

z toho jsou odvozena další kinematická měřítka: Měřítko rychlosti, pro které platí [5]

$$M_v = \frac{v_2}{v_1}, \tag{2.51}$$

$$v_2 = M_v\, v_1, \tag{2.52}$$

$$M_v = \frac{M_L}{M_t}, \tag{2.53}$$

měřítko zrychlení, pro které platí [5]

$$M_a = \frac{a_2}{a_1}, \tag{2.54}$$

$$a_2 = M_a\, a_1, \tag{2.55}$$

$$M_a = \frac{M_L}{{M_t}^2}, \tag{2.56}$$

kde veličina $a$ označuje zrychlení a měřítko průtoku, pro nějž platí [5]

$$M_Q = \frac{Q_2}{Q_1}, \tag{2.57}$$

$$Q_2 = M_Q\, Q_1, \tag{2.58}$$

$$M_Q = \frac{{M_L}^3}{M_t}, \tag{2.59}$$

### 2.3.3 Dynamická podobnost

Proudění tekutin je pohyb hmotných částic a podle klasické newtonovy mechaniky jsou příčinou pohybu síly. Dynamická podobnost tedy vyjadřuje požadavek na zachování konstantních poměrů mezi působícími silami. [3]

$$M_F = \frac{F_2}{F_1}, \tag{2.60}$$

z toho

$$F_2 = M_F\, F_1. \tag{2.61}$$

Pro hmotnost proudící kapaliny je definováno měřítko hmotnosti [3]

$$M_m = \frac{m_2}{m_1}, \tag{2.62}$$

$$m_2 = M_m\, m_1. \tag{2.63}$$

Podle Newtonova zákona je možné napsat, že síly působící na kapalinu, jsou dány součinem hmotnosti a zrychlení [3]

$$F_1 = m_1\, \frac{dv_1}{dt_1}, \tag{2.64}$$

$$F_2 = m_2\, \frac{dv_2}{dt_2}. \tag{2.65}$$

Dosazením měřítek z rovnic (2.50), (2.52), (2.61) a (2.63) do rovnice (2.65) dostaneme vztah [3]

$$M_F\, F_2 = M_m\, m_2\, \frac{M_v\, dv_2}{M_t\, dt_2}. \tag{2.66}$$

Po podělení rovnice (2.66) rovnicí (2.64) vyjde vztah mezi měřítky [3]

$$M_F = M_m\, \frac{M_v}{M_t}. \tag{2.67}$$

Je-li $M_\rho$ měřítko měrné hmotnosti, potom platí

$$M_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1} \tag{2.68}$$

a

$$M_m = {M_L}^3\, M_\rho. \tag{2.69}$$

Po dosazení rovnic (2.69) a (2.53) do (2.67) vyjde vztah pro měřítko sil [3]

$$M_F = {M_L}^2\, M_\rho\, {M_v}^2, \tag{2.70}$$

v tom případě platí [3]

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{{L_2}^2\, \rho_2\, {v_2}^2}{{L_1}^2\, \rho_1\, {v_1}^2}, \tag{2.71}$$

po úpravě platí rovnost [3]

$$\frac{F_1}{\rho_1\, {v_1}^2\, {L_1}^2} = \frac{F_2}{\rho_2\, {v_2}^2\, {L_2}^2}, \tag{2.72}$$

a to je zjednodušeně [3]

$$\frac{F}{\rho\, v^2\, L^2} = idem. \tag{2.73}$$

Výraz na levé straně rovnice (2.73) se označuje jako Newtonovo číslo a celá rovnice (2.73) dle [3] vyjadřuje Newtonův obecný zákon podobnosti. Ten říká, že mají-li být

dvě proudění mechanicky podobná, musí mít zlomek v (2.73) stejnou hodnotu pro obě tato proudění.

Při proudění kapalin se uplatňují především síly tíže, tření a povrchové napětí. Všechny tyto tři síly působí společně, avšak v některých případech jeden druh sil značně převažuje nad jinými a proto můžeme ostatní zanedbat.

V případě, že síly tíže převažují nad ostatními, musí platit podobnost podle Froudova kritéria. [3]

$$\frac{v^2}{g\,L} = idem. \tag{2.74}$$

Rovnice (2.74) vyjadřuje dle [5] Froudeovův zákon podobnosti a výraz na její levé straně je Froeudovo číslo. Froudeovův zákon podobnosti se zohledňuje vždy při modelování proudění s volnou hladinou, to znamená u staveb jako jsou jezy a přelivy, proudění v říčních korytech, proudění mostními profily s volnou hladinou a také proudění vodními turbínami a čerpadly, účinky vln.

V případě, že nad ostatními silami značně převažují síly tření, je podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti, aby hodnota podle Reynoldsova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná. [3]

$$\frac{v\,L}{\nu} = idem. \tag{2.75}$$

Rovnice (2.75) vyjadřuje dle [5] Reynoldsův zákon podobnosti a výraz na její levé straně je Reynoldsovo číslo. Reynoldsův zákon podobnosti se zohledňuje vždy při modelování jevů neovlivněných existencí volné hladiny, jako je například tlakové proudění v potrubí a obtékání ponořených těles nebo částí staveb. [5]

V některých situacích převažuje také účinek povrchového napětí nad všemi ostatními silami, potom jsou příslušné síly dány násobkem povrchového napětí $\sigma$ a podmínkou podobnosti na modelu a ve skutečnosti je, aby hodnota podle Weberova kritéria pro model i pro skutečnost byla shodná [3]

$$\frac{\rho\,v^2\,L}{\sigma} = idem. \tag{2.76}$$

Weberovo číslo je též bezrozměrné.

Při modelování je zapotřebí vždy zohlednit převažující síly, které se v hydrodynamickém jevu uplatňují a měřítko podobnosti vztáhnout k odpovídající podobnosti. [5]

Dle [3], kromě zachování geometrické podobnosti modelu a příslušného silového kritéria, je ještě další důležitá podmínka hydraulické podobnosti a to podmínka podobnosti okrajových poměrů, nejčastěji rychlosti na vtoku do modelu a na výtoku z modelu, rychlostní pole by mělo být podobné rychlostnímu poli ve skutečnosti.

## 2.4 Popisná statistika

Ke zpracování řady naměřených dat je vhodné použít různých statistických veličin. V případě naměřených dat se jedná o diskrétní náhodnou veličinu, tedy konečnou množinu hodnot.[17]

Průměr datové řady $\{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$ je definován jako [17]

$$\bar{x} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{2.77}$$

je však citlivý na hrubé chyby, kdy jedna chybná vzdálená hodnota může může průměr výrazně změnit. Proto je někdy vhodné použít robustních charakteristik, které jsou méně citlivé na zadání chybné hodnoty.[17]

Jednou z nich je medián $\tilde{x}$ (Obr. 2.13), ten rozděluje statistický soubor vzestupně seřazených dat na dvě stejně početné poloviny. Pro datový soubor $\{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$ je definován jinak pro $n$ liché a jinak pro $n$ sudé [17]

$$\tilde{x} = x_{(n+1)/2}, \qquad \text{pro n-liché} \tag{2.78}$$

a

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{n/2+1}}{2} = x_{0,50}, \qquad \text{pro n-sudé.} \tag{2.79}$$

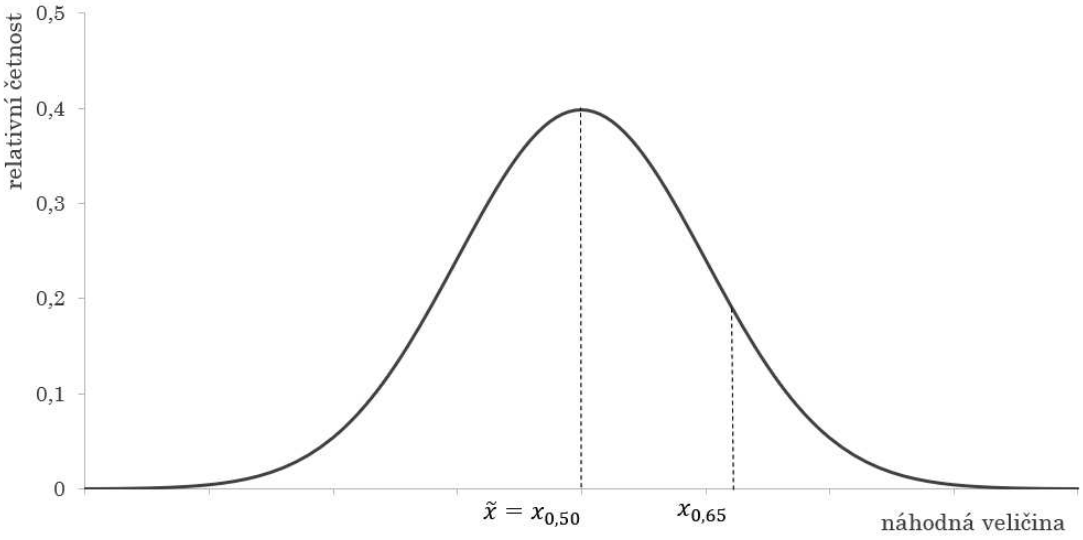
Kvantil slouží pro podrobnější popis datového souboru, rozděluje datový soubor na dvě části. V jedné jsou hodnoty souboru, které jsou menší či nejvýše rovny kvantilu a ve druhé jsou hodnoty větší než kvantil. Definujeme pro $P$, $0 < P < 1$, $P$-kvantil, respektive $100P\%$ kvantil, jako tu hodnotu $x_P$ ze souboru $\{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$, pro kterou je přibližně $100P\%$ hodnot ze souboru menších a $100(1-P)\%$ větších než $x_P$. Například medián je roven 50% kvantilu $\tilde{x} = x_{0,50}$ (Obr. 2.13).

Rozptyl $Var^2$ udává, jak moc jsou hodnoty ve statistickém soubory rozptýleny a spočítá se z rovnice

$$Var^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}). \tag{2.80}$$

Směrodatná je potom odmocninou z rozptylu

$$Var = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})}. \tag{2.81}$$




Obr. 2.13: Medián $\tilde{x}$ a kvantil $x_{0,65}$ znázorněny na grafu hustoty normálního rozdělení.

K vyhodnocení závislost zkoumaných veličin bylo využito hodnot koeficientu determinace $R^2$, ten umožňuje měřit velikost lineárního vztahu mezi dvěma veličinami bez ohledu na to, která je závislá a která je nezávislá a určí se podle vztahu [18]

$$R^2 = \frac{S_{reg}}{S_{yy}}, \tag{2.82}$$

kde $S_{reg}$ je regresní součet čtverců odchylek predikcí od průměru a $S_{yy}$ je celkový součet čtverců odchylek dat od průměru.

# 3 VYHODNOCENÍ HYDRAULICKÉHO ZATÍŽENÍ PŘELÉVANÉ MOSTOVKY NA FYZIKÁLNÍM MODELU

Tato práce se zabývá vyhodnocením hydraulického zatížení na přelévané mostovce na fyzikálním modelu, který byl postaven ve vodohospodářské laboratoři Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně v rámci úkolu „Vývoj hybridního železničního mostu rezistentního v záplavových územích“. Vyhodnocovaná měření byla uskutečněna v listopadu 2015.

## 3.1 Popis zkušební trati a fyzikálního modelu

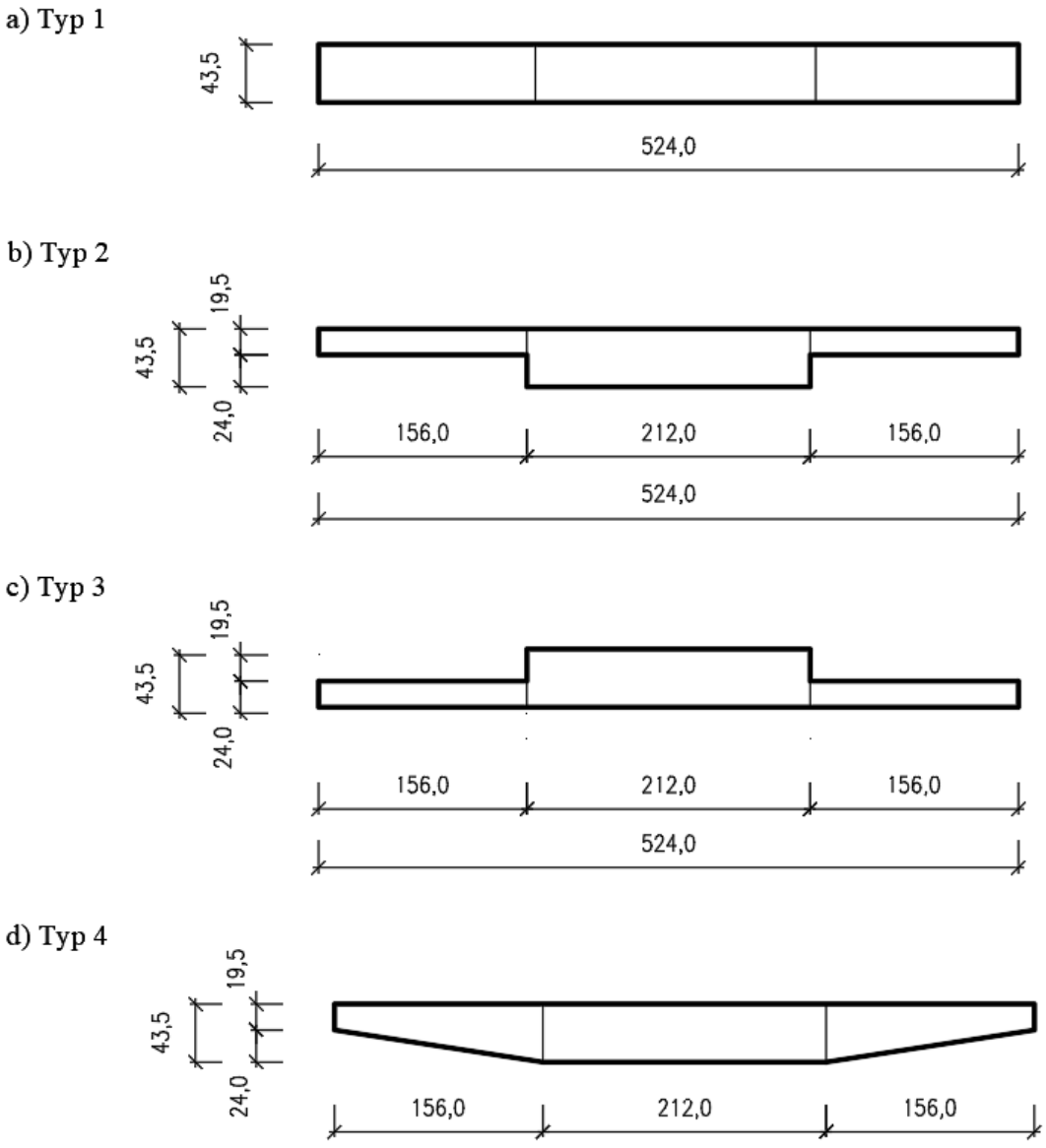
Měření byla provedena na laboratorním modelu mostovky v měřítku 1:12,5. Model byl osazen v hydraulickém sklopném žlabu šířky $b = 414$ mm a výšky 430 mm s průhlednými bočními stěnami, celkovou délkou 12 m a podélným sklonem 0°. Žlab je součástí hydraulického okruhu se zásobní nádrží, čerpadlem s měničem frekvence. Před samotným modelem mostovky se na začátku žlabu nejprve nachází 3,4 m dlouhý úsek vybaven síty a plovoucí deskou, za kterým následuje 5,3 m dlouhý úsek uklidňovacího kanálu. Z odpadního žlabu vytéká voda o volné hladině do odpadního kanálu. [15]

Samotný model mostovky v měřítku 1:12,5 byl vyroben z měkčeného PVC, označovaného jako „novodur“ a čirého polymetylmetakrylátu (PMMA) běžně označovaného jako „plexisklo“. Hlavní mostovka byla z plexiskla a boční lávky z novoduru. Mostovka byla umístěna rovnoběžně se dnem žlabu se světlou vzdáleností spodní hrany mostovky ode dna žlabu $a = 286$ mm. [15]

Měření byla provedena na modelu mostovky o čtyřech různých tvarech příčného průřezu, tvary a modely příčných průřezů modelů jsou znázorněny na obrázku (Obr. 3.1).

## 3.2 Použitá měřící technika

Pro měření silového zatížení modelu mostovky proudící vodou byly použity 4 siloměrné snímače (3 typu U9B/50N a jeden Q11/100N, viz Obr. 4.1) výrobce Hottinger Baldwin 11 Messtechnik (HBM), šesti-kanálová měřicí ústředna MGA výrobce HBM, osmi-kanálový čtrnácti-bitový A/D převodník UDAQ-1408 výrobce TEDIA a přenosný počítač se záznamovým softwarem. [15] Pro měření polohy hladiny byla použita dvě hloubková čidla, která byla též zapojena do šesti-kanálové měřicí ústředny




Obr. 3.1: Příčné řezy modelů mostovky: a) Typ 1 - mostovka s jednotnou tloušťkou vozovky i lávek, b) Typ 2 - mostovka s tenčími lávkami nahoře, c) Typ 3 - mostovka s tenčími lávkami dole, d) Typ 4 - mostovka s šikmými náběhy.

MGA.

Pro zavěšení modelu mostovky byl vyroben rám umožňující ustavení mostovky se siloměrnými snímači do volitelné vzdálenosti od dna žlabu (k tomu sloužily 4 závitové tyče M 10). Model mostovky byl volně zavěšen na třech ocelových lankách o průměru $\varnothing = 1,2$ mm, čímž byla definována polohová rovina mostovky. Na nátokové straně modelu byla dvě lanka, jejichž horní konce byly upevněny ke snímačům U9B a na odtokové straně modelu bylo jedno lanko s horním koncem upevněným ke snímači Q11. [15]

Boční vedení modelu mezi svislými skleněnými stěnami žlabu (šířka modelu je o 2 mm menší než šířka žlabu) zajišťovaly 4 zápustné šrouby M4 seřízené tak, aby boční vůle byla přibližně $0,5$ mm. Toto uspořádání zajišťovalo zanedbatelné tření mezi modelem a bočními stěnami žlabu při zachování minimální mezery. Podélné pohyby modelu znemožňoval ocelový drát o průměru $\varnothing = 1,6$ mm, který ve vzpěru přenášel horizontální síly z modelu na snímač U9B. Uložení snímače v úplavu a dostatečné vzdálenosti za mostovkou dávalo předpoklad neovlivnění proudových podmínek v těsném okolí modelu mostovky. Vzhledem k tomu, že tento snímač se během měření dostával pod hladinu vody, nebyla v tomto případě dostačující odolnost snímače proti odstřikující vodě, ale byla nutná odolnost proti dočasnému ponoření (IP67). [15]

Hloubková čidla byla osazena 10 mm před a 10 mm za modelem, déle pak byla měřena hloubka ve vzdálenosti 300 mm před modelem pomocí hrotového měřidla.

## 3.3 Kalibrace

Předtím, než se započne se samotným měřením, je nutné každý jednotlivý snímač nakalibrovat, to znamená zjistit vztah mezi naměřeným napětím [V] a silou [N]. Z toho důvodu byly zjištěny hmotnosti a tíhy jednotlivých částí modelů před zatopením a po statickém zatopení mostovky vodou. (Tab. 3.1)

Tab. 3.1: tíhy a hmotnosti jednotlivých typů modelu mostovky [15]

| typ mostovky | hmotnost [kg] | | | tíha [N] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | lávka | vozovka | celá mostovka | lávka | vozovka | celá mostovka |
| 1 | 4,2 | 5,0 | 13,5 | 41 | 49 | 132 |
| 2 | 1,9 | 5,0 | 8,8 | 19 | 49 | 86 |
| 3 | 1,9 | 5,0 | 8,8 | 19 | 49 | 86 |
| 4 | 3,1 | 5,0 | 11,1 | 30 | 49 | 109 |

Následně byly změřeny síly na snímačích v deseti úrovních hladiny stojící vody od hladiny těsně pod dolní hranou modelu, po hladinu těsně nad modelem. Tím bylo možné stanovit hodnoty pro hydrostatickou vztlakovou sílu pro uvedený rozsah zatopení mostovky. [15].

## 3.4 Postup měření

Velikost hydrodynamického zatížení bylo stanoveno pro šest různých průtoků (Tab. 3.2) a jim příslušných hloubek na modelech typu s jednotnou tloušťkou, šikmými náběhy a lávkami dole (Obr. 3.1) a pro osm různých průtoků na modelu s lávkami nahoře (Obr. 3.1) viz (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: $Q$ - zkušební průtok, $v$ - rychlost vody při zkušebním průtoku a $h$ - hloubka vody ve vzdálenosti 300 mm před modelem při zkušebním průtoku

| Číslo pokusu | Typ modelu | $Q$ $l \cdot s^{-1}$ | $v$ $m \cdot s^{-1}$ | $h$ m |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Jednotná tloušťka | 33,4 | 0,26 | 0,308 |
| 2 | | 37,3 | 0,27 | 0,330 |
| 3 | | 29,8 | 0,19 | 0,374 |
| 4 | | 49,1 | 0,38 | 0,310 |
| 5 | | 49,6 | 0,36 | 0,331 |
| 6 | | 50,6 | 0,33 | 0,374 |
| 7 | Šikmé náběhy | 33,4 | 0,26 | 0,307 |
| 8 | | 37,3 | 0,27 | 0,329 |
| 9 | | 29,8 | 0,19 | 0,374 |
| 10 | | 49,1 | 0,39 | 0,307 |
| 11 | | 49,6 | 0,36 | 0,330 |
| 12 | | 50,6 | 0,33 | 0,376 |
| 13 | Lávky dole | 33,4 | 0,26 | 0,305 |
| 14 | | 37,3 | 0,27 | 0,332 |
| 15 | | 29,8 | 0,19 | 0,373 |
| 16 | | 49,1 | 0,39 | 0,306 |
| 17 | | 49,6 | 0,36 | 0,333 |
| 18 | | 50,6 | 0,33 | 0,374 |
| 19 | Lávky nahoře | 33,5 | 0,27 | 0,300 |
| 20 | | 33,5 | 0,26 | 0,309 |
| 21 | | 37,3 | 0,28 | 0,328 |
| 22 | | 49,1 | 0,34 | 0,349 |
| 23 | | 49,1 | 0,34 | 0,352 |
| 24 | | 49,6 | 0,36 | 0,330 |
| 25 | | 50,7 | 0,33 | 0,374 |
| 26 | | 29,8 | 0,19 | 0,372 |

Kvůli odstranění časového a teplotního driftu, byly před započetím a po skončení měření každé sady dat, zaznamenány tzv. „nulové“ hodnoty silových snímačů při zatopení modelu stojící vodou. [15]

Po stabilizování zvolených průtokových a hladinových poměrů byla pro každý průtok provedena sada měření se vzorkovací frekvencí $300Hz$ po dobu 50 s, čímž bylo získáno 15 000 záznamů pro každý průtok a tvar modelu. Výstupem měření jsou tedy časové řady.

Řady naměřených napětí se následně pomocí kalibračních konstant převedou na síly.

$$F_1 = (U_0 - U_{vz,0})K_0, \tag{3.1}$$

$$F_2 = (U_2 - U_{vz,2})K_2, \tag{3.2}$$

$$F_3 = (U_3 - U_{vz,3})K_3 \quad \text{a} \tag{3.3}$$

$$F_4 = (U_4 - U_{vz,4})K_4, \tag{3.4}$$

kde $F_1$ je vodorovná síla a $F_2 - F_4$ jsou svislé síly na jednotlivých snímačích, $U_0$ je napětí naměřeně na snímači vodorovné síly, $U_2 - U_4$ jsou napětí naměřená na snímačích svislé síly, $U_{vz,0}, U_{vz,2}, U_{vz,3}, U_{vz,4}$ jsou odpočty výchozích nastavení snímačů při zatopení modelu stojící vodou a $K_0, K_2, K_3, K_4$ značí kalibrační konstanty.

## 3.5 Postup vyhodnocení výsledků

Podle kladné konvence sil znázorněné na (Obr. 2.12) je velikost vodorovné výslednice sil shodná se silou $F_1$

$$F_x = F_1. \tag{3.5}$$

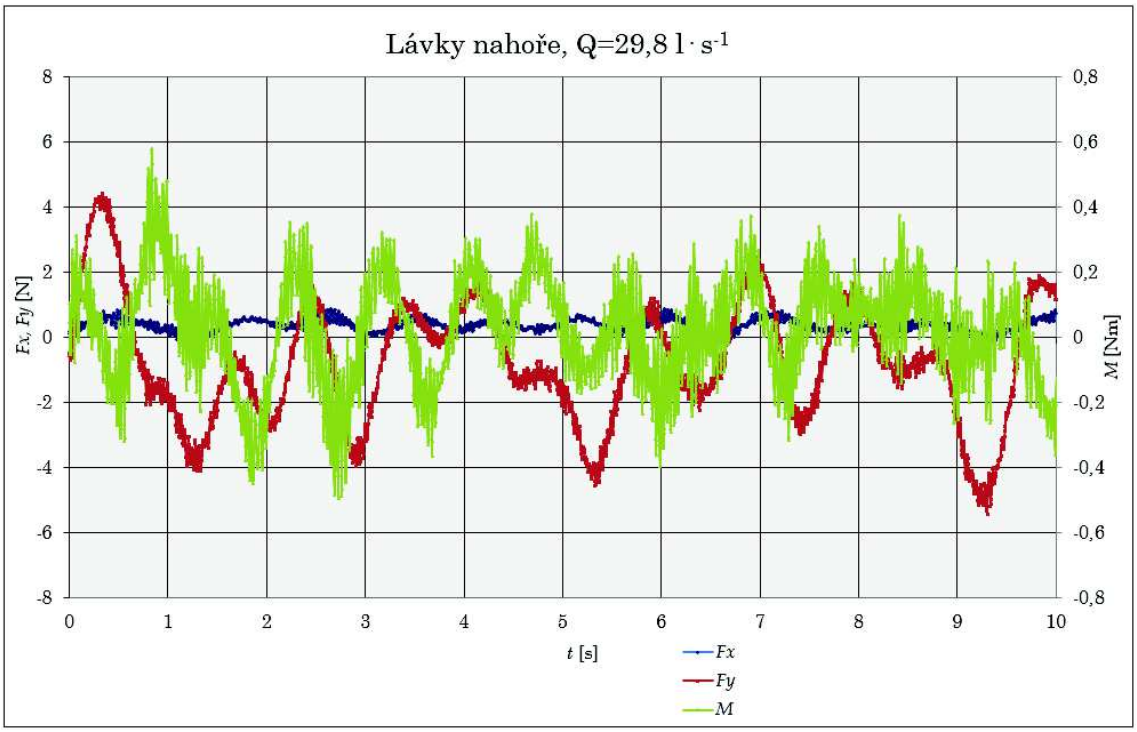
a velikost svislé výslednice sil (Obr. 2.12) se stanoví ze vztahu

$$F_y = -(F_2 + F_3 + F_4). \tag{3.6}$$

Moment k težišťové ose (Obr. 2.12) od vertikálních sil je výrazně větší, než od horizontální síly $M(F_2, F_3, F_4) \gg M(F_1)$, proto je možné moment od horizontální síly $M(F_1)$ zanedbat. Velikost momentu k težišťové ose se vypočte jako

$$M = r_y\,(F_4 - F_2 - F_3), \tag{3.7}$$

kde $r_y$ je rameno vertikálních sil s velikostí $r_y = 250$ mm. Tímto způsobem jsme získali časové řady sil $F_x$, $F_y$ a momentu $M$. V grafu na (Obr. 3.2) je uveden průběh hydrodynamického zatížení na modelu s lávkami nahoře při průtoku $Q = 29,8\ l \cdot s^{-1}$ a časovém úseku $t = 10$ s.




Obr. 3.2: Graf průběhu $F_x$, $F_y$ a $M$ na modelu s lávkou nahoře a průtokem $Q = 29,8\ l \cdot s^{-1}$, pro názornost časový úsek o délce 10 s

Kromě sil byly též měřeny polohy hladiny v profilu před a za modelem a to ve vzdálenostech 300 mm před (Tab. 3.2), 10 mm před a 10 mm za modelem. Rozdíl hloubek před a za modelem je dán vztahem

$$\Delta H = H_1 - H_2, \tag{3.8}$$

kde $H_1$ je hloubka měřená ve vzdálenosti 10 mm před modelem a hloubka $H_2$ je hloubka 10 mm za modelem.

Ze získaných řad sil, momentů a rozdílů hladin byly následně pro každý průtok a typ mostovky určeny jejich mediány $F_{x,0,50}$, $F_{y,0,50}$, $M_{0,50}$ a $\Delta H_{0,50}$, 95% kvantily $F_{x,0,95}$, $F_{y,0,95}$, $M_{0,95}$ a $\Delta H_{0,95}$ a 5% kvantily $F_{x,0,05}$, $F_{y,0,05}$, $M_{0,05}$ a a $\Delta H_{0,05}$. Pomocí těchto charakteristik jsou vyjádřeny vlastnosti datových řad měřených veličin.

Pro všechny veličiny byla zjišťována závislost 95%, resp. 5% kvantilu na mediánu. Při bezchybném měření dostatečného počtu dat, by měla regresní přímka proložená těmito daty procházet počátkem SS[1]. Ve skutečnosti je ovšem měření

[1]soustava souřadnic

téměř vždy zatíženo určitými chybami, potom je potřeba zjistit, čím jsou chyby v měření způsobeny a následně se pokusit tyto chyby minimalizovat, či alespoň snížit. K tomuto účelu bylo využito vhodných podobnostních (bezrozměrných) čísel pro úpravu 95%, resp. 5% kvantilu a následně se posoudila upravená závislost kvantilu a mediánu. Pro úpravu dat byla použita tato podobnostní čísla: Reynoldsovo číslo $Re$, který bylo ve dvou různých modifikacích

$$Re(D) = \frac{v_0\, D}{\nu} \tag{3.9}$$

a

$$Re(R) = \frac{v_0\, R}{\nu} \tag{3.10}$$

kde $D$ je omočený obvod profilu mostovky, a $R$ je hydraulický poloměr žlabu, Froudovo číslo $Fr$

$$Fr = \frac{{v_0}^2}{g\, D}, \tag{3.11}$$

poměrné zatopení $h^*$

$$h^* = \frac{h_h - a}{h_m}, \tag{3.12}$$

kde $a$ je světlá výška mostního otvoru a $h_m$ je výška mostovky, Newtonovo číslo $X$ a různé jejich kombinace.

$$X = \frac{M}{\rho\, v^2\, D^2\, r_x}. \tag{3.13}$$

Data byla vyhodnocena graficky, využitím lineární regrese, kdy byla body v grafu proložena regresní přímka, která se ukotvila k počátku a její rovnice tak má tvar

$$y = k\, x, \tag{3.14}$$

kde $k$ je směrnice regresní přímky. Po úpravě kvantilu podobnostním číslem, nebo kombinací podobnostních čísel má pak rovnice tvar

$$y\, \gamma = k\, x, \tag{3.15}$$

resp.

$$y = \frac{k\, x}{\gamma}, \tag{3.16}$$

kde $\gamma$ označuje použité podobnostní číslo, nebo kombinaci podobnostních čísel, $y$ je horní, nebo dolní kvantil a $x$ je medián.

Posouzení je možné provézt vizuálně podle polohy bodů vzhledem k regresní přímce, zda jsou data rozmístěna rovnoměrně po obou stranách přímky nebo zda

jsou data znatelně rozmístěna po jedné straně přímky více než po druhé. Další možností je posouzení podle hodnoty koeficientu determinace $R^2$. Podle toho je možné rozhodnout které podobnostní číslo má u té, které veličiny největší vliv na zvýšení závislost mezi kvantilem a mediánem.

## 3.6 Porovnání vlivu tvaru mostovky na jednotlivé veličiny

V prvním kroku byl zkoumán vliv jednotlivých tvarů mostovky na velikost hydrodynamického zatížení a rozdíl hladin v profilu těsně před a za mostem a to závislosti mezi 95% kvantilem a mediánem a 5% kvantilem a mediánem měřených veličin. Ze získaných grafů je možné zjistit vliv tvaru mostovku na danou veličinu.

### 3.6.1 Horizontální síla $F_x$

V případě horizontální síly $F_x$ (Tab. 3.3)je prokázána silná závislost mezi nejvyššími dosahovanými hodnotami, tedy kvantilem $F_{x,0,95}$ a mediánem $F_{x,0,50}$ u všech typů modelu. Nejvyšší závislost je však u modelu s lávkami nahoře a s lávkami dole, jak je znázorněno v grafech na (Obr. 3.3 c) a 3.3 d)).

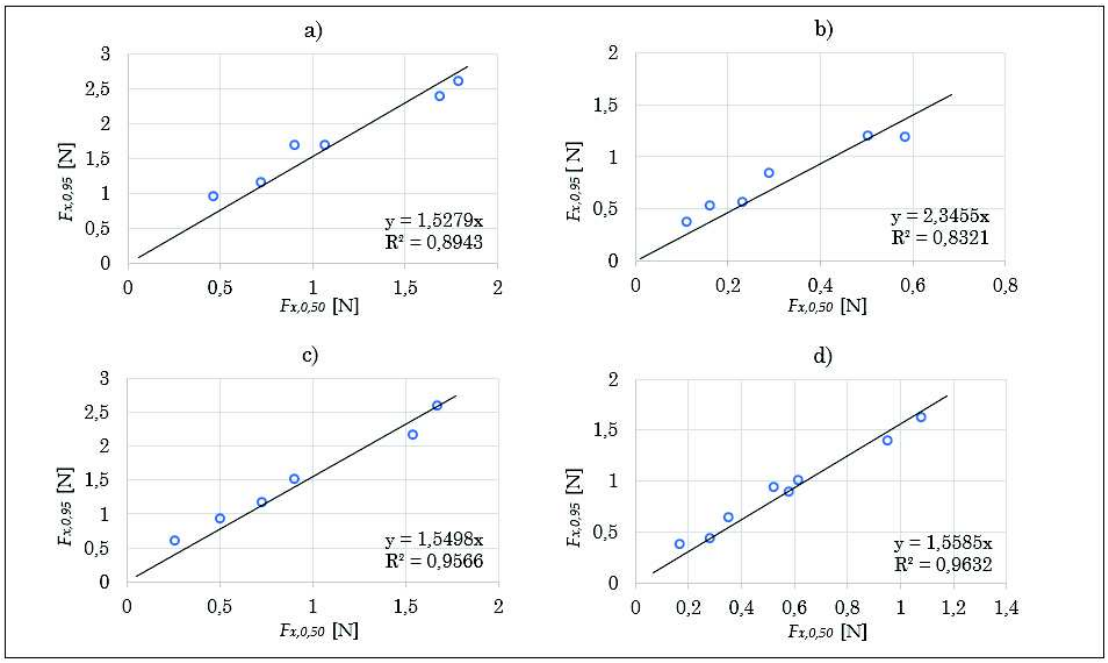
Oproti tomu u nejnižších naměřených hodnot $F_{x,0,05}$ je závislost na mediánu $F_{x,0,50}$ o poznání nižší (Obr. 3.4). Zejména pak v případě modelu se šikmými náběhy je veliká rozkolísanost dat a hodnota spolehlivosti $R^2$ pro $F_{x,0,05}$ a $F_{x,0,50}$ má v tomto případě zápornou hodnotu, konkrétně $R^2 = -1,412$. Hodnoty spolehlivosti $R^2$ pro ostatní případy jsou uvedeny v grafech na (Obr. 3.4 a 3.4)

Kromě toho je patrné, že hodnoty $F_{x,0,95}$ jsou vždy kladné, oproti tomu hodnoty $F_{x,0,05}$ pohybující se více kolem nuly do v některých případech do záporných hodnot sklouznou. Zejména pak opět model se šikmými náběhy, u kterého se již převážná většina $F_{x,0,05}$ pohybuje v záporných hodnotách. Z toho je možné usoudit, že model se šikmými náběhy je náchylnější na vznik podtlaků za modelem, čímž dochází k většímu chvění modelu a tím pádem větší rozkolísanosti dat.

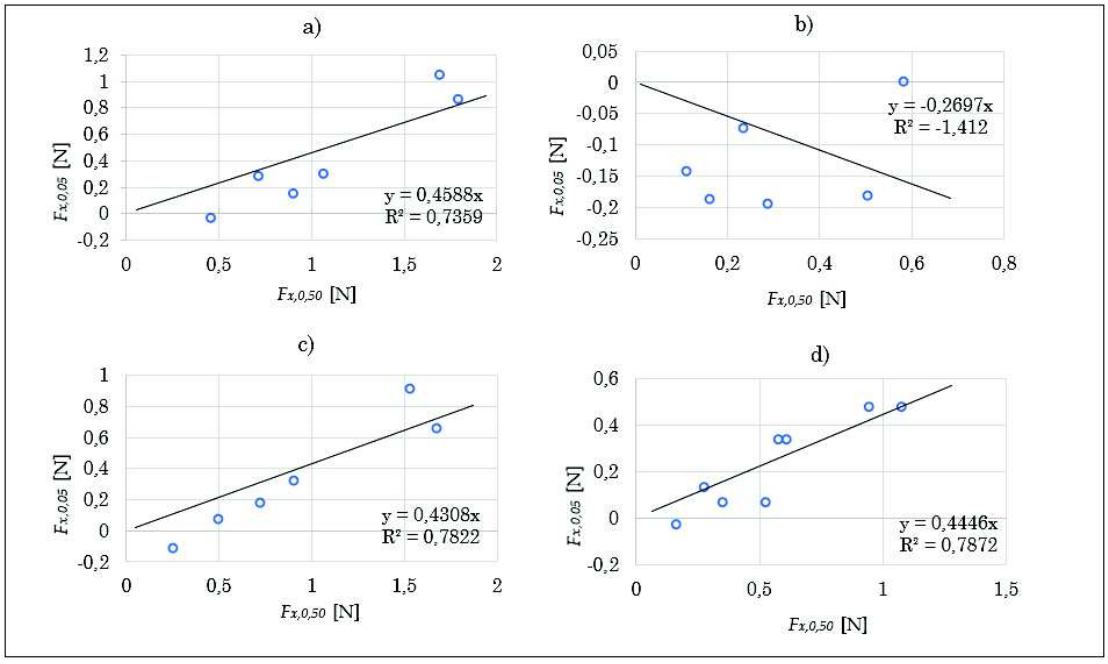
Nicméně u modelu se šikmými náběhy dosahuje síla $F_x$ nejnižších absolutních hodnot jak v případě $F_{x,0,95}$, tak v případě $F_{x,0,05}$. To ukazuje, že tvar mostu se šikmými náběhy je hydraulicky vhodnější, než ostatní zkoumané tvary.

Tab. 3.3: kvantil $F_{x,0,95}$, kvantil $F_{x,0,05}$ a medián $F_{x,0,50}$ horizontální síly $F_x$ pro jednotlivé modely mostovky

| Číslo pokusu | Typ modelu | $F_{x,\,0,95}$ N | $F_{x,\,0,50}$ N | $F_{x,\,0,05}$ N |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Jednotná tloušťka | 0,958 | 0,457 | -0,032 |
| 2 | | 1,684 | 1,059 | 0,308 |
| 3 | | 1,168 | 0,715 | 0,287 |
| 4 | | 1,689 | 0,899 | 0,152 |
| 5 | | 2,605 | 1,788 | 0,871 |
| 6 | | 2,398 | 1,686 | 1,052 |
| 7 | Šikmé náběhy | 0,372 | 0,110 | -0,140 |
| 8 | | 0,851 | 0,287 | -0,193 |
| 9 | | 0,528 | 0,160 | -0,186 |
| 10 | | 0,578 | 0,232 | -0,071 |
| 11 | | 1,184 | 0,583 | 0,002 |
| 12 | | 1,198 | 0,503 | -0,180 |
| 13 | Lávky dole | 0,604 | 0,251 | -0,112 |
| 14 | | 1,507 | 0,903 | 0,325 |
| 15 | | 0,928 | 0,494 | 0,070 |
| 16 | | 1,172 | 0,722 | 0,178 |
| 17 | | 2,604 | 1,668 | 0,654 |
| 18 | | 2,176 | 1,530 | 0,913 |
| 19 | Lávky nahoře | 0,369 | 0,165 | -0,028 |
| 20 | | 0,438 | 0,277 | 0,128 |
| 21 | | 0,935 | 0,523 | 0,067 |
| 22 | | 1,008 | 0,613 | 0,333 |
| 23 | | 0,895 | 0,580 | 0,334 |
| 24 | | 1,617 | 1,078 | 0,478 |
| 25 | | 1,396 | 0,947 | 0,478 |
| 26 | | 0,640 | 0,350 | 0,065 |




Obr. 3.3: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře




Obr. 3.4: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře

### 3.6.2 Vertikální síla $F_y$

Vertikální síla $F_y$ představuje doplněk doplněk k hydrostatické vztlakové síle působící na mostovku. Při převážné většině průtoků nabývá $F_y$ (Tab. 3.4) záporných hodnot krajního kvantilu $F_{y,0,95}$ (Obr. 3.5), to ukazuje že při obtékání mostovky se její výsledná vztlaková síla zmenší.

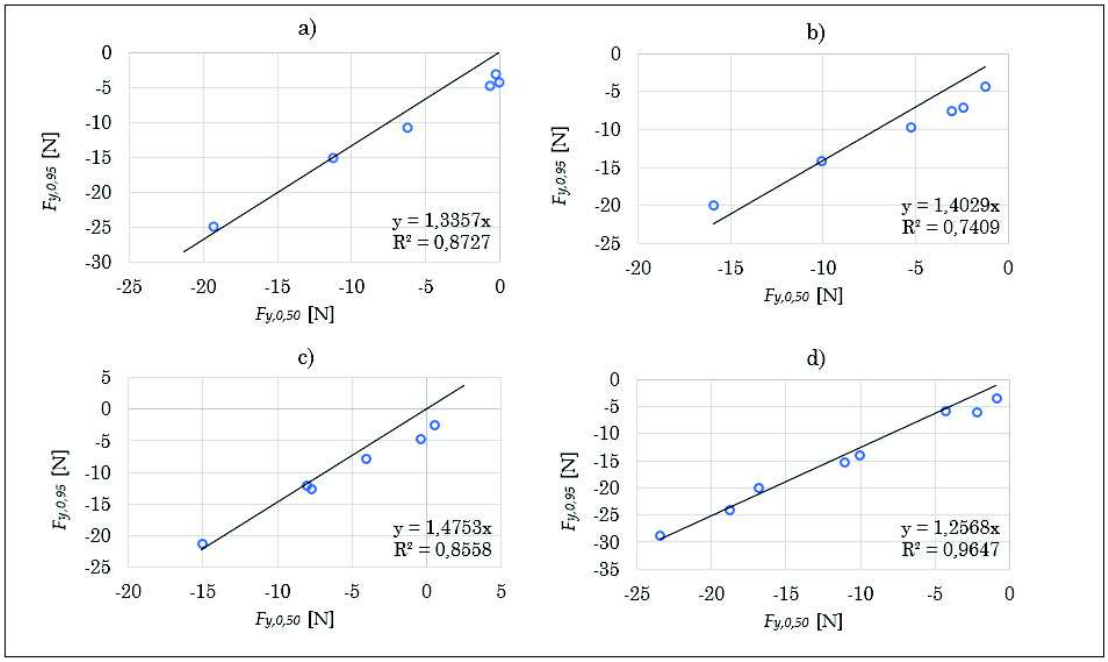
Nejvyšší závislost mezi kvantilem $F_{y,0,95}$ a mediánem $F_{y,0,50}$ vykazuje na modelu s lávkami nahoře, kde je hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,96$ (Obr. 3.5 d)). Zároveň nabývá $F_{y,0,95}$ v případě modelu s lávkami nahoře nejvyšších hodnot, oproti tomu nejodolnější z hlediska vztlakové síly $F_y$ se jeví model se šikmými náběhy a lávkami dole (Obr. 3.5 b), c)).

Vertikální síla v oblasti $F_{y,0,05}$ nabývají při některých průtocích kladných hodnot, a to především při nízké rychlosti a malé hloubce zatopení (Tab. 3.2), což představuje nadlehčení mostu.

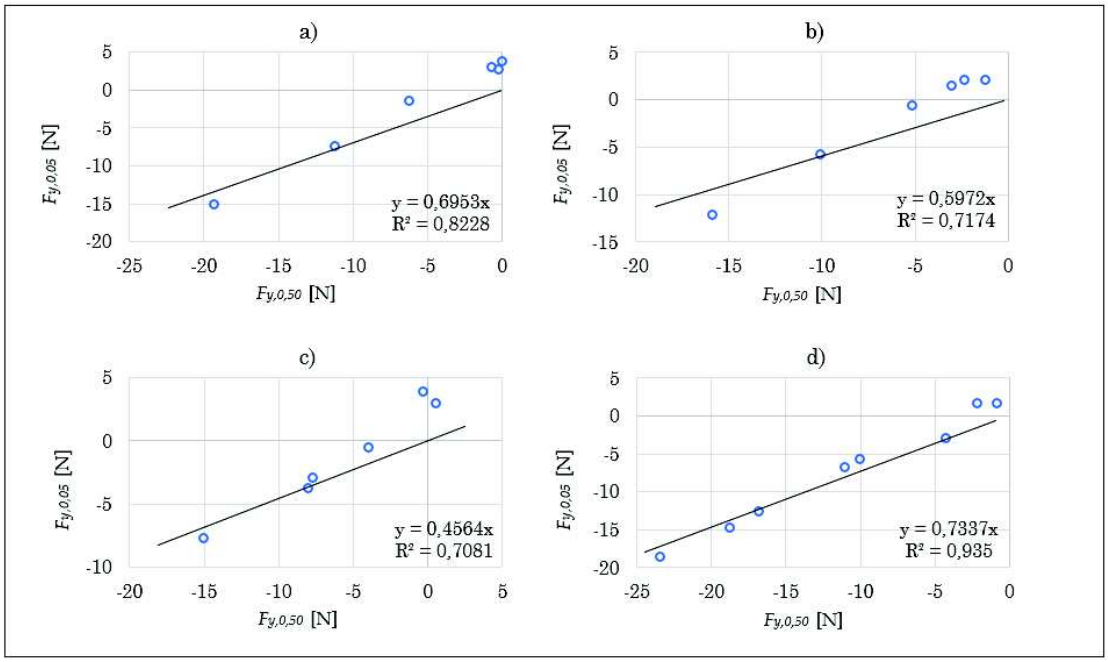
Závislost kvantilu $F_{y,0,05}$ a mediánu $F_{y,0,50}$ je opět nejvyšší u modelu s lávkami nahoře (Obr. 3.6 d)). Kvůli vlnění hladiny a chvění modelu jsou vždy hodnoty $F_{y,0,05}$ rozkolísanější, než hodnoty $F_{y,0,95}$.

Tab. 3.4: kvantil $F_{y,0,95}$, kvantil $F_{y,0,05}$ a medián $F_{y,0,50}$ vertikální síly $F_y$ pro jednotlivé modely mostovky

| Číslo pokusu | Typ modelu | $F_{y,\,0,95}$ N | $F_{y,\,0,50}$ N | $F_{y,\,0,05}$ N |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Jednotná tloušťka | -4,261 | -0,056 | 3,959 |
| 2 | | -15,098 | -11,308 | -7,300 |
| 3 | | -3,091 | -0,318 | 2,794 |
| 4 | | -10,687 | -6,249 | -1,314 |
| 5 | | -24,868 | -19,331 | -14,948 |
| 6 | | -4,741 | -0,735 | 3,058 |
| 7 | Šikmé náběhy | -7,154 | -2,384 | 2,196 |
| 8 | | -14,297 | -10,094 | -5,662 |
| 9 | | -4,284 | -1,251 | 2,154 |
| 10 | | -9,757 | -5,200 | -0,569 |
| 11 | | -20,079 | -15,942 | -12,019 |
| 12 | | -7,579 | -3,087 | 1,612 |
| 13 | Lávky dole | -7,758 | -4,047 | -0,451 |
| 14 | | -11,942 | -8,082 | -3,665 |
| 15 | | -2,441 | 0,496 | 3,017 |
| 16 | | -12,647 | -7,770 | -2,889 |
| 17 | | -21,145 | -15,081 | -7,624 |
| 18 | | -4,662 | -0,394 | 3,943 |
| 19 | Lávky nahoře | -5,698 | -4,279 | -2,901 |
| 20 | | -13,929 | -10,073 | -5,515 |
| 21 | | -15,255 | -11,093 | -6,592 |
| 22 | | -28,638 | -23,489 | -18,543 |
| 23 | | -19,911 | -16,879 | -12,448 |
| 24 | | -23,898 | -18,805 | -14,597 |
| 25 | | -5,913 | -2,246 | 1,720 |
| 26 | | -3,434 | -0,892 | 1,763 |




Obr. 3.5: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře




Obr. 3.6: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře

### 3.6.3 Moment $M$

Na všech typech modelu, při všech průtocích nabývá největší moment $M$, tedy kvantil $M_{0,95}$ záporných hodnot (Obr. 3.9). To znamená, že hydrodynamická síla vyvozuje moment opačného směru, než jak je vyznačen na (Obr. 2.12). To pravděpodobně způsobuje skutečnost, že větší vztlaková síla působí obecně na přední část mostu.

Na rozdíl od ostatních modelů, opět model se šikmými náběhy nevykazuje přímou lineární závislost mezi $M_{0,95}$ a $M_{0,50}$. U ostatních typů modelu jsou hodnoty značně závislé.

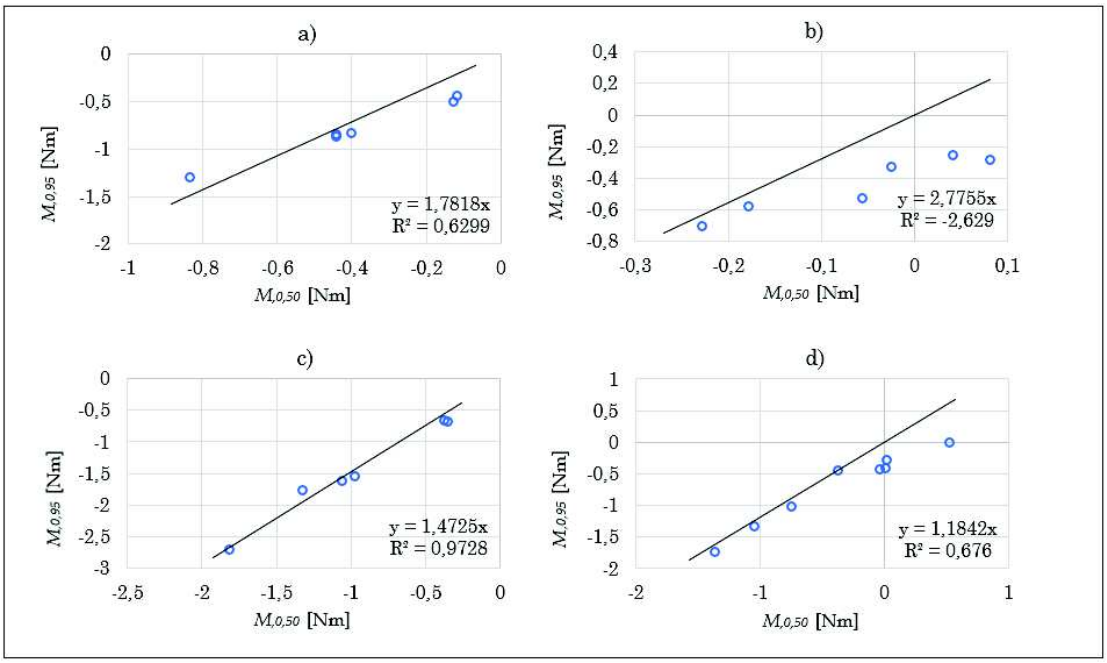
Protože proudění vody způsobuje kmitání modelu, moment s v čase mění. To způsobuje, že kvantil momentu $M_{0,05}$ nabývá u většiny modelů též záporných hodnot. Pouze model se šikmými náběhy (Obr. 3.10 b)) je pří všech průtocích i v případě $M_{0,05}$ v kladných hodnotách.

Ani v případě $M_{0,05}$ a $M_{0,50}$ nevykazuje moment na modelu se šikmými náběhy lineární závislost v případě, kdy je regresní přímka ukotvena k počátku. Tato závislost je prokázána pouze u modelu s lávkami dole (Obr. 3.10 c), d)).

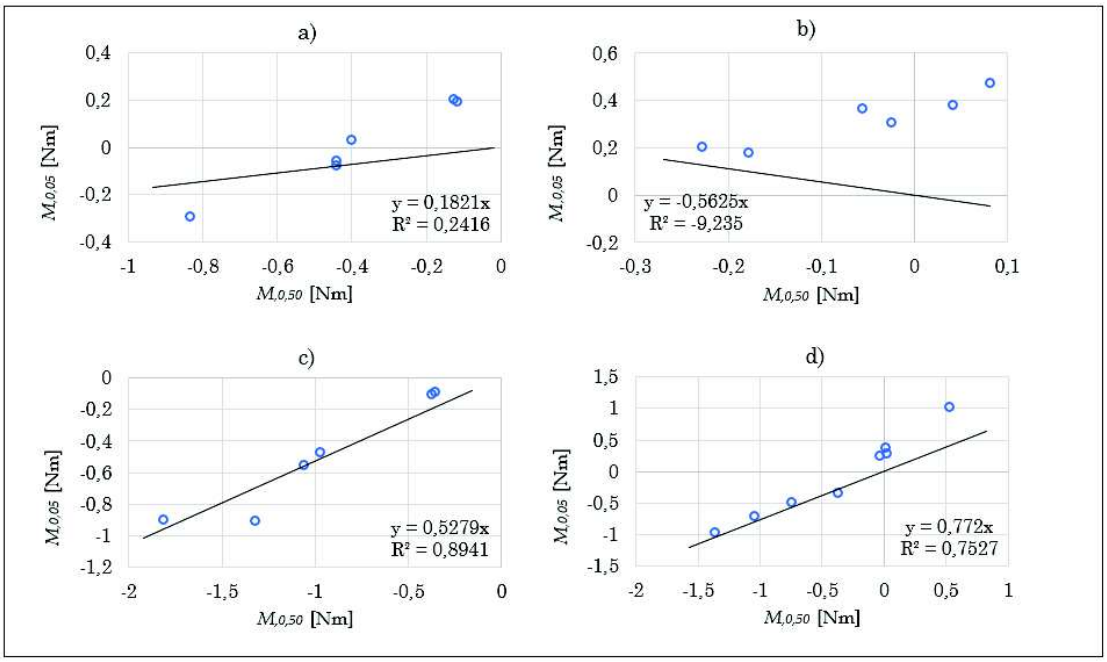
Stejně jako v případě vertikální síly $F_y$, vyvozuje hydrodynamické zatížení nejnižší hodnoty momentu $M_{0,95}$ a zároveň nejmenší rozdíly mezi $M_{0,95}$ a $M_{0,05}$ na modelu se šikmými náběhy (Obr. 3.9 b)). Z těchto důvodu se tato konstrukce jeví opět jako nejvhodnější z hlediska nejnižšího odporu.

Tab. 3.5: kvantil $M_{0,95}$, kvantil $M_{0,05}$ a medián $M_{0,50}$ horizontální síly $M$ pro jednotlivé modely mostovky

| Číslo pokusu | Typ modelu | $M_{0,95}$ Nm | $M_{0,50}$ Nm | $M_{0,05}$ Nm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Jednotná tloušťka | -0,491 | -0,128 | 0,207 |
| 2 | | -0,860 | -0,443 | -0,072 |
| 3 | | -0,438 | -0,118 | 0,199 |
| 4 | | -0,829 | -0,402 | 0,036 |
| 5 | | -1,296 | -0,835 | -0,289 |
| 6 | | -0,841 | -0,443 | -0,055 |
| 7 | Šikmé náběhy | -0,253 | 0,040 | 0,384 |
| 8 | | -0,574 | -0,179 | 0,182 |
| 9 | | -0,325 | -0,026 | 0,310 |
| 10 | | -0,280 | 0,081 | 0,479 |
| 11 | | -0,697 | -0,229 | 0,205 |
| 12 | | -0,525 | -0,057 | 0,367 |
| 13 | Lávky dole | -0,668 | -0,359 | -0,084 |
| 14 | | -1,531 | -0,980 | -0,466 |
| 15 | | -0,657 | -0,377 | -0,097 |
| 16 | | -1,617 | -1,062 | -0,549 |
| 17 | | -2,698 | -1,821 | -0,892 |
| 18 | | -1,760 | -1,328 | -0,902 |
| 19 | Lávky nahoře | -0,429 | -0,378 | -0,328 |
| 20 | | -1,010 | -0,752 | -0,484 |
| 21 | | -0,419 | -0,041 | 0,265 |
| 22 | | -1,732 | -1,368 | -0,950 |
| 23 | | -1,313 | -1,048 | -0,691 |
| 24 | | -0,001 | 0,519 | 1,042 |
| 25 | | -0,402 | 0,004 | 0,393 |
| 26 | | -0,265 | 0,017 | 0,292 |




Obr. 3.7: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře




Obr. 3.8: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře

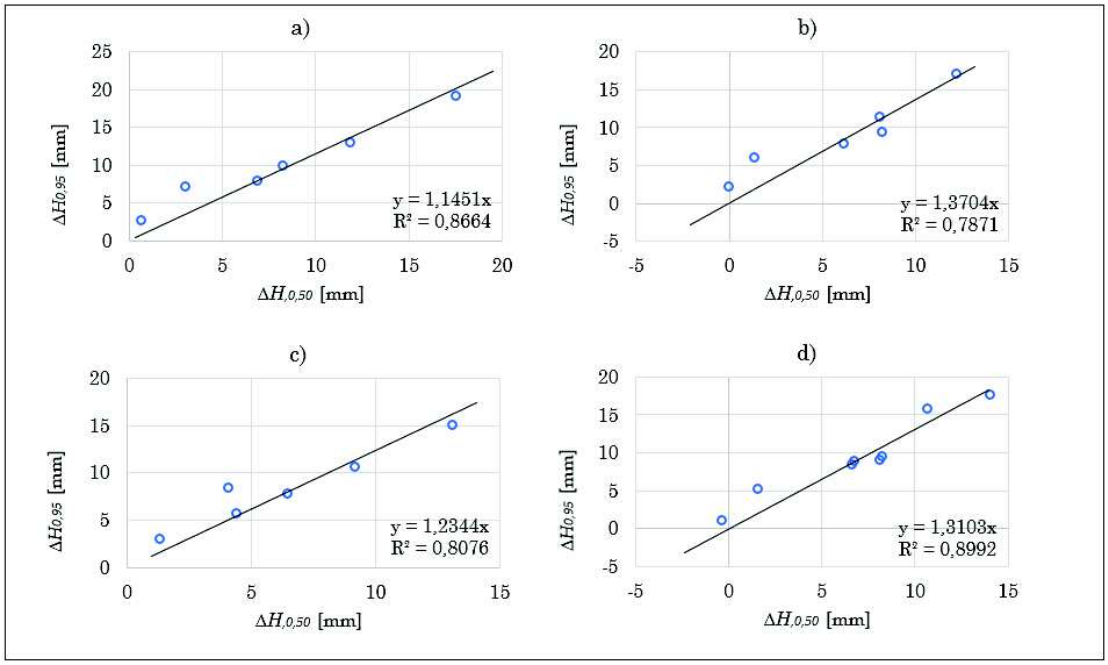
### 3.6.4 Rozdíl hloubek před a za modelem $\Delta H$

Kvůli vzdutí vody modelem je hloubka téměř vždy větší těsně před modelem než těsně za modelem, z toho důvodu nabývá při všech průtocích kvantil $\Delta H_{0,95}$ kladných hodnot (Tab 3.6) a (Obr 3.9). Výskyt několika málo záporných hodnot mediánu $\Delta H_{0,50}$ a kvantilu $\Delta H_{0,05}$ je způsoben vlněním hladiny, díky čemuž se může stát, že hloubka za modelem bude v některých případech větší, než před ním.

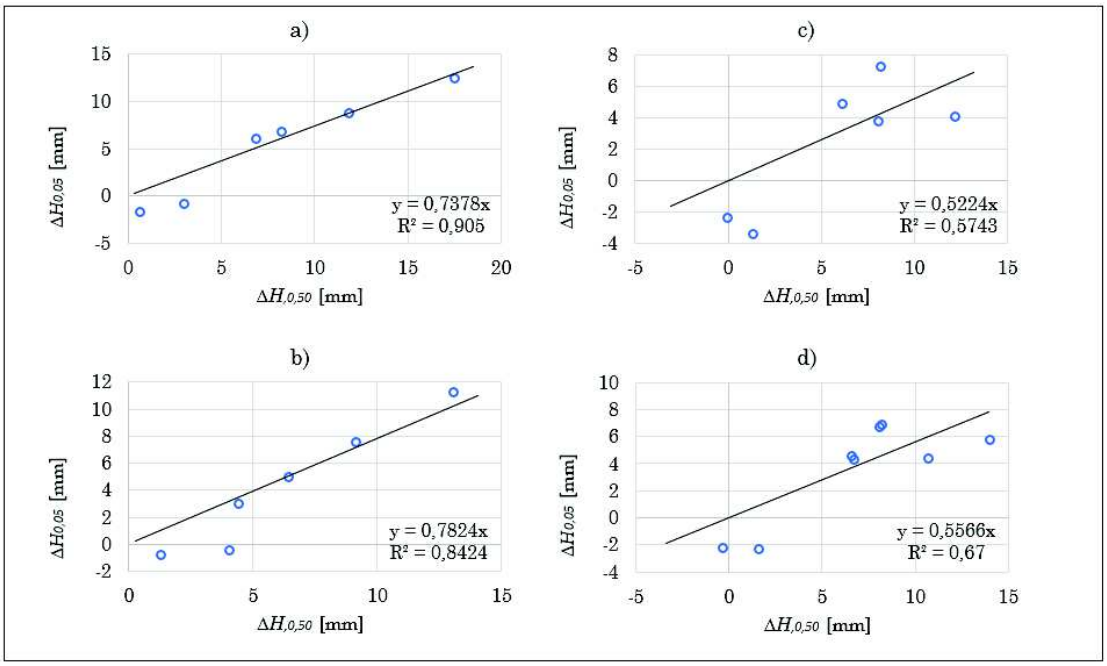
Vztah mezi $\Delta H_{0,95}$ a $\Delta H_{0,50}$ (Obr.3.9) vykazuje na všech typech modelu lineární závislost. Pouze u modelu se šikmými náběhy a lávkami nahoře je závislost mezi $\Delta H_{0,05}$ a $\Delta H_{0,50}$ poněkud nižší (Obr.3.10).

Tab. 3.6: kvantil $\Delta H_{0,95}$, kvantil $\Delta H_{0,05}$ a medián $\Delta H_{0,50}$ horizontální síly $\Delta H$ pro jednotlivé modely mostovky

| Číslo pokusu | Typ modelu | $\Delta H_{0,95}$ mm | $\Delta H_{0,50}$ mm | $\Delta H_{0,05}$ mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Jednotná tloušťka | 13,064 | 11,797 | 8,856 |
| 2 | | 7,940 | 6,809 | 6,126 |
| 3 | | 2,868 | 0,596 | -1,570 |
| 4 | | 19,208 | 17,485 | 12,560 |
| 5 | | 10,086 | 8,191 | 6,832 |
| 6 | | 7,245 | 2,967 | -0,709 |
| 7 | Šikmé náběhy | 11,558 | 8,013 | 3,791 |
| 8 | | 7,922 | 6,130 | 4,936 |
| 9 | | 2,243 | -0,069 | -2,299 |
| 10 | | 17,182 | 12,181 | 4,136 |
| 11 | | 9,572 | 8,152 | 7,280 |
| 12 | | 6,079 | 1,283 | -3,326 |
| 13 | Lávky dole | 10,649 | 9,125 | 7,567 |
| 14 | | 5,830 | 4,379 | 3,031 |
| 15 | | 3,141 | 1,274 | -0,731 |
| 16 | | 15,149 | 13,048 | 11,299 |
| 17 | | 7,939 | 6,429 | 5,059 |
| 18 | | 8,512 | 4,041 | -0,402 |
| 19 | Lávky nahoře | 8,484 | 6,550 | 4,606 |
| 20 | | 9,075 | 6,714 | 4,331 |
| 21 | | 9,225 | 8,041 | 6,727 |
| 22 | | 17,804 | 13,980 | 5,836 |
| 23 | | 15,912 | 10,659 | 4,397 |
| 24 | | 9,683 | 8,190 | 6,903 |
| 25 | | 5,267 | 1,542 | -2,255 |
| 26 | | 1,107 | -0,395 | -2,227 |




Obr. 3.9: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře




Obr. 3.10: Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře

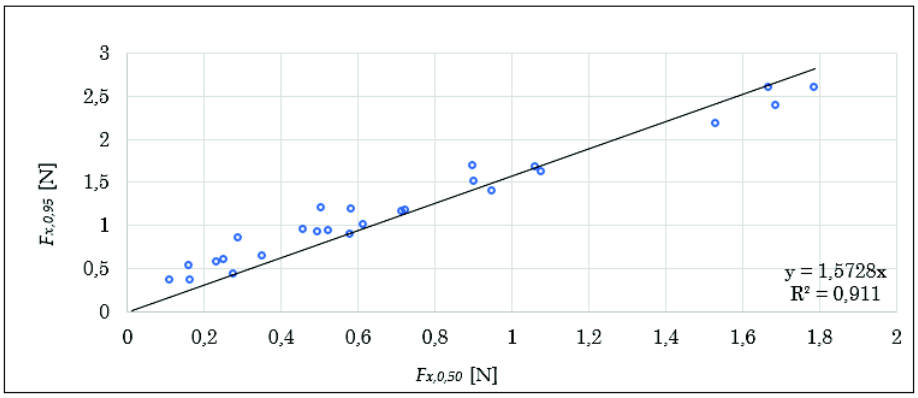
## 3.7 Vyhodnocení hydrodynamického zatížení po úpravě podobnostními čísly

Všechny složky hydrodynamického zatížení a rozdíl hladin před a za modelem byly vždy vyhodnoceny z hlediska závislosti na různých podobnostních číslech. Snažili jsme se dosáhnout co největší lineární závislosti mezi 95%, resp. 5% kvantilem a mediánem zkoumané veličiny, tak aby bylo možné stanovit mezi nimi vztah dle rovnic (3.15 a 3.16), které jsou rovnicemi lineární regresní křivky ukotvené k počátku SS. Za $y$ byl dosazen 95%, resp. 5% kvantil zkoumané veličiny a za $x$ byl dosazen medián zkoumané veličiny.

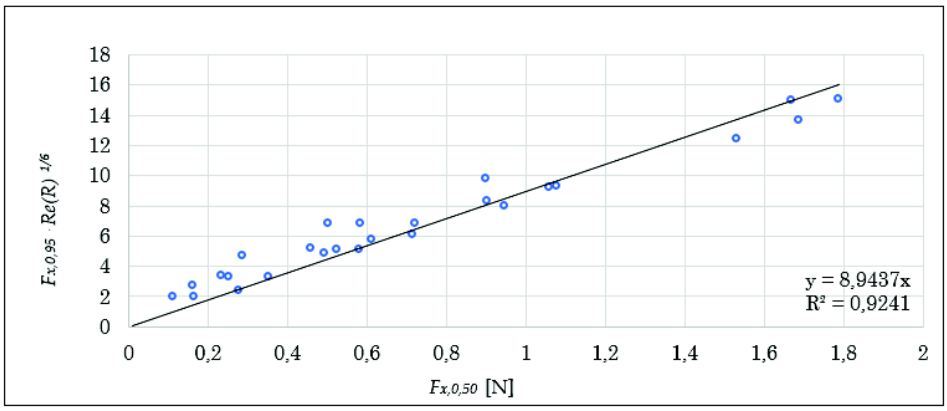
### 3.7.1 Horizontální síla $F_x$

**Vztah mezi $F_{x,0,95}$ a $F_{x,0,50}$**

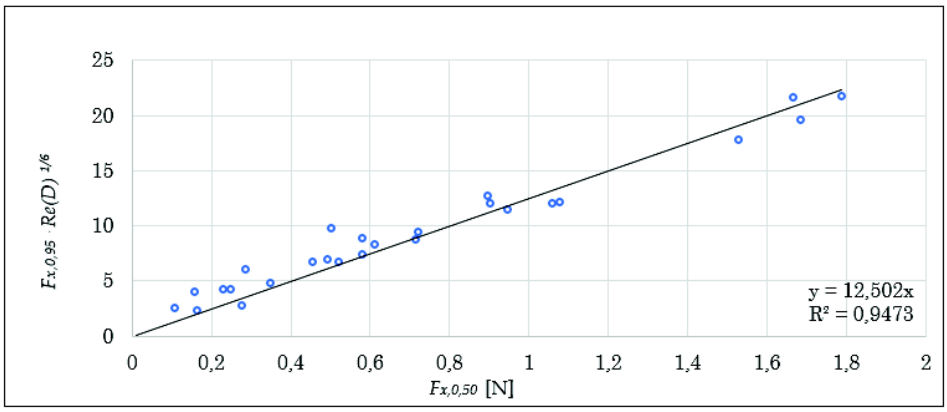
Při testování závislostí kvantilu $F_{x,0,95}$ na různých podobnostních čísel, vycházeli v případě horizontální síly $F_x$ nejlépe úpravy pomocí $Re(R)^{1/6}$, $Re(D)^{1/6}$, $Fr^{1/2}$ a $h^{*1/6}$, jak je znázorněno v grafech na (Obr. 3.11-3.15). Nejvyšší závislost vykazují data po úpravě $F_{x,0,95}$ pomocí $Re(D)^{1/6}$ (Obr. 3.13).



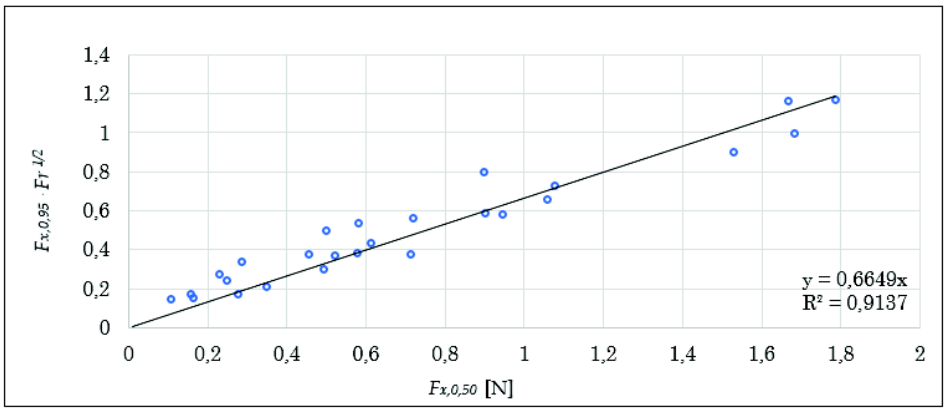

Obr. 3.11: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



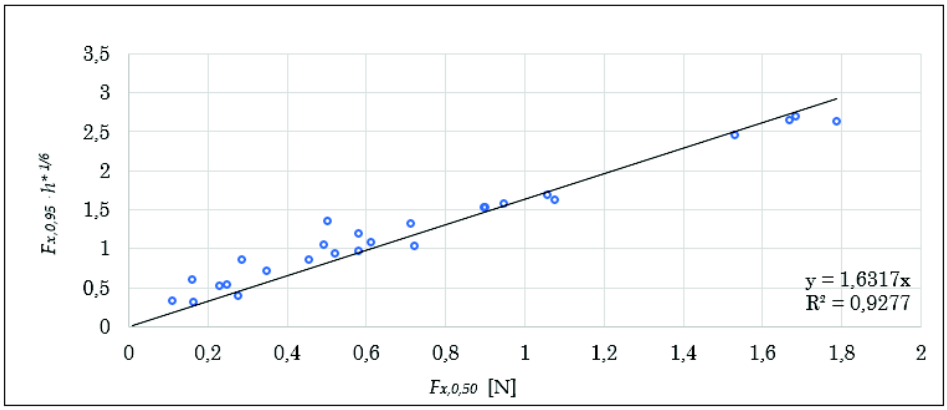

Obr. 3.12: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen hydraulický poloměr $R$ souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.13: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen omočený obvod $D$ souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.14: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky

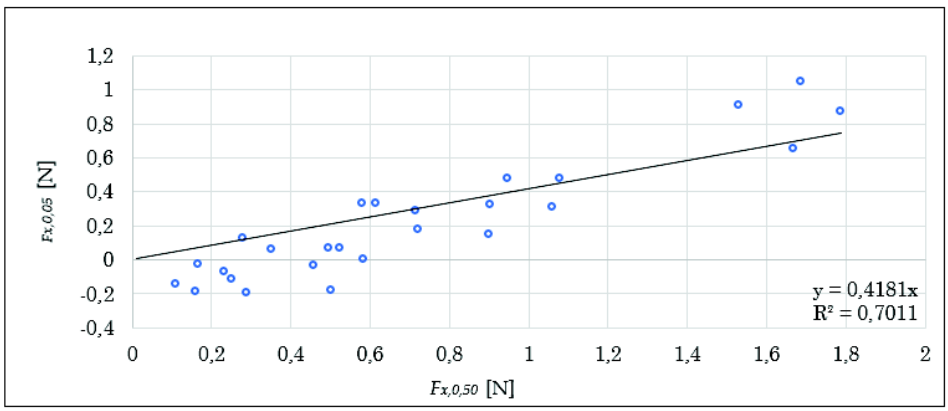



Obr. 3.15: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po jeho úpravě poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky

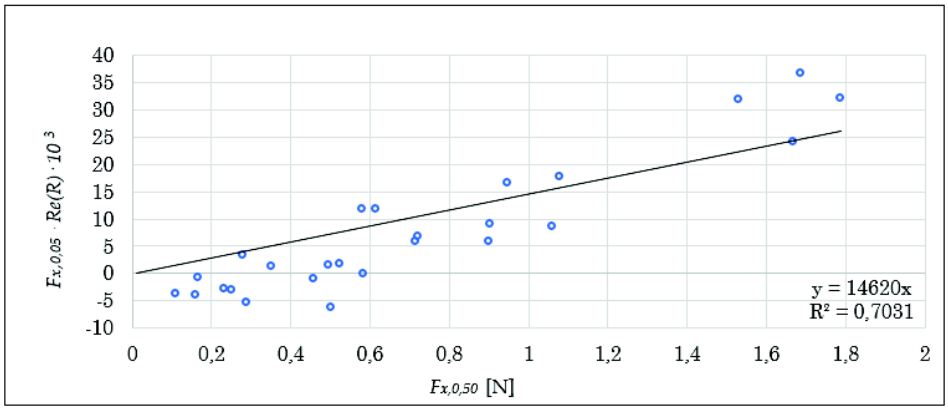
### Vztah mezi $F_{x,0,05}$ a $F_{x,0,50}$

U nejnižších měřených hodnot, tedy kvantilu $F_{x,0,05}$ je obtížnější stanovit koeficient úměrnosti tak, aby data vykazovala co nejvyšší závislost, protože se více projevují vibrace modelu, vlnění na hladině a různé chyby měření. Z toho důvodu je u 5% kvantilů zpravidla nižší závislost dat a tedy nižší hodnota $R^2$ (Obr. 3.16-3.19).

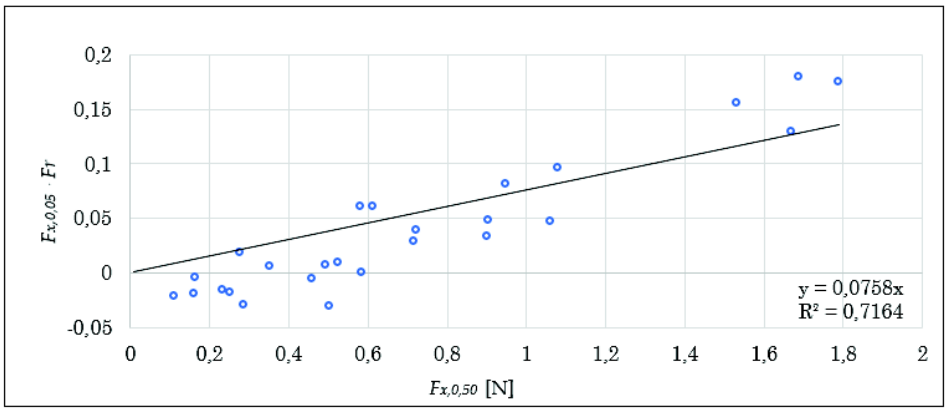
Pro vyhodnocení závislosti dat jednotlivými podobnostními čísly byla většinou použita podobnostní čísla prvních mocninách, neboť jejich vyšší mocniny už měly na výsledek zanedbatelný vliv. Ovšem v případě jejich kombinace, projevovala data největší závislost po úpravě $F_{x,0,05}$ kombinací mocnin Reynoldsova čísla $Re(D)^{1/6}$, Newtonova čísla $X^{-1/7}$ a poměrného zatopení $h^{*\,-1/3}$ (Obr. 3.19). To znamená, že vedle přítokové rychlosti, hraje větší roli též zatopení mostovky a šírka mostovky.



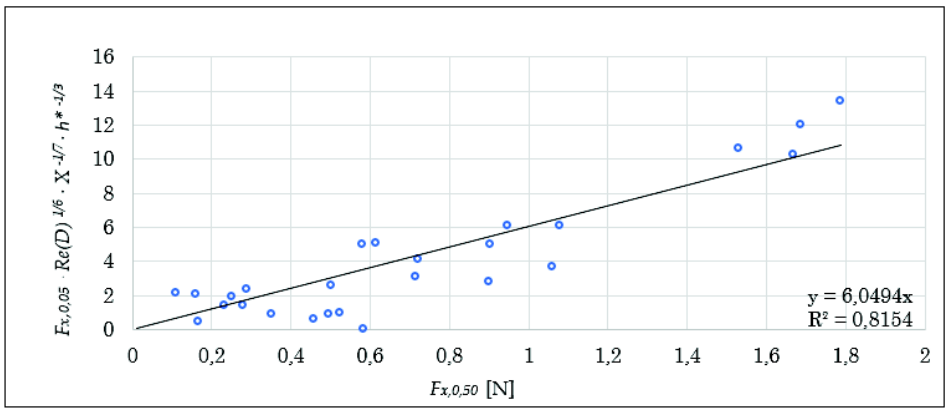

Obr. 3.16: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.17: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsových číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.18: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky

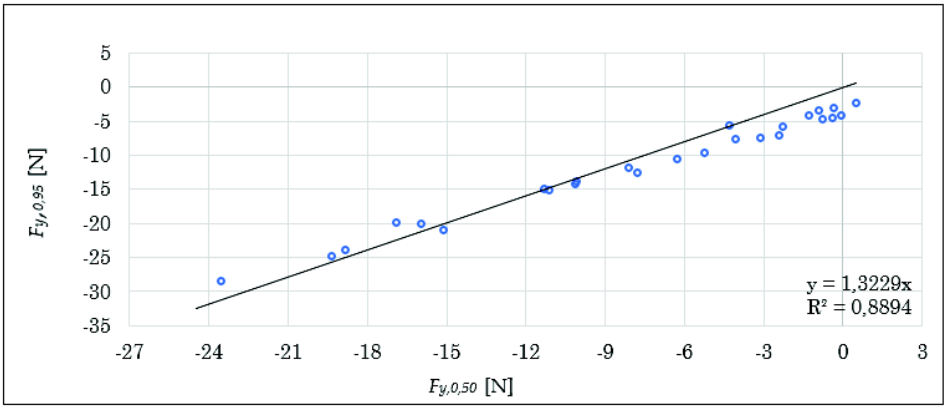



Obr. 3.19: Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsových číslem $Re(R)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$, souhrnně pro všechny modely mostovky

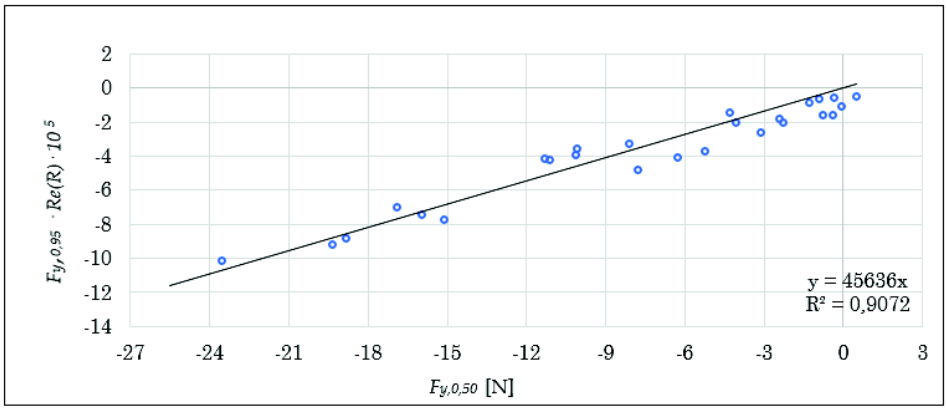
### 3.7.2 Vertikální síla $F_y$

#### Vztah mezi $F_{y,0,95}$ a $F_{y,0,50}$

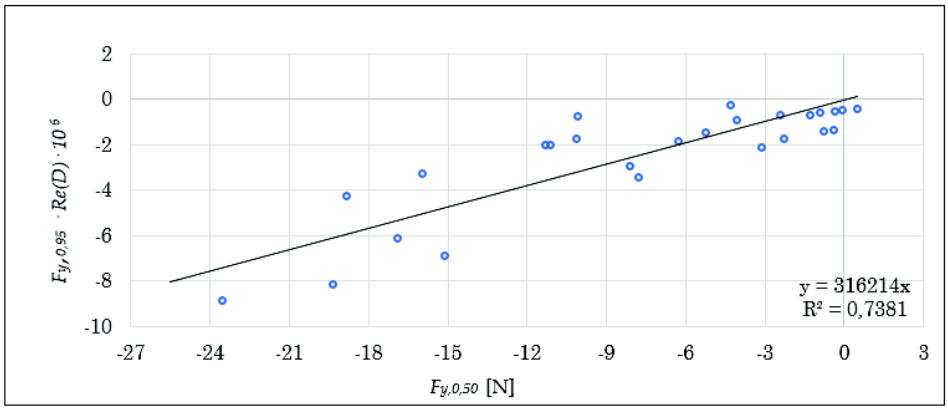
V případě kvantilu $F_{y,0,95}$ vertikální síly $F_y$ se podařilo nejvíce zvýšit závislost dat úpravou odmocniny z Freudova čísla $Fr^{1/2}$, jak je znázorněno v grafu na (Obr. 3.23), dále se mírně zvýšila závislost i po úpravě Reynoldsovým číslem $Re(R)$ (Obr. 3.21).



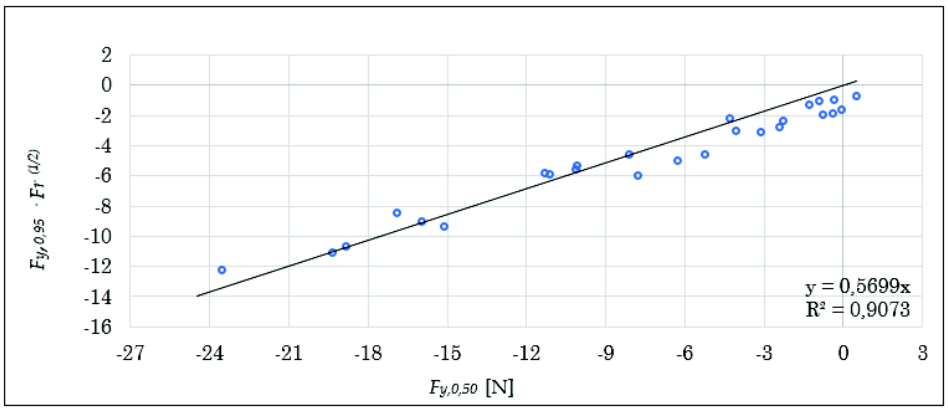

Obr. 3.20: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.21: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen hydraulický poloměr $R$ souhrnně pro všechny modely mostovky



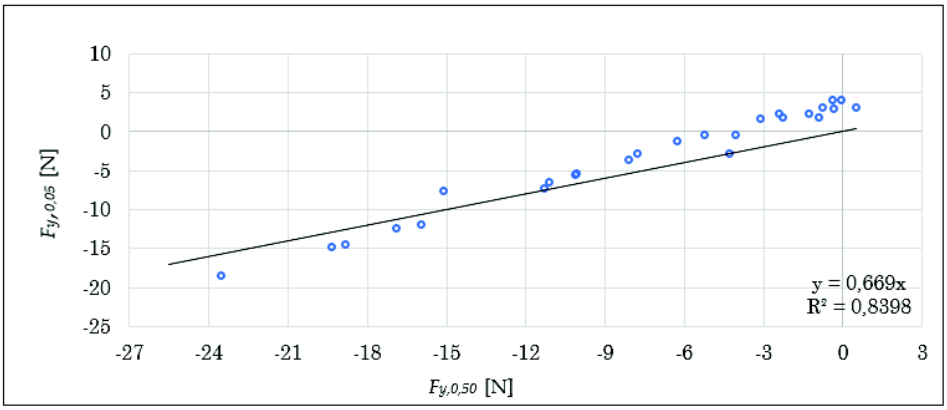

Obr. 3.22: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky



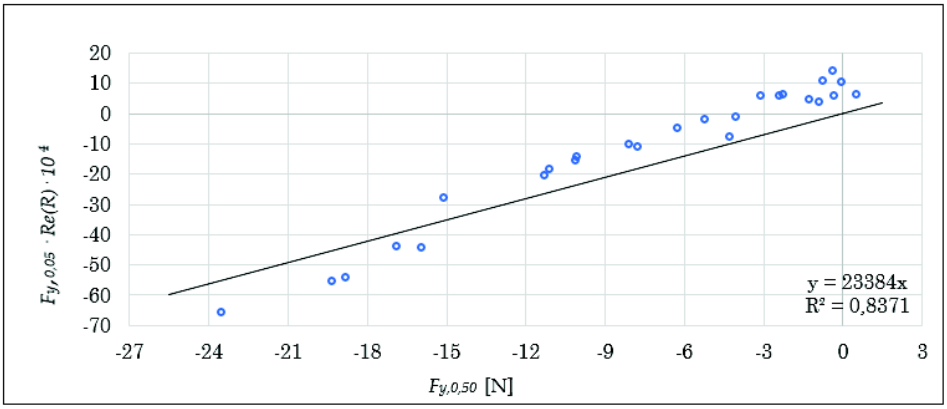

Obr. 3.23: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky

### Vztah mezi $F_{y,\,0{,}05}$ a $F_{y,\,0{,}50}$

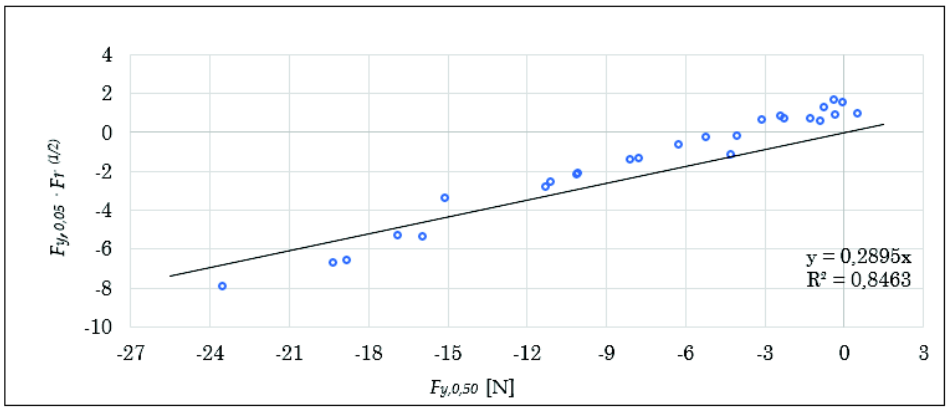
Stejně jako v případě $F_{y,0,95}$, tak i v oblasti nejnižších hodnot vertikální síly $F_y$, tedy $F_{y,\,0{,}05}$ se podařilo zvýšit závislost dat nejvíce úpravou pomocí odmocniny Froudova čísla $Fr^{1/2}$ (Obr. 3.26). To je způsobeno především velkou závislostí na přítokové rychlosti a vlnění hladiny. U ostatních podobnostních čísel nebyla vyšší závislost prokázána.



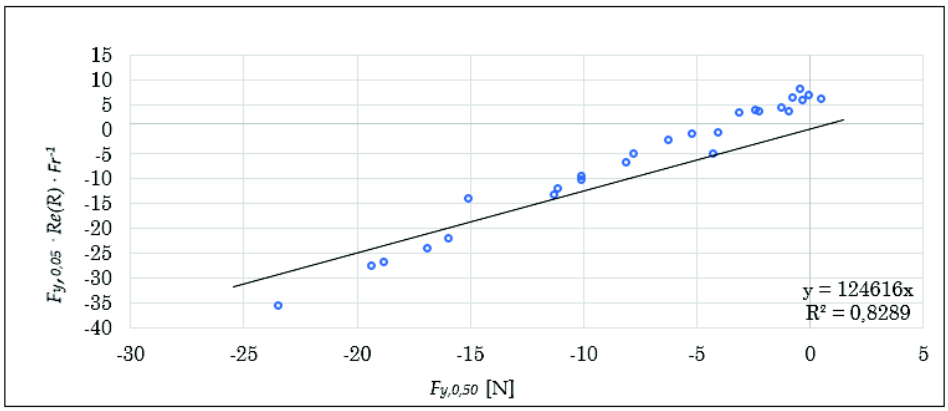

Obr. 3.24: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



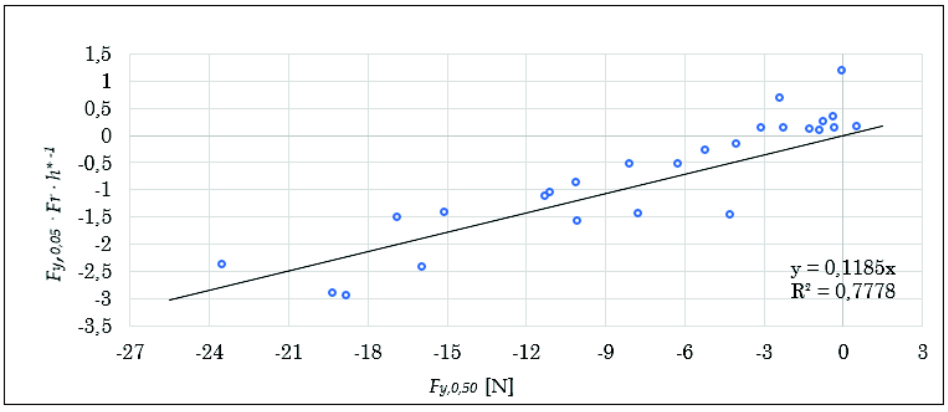

Obr. 3.25: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.26: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po úpravě kvantilu Froudovým číslem $Fr$ pro všechny modely mostovky




Obr. 3.27: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky



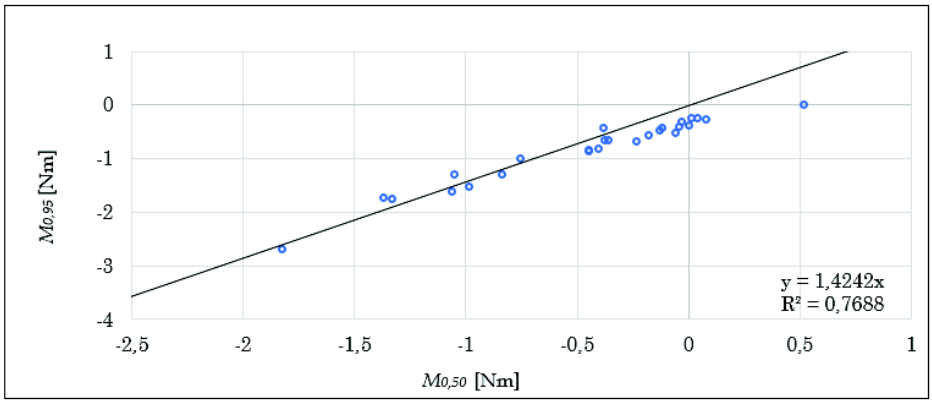

Obr. 3.28: Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$, souhrnně pro všechny modely mostovky

### 3.7.3 Moment $M$

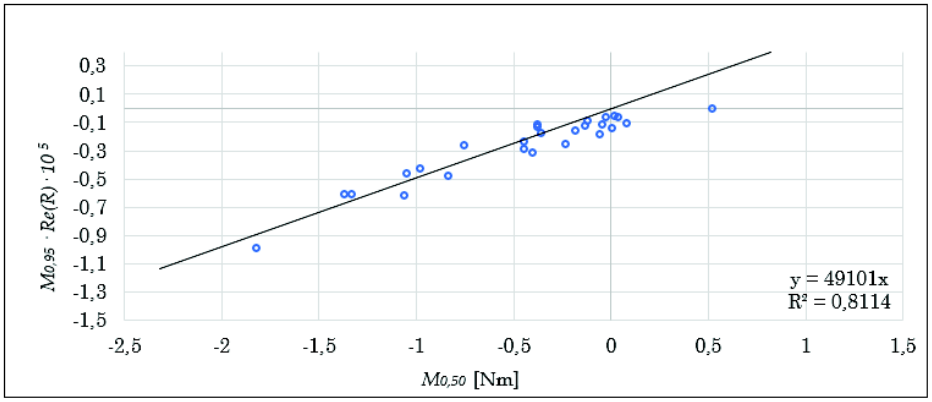
**Vztah mezi $M_{0,95}$ a $M_{0,50}$**

V případě momentu $M$ bylo zjištěno, že na zlepšení lineární závislosti mezi kvantilem a mediánem mají vliv téměř všechna použitá podobnostní čísla (Obr. 3.29-3.33) a (Obr. 3.34-3.38).

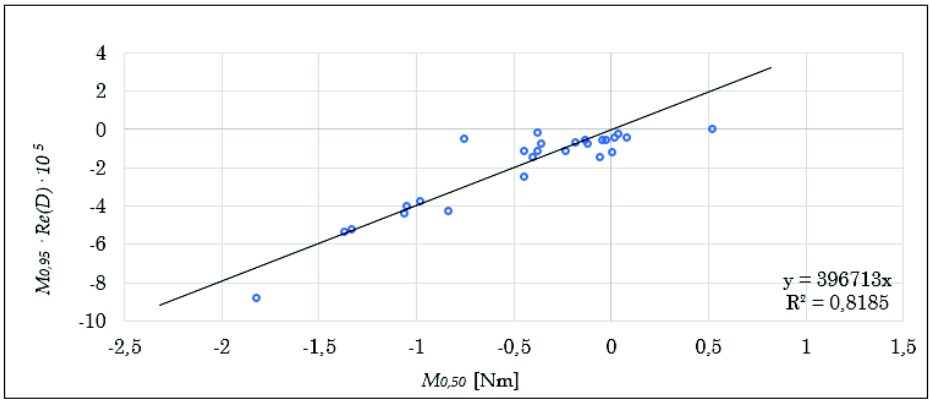
Co se týká samostatných podobnostních čísel, bylo prokázáno největší zvýšení závislosti mezi $M_{0,95}$ a $M_{0,50}$ přenásobením kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$ (Obr. 3.31). Největšího zvýšení závislosti dat ovšem bylo dosaženo úpravou kvantilu všemi podobnostními čísly v následujících mocninách $X^{1/5}\, Re(D)^{1/6}\, Re(R)^{1/6}\, h^{*\,1/6}\, Fr^{1/2}$, čímž se zvýšil moment determinace na hodnotu $R^2 = 0,8609$, jak lze vidět v grafu na (Obr. 3.33), tato závislost je nepřímá.



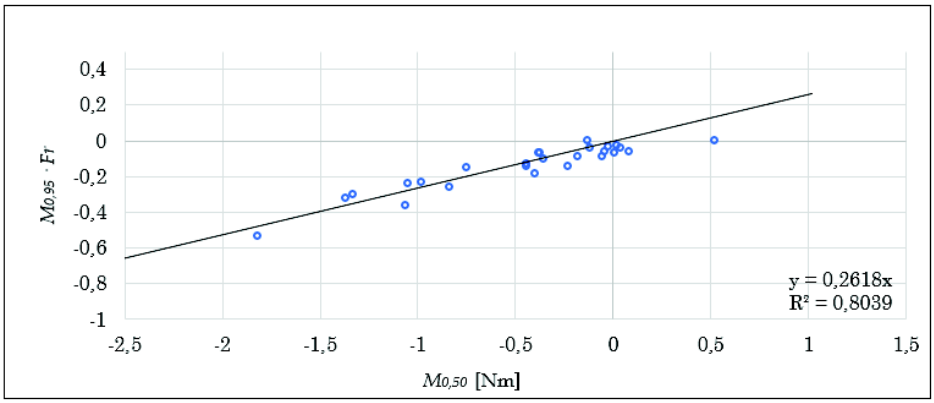

Obr. 3.29: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



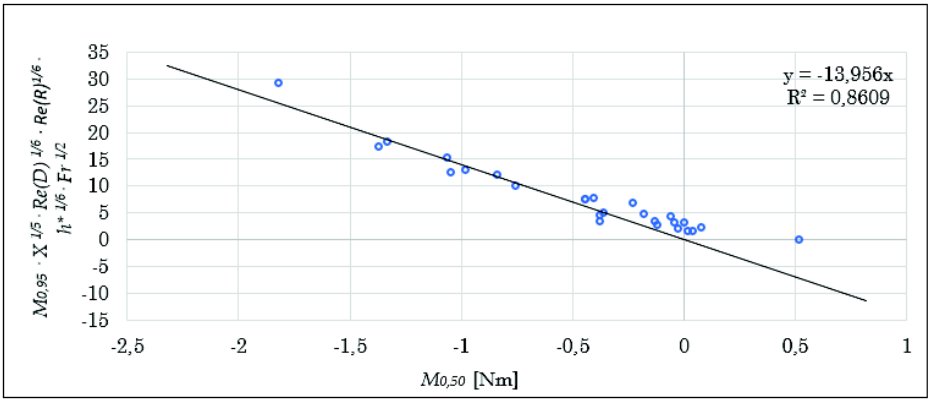

Obr. 3.30: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.31: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.32: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky

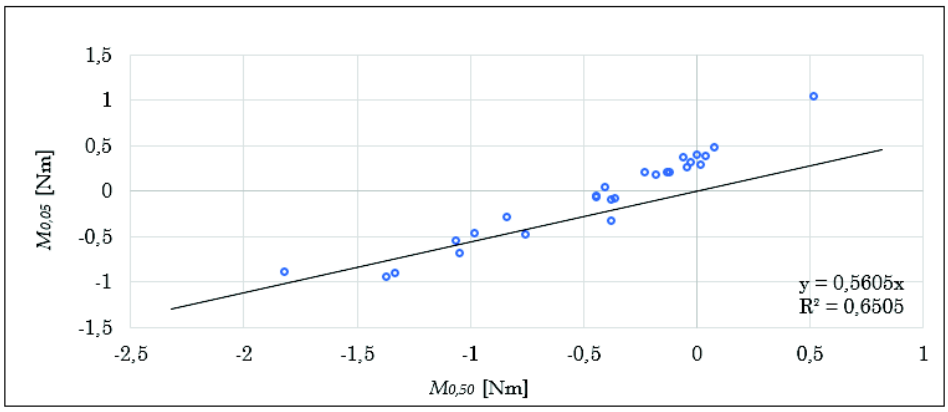



Obr. 3.33: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, Reynoldsovým číslem $Re(R)$, Reynoldsovým číslem $Re(D)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky

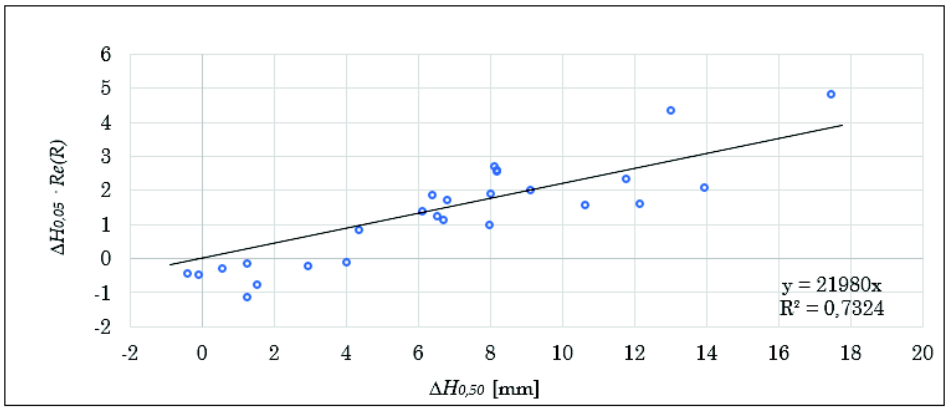
### Vztah mezi $M_{0,05}$ a $M_{0,50}$

Nízké kvantily momentu $M_{0,05}$ opět vykazují obecně nižší závislost na mediánu, než v případě vysokých hodnot $M_{0,95}$, stejně jako v případě sil $F_x$ a $F_y$ je to způsobeno větším vlivem chyb měření, vlnami na hladině a kmitáním modelu.

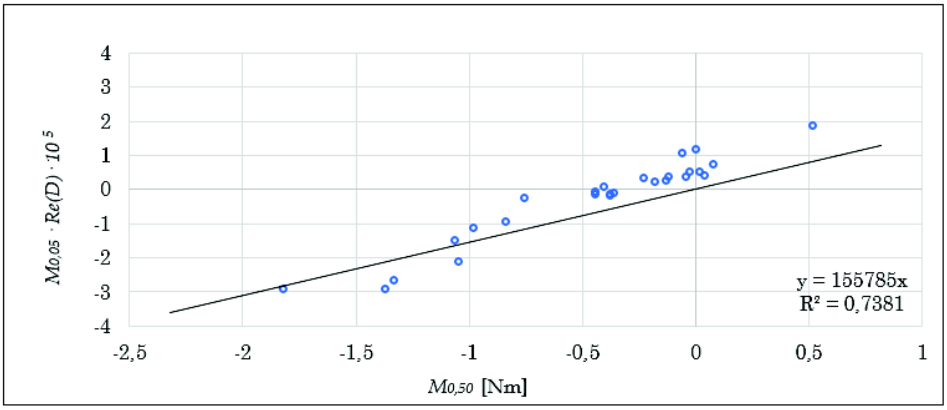
Největší závislost dat je znovu po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$ (Obr. 3.36) a úpravou kvantilu všemi podobnostními čísly $X^{1/5}\, Re(D)^{1/6}\, Re(R)^{1/6}\, h^{*\,1/6}\, Fr^{1/2}$ (Obr. 3.38), tato závislost je nepřímá.



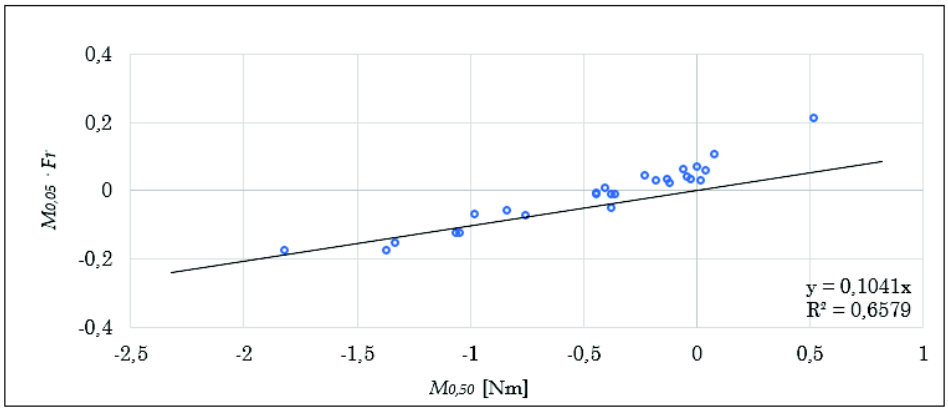

Obr. 3.34: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



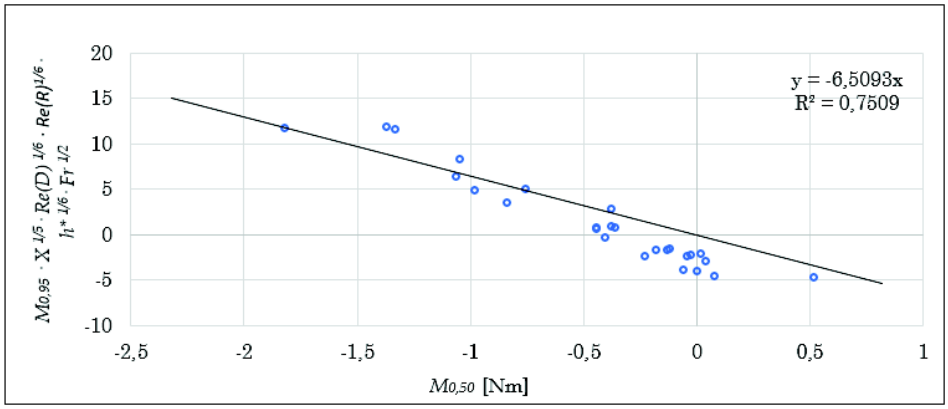

Obr. 3.35: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.36: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.37: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky



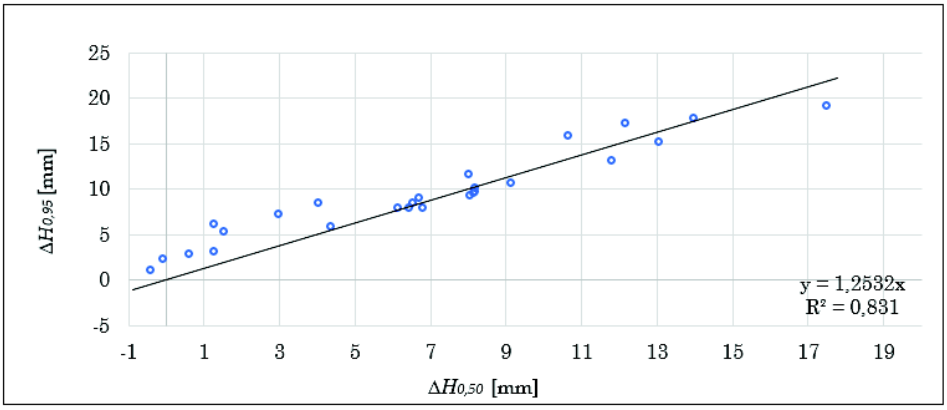

Obr. 3.38: Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, Reynoldsovým číslem $Re(R)$, Reynoldsovým číslem $Re(D)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky

### 3.7.4 Rozdíl hloubek před a za modelem $\Delta H$

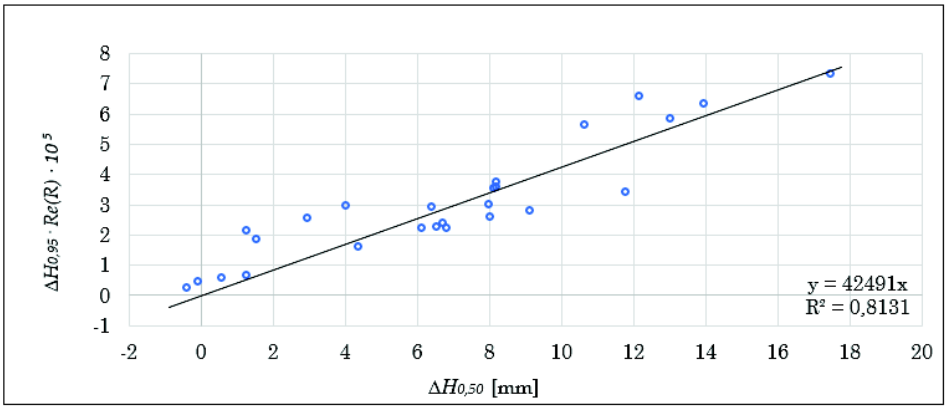
**Vztah mezi $\Delta H_{0,95}$ a $\Delta H_{0,50}$**

Kromě silového zatížení lze stejným způsobem vyhodnotit i závislost mezi kvantily a mediánem rozdílu hloubek před a za modelem $\Delta H$.

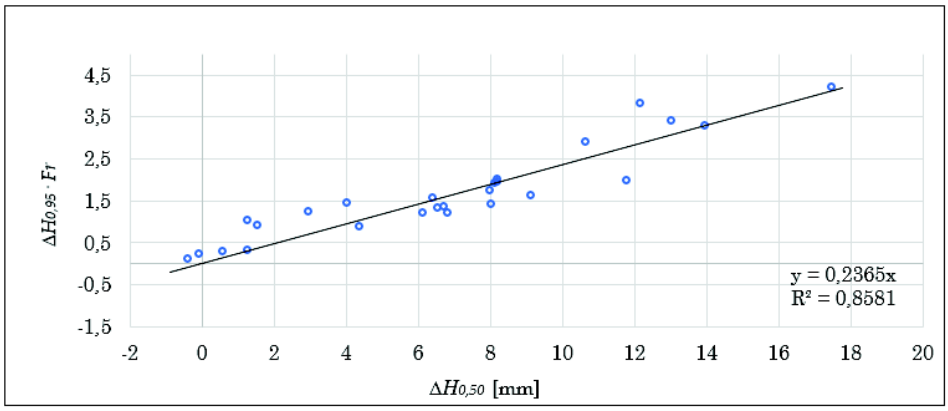
V oblasti vysokých hodnot $\Delta H$ se největší závislosti kvantilu $\Delta H_{0,95}$ a mediánu $\Delta H_{0,50}$ podařilo dosáhnout přenásobením kvantilu mocninami Froudova čísla a poměrného zatopení $h^{*\,-1/5}\, Fr^{1/3}$ (Obr. 3.43). To znamená, že nejvýznamnější roli hraje hloubka zatopení mostovky a přítoková rychlost.



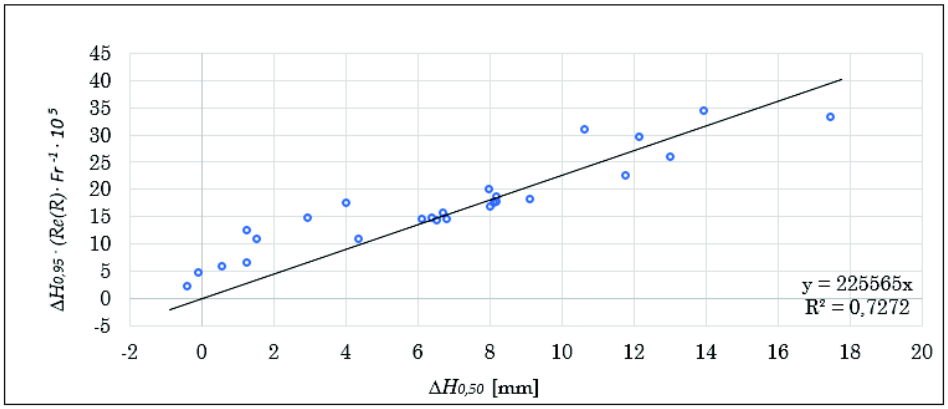

Obr. 3.39: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



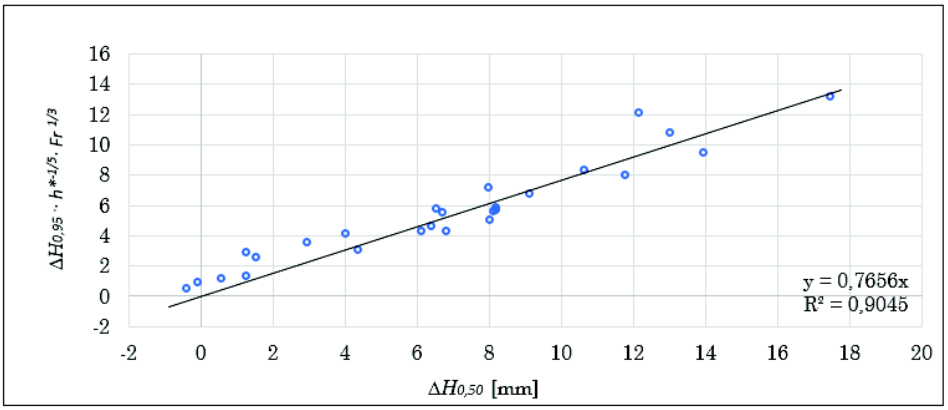

Obr. 3.40: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.41: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po úpravě kvantilu Freudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky



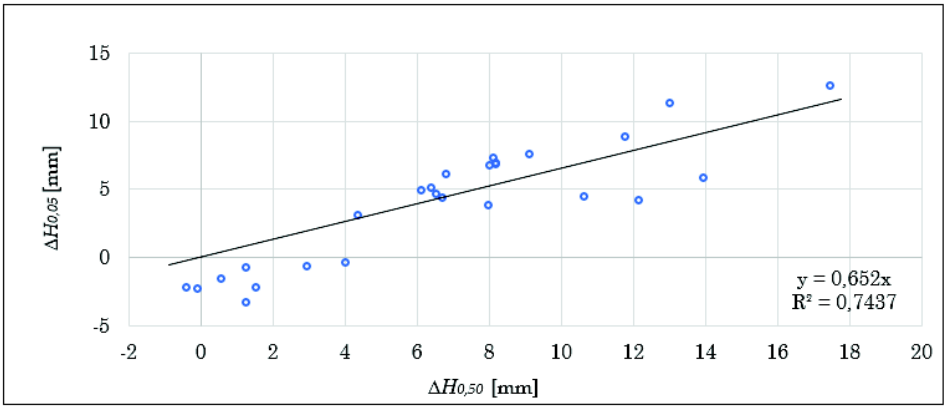

Obr. 3.42: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$ souhrnně pro všechny modely mostovky



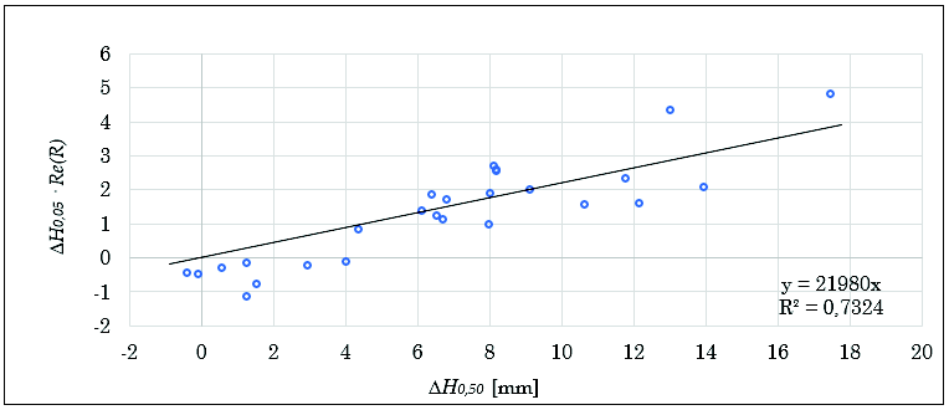

Obr. 3.43: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky

### Vztah mezi $\Delta H_{0,05}$ a $\Delta H_{0,50}$

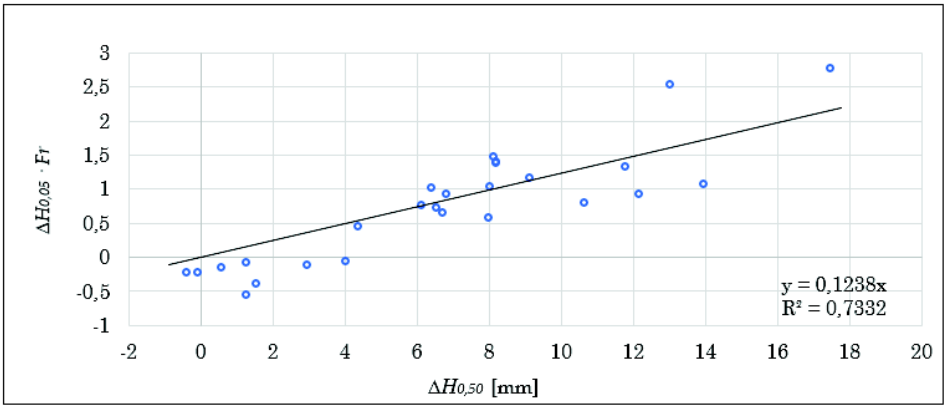
V oblasti nízkých hodnot $\Delta H$ je závislost kvantilu $\Delta H_{0,05}$ a mediánu $\Delta H_{0,50}$ o poznání nižší. To je způsobeno především vlněním hladiny. V tomto případě se lineární závislost dat téměř nepodařilo zvýšit. Velmi nepatrného zvýšení závislosti bylo docíleno pouze úpravou pomocí mocnin Froudova čísla a poměrného zatopení $h^{*\,-1/5}\,Fr^{1/3}$.



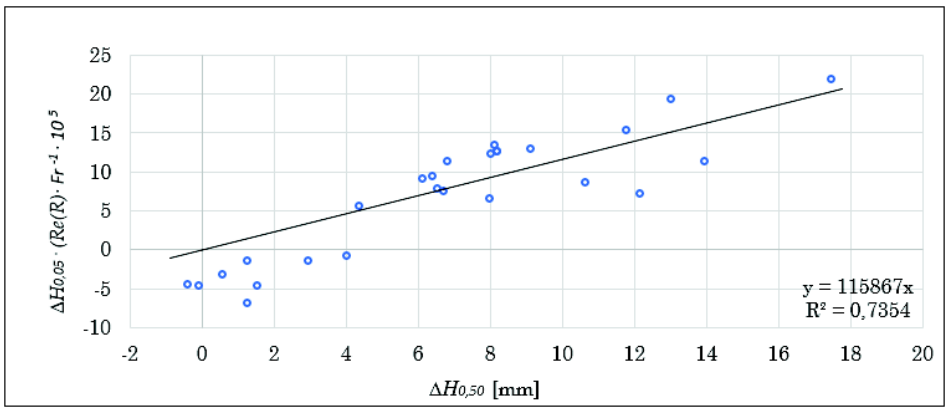

Obr. 3.44: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky



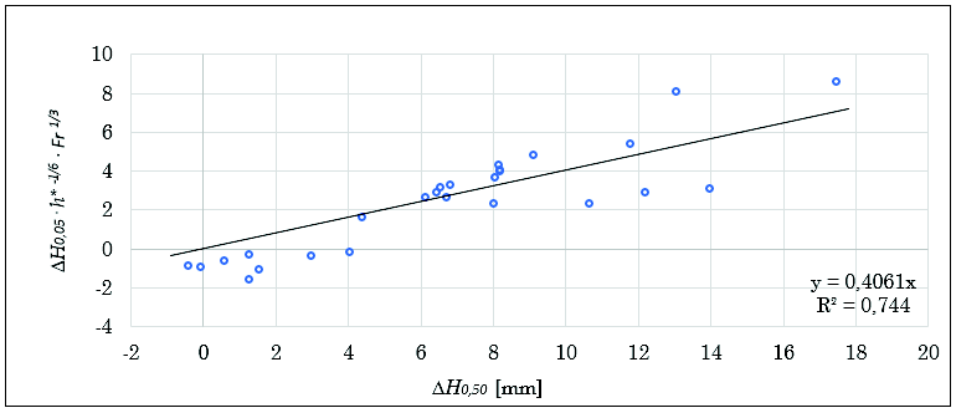

Obr. 3.45: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.46: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po úpravě kvantilu Freudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.47: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$ souhrnně pro všechny modely mostovky




Obr. 3.48: Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky

# 4 ZÁVĚR

Při povodňových průtocích může především na menších tocích nastat situace, kdy dojde ke kontaktu hladiny s konstrukcí mostovky, nebo dokonce jejímu přelití. Z toho důvodu je velice důležité stanovit velikost hydrodynamického zatížení působícího na mostovku. Jeho stanovení početně ze vztahů hydrauliky je obtížné, stejně tak numerický výpočet na matematickém modelu může být obtížný, například z nedostatku vstupních dat a nepřesnosti okrajových podmínek. Z těchto důvodů je velice přínosná práce na fyzikálním modelu.

Při stanovení hydrodynamického zatížení pro návrh a posouzení mostní konstrukce je třeba brát v úvahu jak střední hodnotu, tak i pulsační složku zatížení, tedy krajní hodnotu, kterou ČSN EN 1990 doporučuje uvažovat jako 5%, resp. 95% kvantil očekávaného zatížení.

Výzkum se prováděl na čtyřech typech mostovky se čtyřmi různými příčnými průřezy (Obr. 3.1). Nejprve byly porovnány vlivy tvaru mostovky na velikost hydrodynamického zatížení a rozdíl hladin v profilu těsně před a těsně za mostem. Z rozboru v kapitole 3.6 je patrné, že z hlediska vyvozovaného hydrodynamického zatížení je nejvhodnější konstrukcí model se šikmým zhlavím, protože při stejných průtocích a úrovních zatopení jako u ostatních modelů, vyvozuje nejmenší odporové síly.

V kapitole 3.6 se též podařilo zjistit, že tvar mostovky hraje důležitou roli v závislosti mezi 95%, resp. 5% kvantilem a mediánem zkoumaných veličin.

Dalším úkolem bylo vyhodnotit lineární závislost mezi 95%, resp. 5% kvantilem a mediánem složek hydrodynamického zatížení po úpravách podobnostními čísly. Toto vyhodnocení bylo provedeno v kapitole 3.7 vždy souhrnně pro všechny typy mostovky.

Z výsledků vyplývá, že hodnoty horního kvantilu horizontální síly $F_{x,0,95}$ nejvíce závisí na šesté odmocnině Reynoldsova čísla $Re(D)^{1/6}$ (Obr. 3.13), největší vliv má tedy přítoková rychlost. V případě dolního kvantilu $F_{x,0,05}$ se přidává taký výrazný vliv mocniny Newtonova čísla $X^{-1/7}$ a poměrného zatopení $h^{*\,-1/3}$ (Obr 3.19). To znamená, že vedle přítokové rychlosti, hraje větší roli též zatopení mostovky a šírka mostovky. U vertikální síly $F_y$ vychází jak pro horní kvantil $F_{y,0,95}$, tak pro spodní kvantil $F_{y,0,05}$ nejlépe závislost na odmocnině Froudova čísla $Fr^{1/2}$ (Obr. 3.23 a 3.26). To znamená, že nejvýraznější vliv na maximální hodnoty těchto veličiny má přítoková rychlost a vlnění hladiny.

V případě momentu $M$ byla zjištěna největší závislost na kombinaci všech podobnostních čísel v jejich mocninách $X^{1/5}\,Re(D)^{1/6}\,Re(R)^{1/6}\,h^{*\,1/6}\,Fr^{1/2}$ (Obr. 3.33 a 3.38). Z toho je velikost momentu závisí na spolupůsobení různých vstupních veličin.

U rozdílu hladin v profilu před a za modelem byla zjištěna největší závislost na kombinaci poměrného zatopení a Froudova čísla (Obr. 3.43 a 3.48).

**Navržený postup výpočtu krajních kvantilů hydrodynamického zatížení**

1. Stanovení mediánu $F_{x,0,50}$, $F_{y,0,50}$ a $M_{0,50}$ například numerickým modelem, nebo z tabulek.
2. Stanovení kvantilu s použitím rovnic

$$F_{x,0,95} = \frac{12,502\, F_{x,0,50}}{Re(D)^{1/6}}, \tag{4.1}$$

$$F_{x,0,05} = \frac{6,0494\, F_{x,0,50}}{Re(D)^{1/6} \cdot X^{-1/7} \cdot h^{*\,-1/3}}, \tag{4.2}$$

$$F_{y,0,95} = \frac{0,5699\, F_{y,0,50}}{Fr^{1/2}}, \tag{4.3}$$

$$F_{y,0,05} = \frac{0,2895\, F_{y,0,50}}{Fr^{1/2}}, \tag{4.4}$$

$$M_{0,95} = \frac{-13,956\, M_{0,50}}{X^{1/5} \cdot Re(D)^{1/6} \cdot Re(R)^{1/6} \cdot h^{*\,1/6} \cdot Fr^{1/2}}, \tag{4.5}$$

$$M_{0,05} = \frac{-6,5093\, M_{0,50}}{X^{1/5} \cdot Re(D)^{1/6} \cdot Re(R)^{1/6} \cdot h^{*\,1/6} \cdot Fr^{1/2}}, \tag{4.6}$$

Kvantily je možné použít například k návrhu uložení mostovky na podpěrách.

V dalším výzkumu by bylo vhodné se zabývat vlivem dalších různých tvarů mostovky na velikost působícího hydrodynamického zatížení a tím k nalezení ještě vhodnějšího příčného profilu mostovky.

Dále by bylo vhodné zjistit vyšší závislost mezi kvantily a mediány složek hydrodynamického zatížení, aby byla možnost s vysokou přesností určit jejich extrémy při znalosti středních hodnot.

# LITERATURA


[1] ČSN 73 6201. *Projektování Mostních Objektů*; ČNI: Praha, 2008.

[2] Kuda, F.; Mihola, M. *Ohrožení železničních staveb povodňovými průtoky.* Stavební obzor, 2004(8), ČVUT v Praze - Fakulta stavební, VUT v Brně - Fakulta stavební, VŠB TU Ostrava - Fakulta stavební, ČKAIT, ČSSI, 2004, s. 235-240; ISSN 1210-4027.

[3] Boor, B.; Patočka, C.; Kunštátský, J. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: celost. učebnice pro vys. školy*; 1. vyd.; SNTL/ALFA: Praha, 1968, 516 s.

[4] ČSN 73 6200. *Mosty - terminologie a třídění*; ÚNMZ: Praha, 2011.

[5] Jandora, J.; Šulc, J. *Hydraulika Modul 01*; 1. vyd.; Akademické nakladatelství CERM: Brno, 2007; 178 s.

[6] TP 204. *Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*; Ministerstvo obrany, Odbor infrastruktury,: Praha, 2009; 91 s.

[7] Picek, T.; Havlík, A.; Mattas, D. *Tlakové proudění mostním otvorem a přelévané mosty*; ČVUT v Praze, Fakulta stavební: Praha, 2004; 8 s.

[8] Picek, T.; Havlík, A. *Výpočet vzdutí hladiny při tlakovém proudění mostním otvorem.* Stavební obzor 2005(6), ČVUT v Praze - Fakulta stavební, VUT v Brně - Fakulta stavební, VŠB TU Ostrava - Fakulta stavební, ČKAIT, ČSSI, 2005, ;s. 174-177; ISSN 1210-4027.

[9] Kolář, V.; Patočka, C.; Bém, J. *Hydraulika*, 1. vyd.; SNTL/ALFA: Praha, 1983; 464 s.

[10] Hamill, L. *Bridge Hydraulics*, 2. vyd; Taylor & Francis e-Library: Abingdon, UK, 2004; 367 s.

[11] Noskievič, J., a kol. *Mechanika Tekutin*; SNTL/Alfa: Praha, 1987; 354 s.

[12] Munson, B. R.; Young, D. F.; Okiishi, T. H.; Huebsch, W. W. *Fundamentals Of Fluid Mechanics*, 6 ed.; John Wiley & Sons: R. R. Donnelley/Jefferson City., 2009; 725 s.

[13] *Ansys Fluent Theory Guide, Release 15.0.*; ANSYS: Canonsburg, Pennsylvania, 2013.

[14] Kerenyi, K.; Sofu, K.; Guo, T.; Bushra, J. *Hydrodynamic Forces On Inundated Bridge Decks*; U.S. Department os Transportation, Federal Highway Administration: Georgetown Pike McLean, VA, USA, 2009; 38 s.

[15] Dráb, A.; Špano, M.; Zubík, P.; Dvořák, L.; Žoužela, M.; Kozubík, J. *Vývoj hybridního železničního modelu rezistentního v záplavových územích: DC 01-Realizace hydraulického modelu mostní konstrukce — dílčí zpráva*; Ústav vodních staveb FAST VUT v Brně: Brno, 2013; 23 s.

[16] Kvantil náhodné veličiny http://web.cvut.cz/ki/710/pdf/kap4.pdf (navštíveno 28.12.2017).

[17] Průcha, L. Popisná statistika https://math.feld.cvut.cz/prucha/mstp/7pu.pdf (navštíveno 28.12.2017).

[18] Voráčova, Š. Regresní a korelační analýza https://www.fd.cvut.cz/department/k611/pedagog/K611THO_soubory/0_regrese.pdf (navštíveno 8.1.2018).

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

### Zkratky

| | |
|---|---|
| NH | návrhová hladina |
| KNH | kontrolní návrhová hladina |
| NP | návrhový průtok |
| KNP | kontrolní návrhový průtok |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| PVC | Polymethylmethakrylát (plexisklo) |

### Veličiny

| | |
|---|---|
| $h_s$ | střední hloubka průřezu [m] |
| $\alpha$ | Coriolisovo číslo [-] |
| $g$ | tíhové zrychlení $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}]$ |
| $v$ | střední průřezová rychlost průřezu $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $Fr$ | Froudovo číslo [-] |
| $S$ | průtočná plocha průřezu $[\mathrm{m}^2]$ |
| $B$ | šířka koryta v hladině [m] |
| $E_k$ | kinetická energie [J] |
| $h_d$ | hloubka dolní vody $[\mathrm{h_d}]$ |
| $\kappa$ | součinitel úměrnosti odpovídající tvaru vtokového otvoru [-] |
| $E$ | energetická výška průřezu [m] |
| $h$ | hloubka vody před mostem [m] |
| $v_0$ | střední rychlost proudění v profilu před mostem $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $h_0$ | původní nevzdutá hloubka před mostem [m] |
| $I_0$ | podélný sklon koryta před mostem [-] |
| $I_k$ | kritický podélný sklon koryta [-] |
| $Q$ | průtok $[\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $\varphi$ | rychlostní součinitel [-] |
| $b$ | šířka mostního pole [m] |
| $h_\sigma$ | hloubka dolní vody nad prahem pod mostem [m] |
| $\Delta h$ | vzdutí mostem [m] |
| $m$ | součinitel přepadu [-] |
| $E_0$ | energetická výška v profilu před mostem [J] |
| $a$ | světlá výška mostního otvoru [m] |
| $h_h$ | vzdutá hloubka vody v profilu před mostem [m] |
| $\mu_u$ | součinitel výtoku [-] |
| $S_M$ | průtočná plocha profilu mostu $[\mathrm{m}^2]$ |

| | |
|---|---|
| $h_c$ | snížená hloubka v profilu mostního objektu [m] |
| $\varepsilon$ | součinitel kontrakce vodního proudu [-] |
| $q$ | specifický průtok $[\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $C_D$ | průtokový součinitel pro proudění s volnou hladinou a zatopeným vtokem [-] |
| $C_{D\,0}$ | výtokový součinitel pro zatopený výtok mostním otvorem. [-] |
| $\Delta\Delta h$ | lokální navýšení hladiny před mostovkou [m] |
| $h_d{}^*$ | zúžená hloubka za mostovkou [m] |
| $Q_o$ | průtok mostním otvorem při přelévané mostovce $[\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $Q_p$ | průtok vody přepadající přes mostovku $[\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $\sigma_z$ | součinitel zatopení [-] |
| $h_m$ | výška mostovky [m] |
| $\mu$ | součinitel přepadu [-] |
| $h_p$ | výška přepadového paprsku nad mostovkou [m] |
| $p$ | tlak, normálové napětí [Pa] |
| $F_t$ | třecí síla [N] |
| $F_p$ | tlaková síla [N] |
| $F_x$ | vodorovná odporová síla [N] |
| $F_y$ | svislá vztlaková síla [N] |
| $A$ | plocha povrchu tělesa $[\mathrm{m}^2]$ |
| $\omega$ | úhel mezi vektorem tlakové síly a vodorovnou rovinou [°] |
| $Re$ | Reynoldsovo číslo [-] |
| $v_\infty$ | rychlost nenarušeného proudu $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $x_t$ | délka obtékání desky [m] |
| $\nu$ | kinematická viskozita $[\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}]$ |
| $\delta$ | tloušťka mezní vrstvy [m] |
| $\eta$ | dynamická viskozita $[\mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}]$ |
| $\tau_w$ | tangenciální napětí [Pa] |
| $\partial u/\partial y$ | gradient rychlosti ve směru kolmém na vektor rychlosti [Pa] |
| $M$ | moment k těžišťové ose mostovky [Nm] |
| $r_{F_t}$ | rameno třecí síly [m] |
| $r_{F_p}$ | rameno tlakové síly [m] |
| $\rho_w$ | hustota vody $[\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^3]$ |
| $C_L$ | odporový součinitel pro svislou sílu [-] |
| $C_M$ | odporový součinitel pro moment [-] |
| $L$ | šířka mostovky [m] |
| $M_L$ | měřítko délky [-] |
| $M_S$ | měřítko plochy [-] |
| $M_V$ | měřítko objemu [-] |

| | |
|---|---|
| $M_t$ | měřítko času [-] |
| $M_v$ | měřítko rychlosti [-] |
| $M_a$ | měřítko zrychlení [-] |
| $M_Q$ | měřítko průtoku [-] |
| $M_F$ | měřítko síly [-] |
| $M_m$ | měřítko hmotnosti [-] |
| $M_\rho$ | měřítko hustoty [-] |
| $\sigma$ | povrchové napětí [$\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-1}$] |
| $U$ | elektrické napětí [U] |
| $K$ | kalibrační konstanta [-] |
| $r_y$ | rameno vertikálních sil [m] |
| $X$ | newtonovo číslo [-] |
| $h^*$ | poměrné zatopení [-] |
| $R$ | hydraulický poloměr žlabu [m] |
| $D$ | omočený obvod profilu mostovky [m] |
| $k$ | směrnice regresní přímky [-] |
| $\gamma$ | podobnostní číslo, nebo jejich kombinace [-] |
| $H1$ | hloubka před modelem [mm] |
| $H2$ | hloubka za modelem [mm] |
| $\Delta H$ | rozdíl hloubek před a za modelem[mm] |

**Symboly**

| | |
|---|---|
| T | těžiště průřezu mostovky |
| SS | soustava souřadnic |
| $\bar{x}$ | průměr datové řady |
| $\tilde{x}$,$x_{0,50}$ | medián datové řady |
| $x_{0,05}$ | 5% kvantil |
| $x_{0,95}$ | 95% kvantil |
| $Var$ | směrodatná odchylka |
| $Var^2$ | rozptyl |
| $R^2$ | koeficient determinace |
| $S_{reg}$ | regresní součet čtverců odchylek predikcí od průměru |
| $S_{yy}$ | celkový součet čtverců odchylek dat od průměru |

# SEZNAM OBRÁZKŮ


2.1 Energetická výška průřezu [5] . . . . . 11
2.2 Říční proudění pod mostem s vtokem ovlivněným dolní vodou. [6] . . 13
2.3 Říční proudění pod mostem s vtokem neovlivněným dolní vodou. [6] . 15
2.4 Prouděním mostním otvorem se zatopeným vtokem a volným výtokem. [6] . . . . . 16
2.5 Hodnoty průtokového součinitele $C_D$ [6]. . . . . 17
2.6 Schéma tlakového proudění mostním otvorem [6]. . . . . 18
2.7 Závislost průtokového součinitele $C_{D0}$ na poměru $a/h_h$ [6]. . . . . 18
2.8 Schéma přelévané mostovky [7]. . . . . 19
2.9 Schéma tlakové a třecí síly od hydrodynamického zatížení na elementární plochu povrchu tělesa . . . . . 21
2.10 Vývoj mezní vrstvy po délce desky [11] . . . . . 22
2.11 Tloušťka mezní vrstvy pro oblast proudění a)laminární, b)turbulentní, $\delta$ je tloušťka mezní vrstvy. [11] . . . . . 23
2.12 Schéma mostovky se složkami hydrodynamického zatížení s vyznačením kladné konvence sil. . . . . 25
2.13 Medián $\tilde{x}$ a kvantil $x_{0,65}$ znázorněny na grafu hustoty normálního rozdělení. . . . . 31
3.1 Příčné řezy modelů mostovky: a) Typ 1 - mostovka s jednotnou tloušťkou vozovky i lávek, b) Typ 2 - mostovka s tenčími lávkami nahoře, c) Typ 3 - mostovka s tenčími lávkami dole, d) Typ 4 - mostovka s šikmými náběhy. . . . . 33
3.2 Graf průběhu $F_x$, $F_y$ a $M$ na modelu s lávkou nahoře a průtokem $Q = 29,8\ l \cdot s^{-1}$, pro názornost časový úsek o délce 10 s . . . . . 37
3.3 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 41
3.4 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 41
3.5 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 44

3.6 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 44
3.7 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 47
3.8 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 47
3.9 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 50
3.10 Graf porovnání vlivu tvaru mostovky na velikost horizontální síly, na vztah mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ na modelu: a) s jednotnou tloušťkou, b) se šikmými náběhy, c) s lávkami dole a d) s lávkami nahoře . . . . . 50
3.11 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 51
3.12 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen hydraulický poloměr $R$ souhrnně pro všechny modely mostovky 52
3.13 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen omočený obvod $D$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . 52
3.14 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky 52
3.15 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,95}$ po jeho úpravě poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . 53
3.16 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 53
3.17 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsových číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 54
3.18 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky 54

3.19 Graf vztahu mezi mediánem $F_{x,0,50}$ a kvantilem $F_{x,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsových číslem $Re(R)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . 54
3.20 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 55
3.21 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, ve kterém byl za vzdálenost $L$ dosazen hydraulický poloměr $R$ souhrnně pro všechny modely mostovky 55
3.22 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 56
3.23 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky 56
3.24 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 57
3.25 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 57
3.26 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po úpravě kvantilu Froudovým číslem $Fr$ pro všechny modely mostovky . . . . . 58
3.27 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 58
3.28 Graf vztahu mezi mediánem $F_{y,0,50}$ a kvantilem $F_{y,0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 58
3.29 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 59
3.30 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 59
3.31 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 60
3.32 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky 60

3.33 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, Reynoldsovým číslem $Re(R)$, Reynoldsovým číslem $Re(D)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 60
3.34 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 61
3.35 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 61
3.36 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po úpravě kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(D)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 62
3.37 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, souhrnně pro všechny modely mostovky 62
3.38 Graf vztahu mezi mediánem $M_{0,50}$ a kvantilem $M_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$, Reynoldsovým číslem $Re(R)$, Reynoldsovým číslem $Re(D)$, Newtonovým číslem $X$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 62
3.39 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 63
3.40 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 63
3.41 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po úpravě kvantilu Freudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky 64
3.42 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 64
3.43 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,95}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 64
3.44 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ původních dat souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 65
3.45 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Reynoldsovým číslem $Re(R)$, souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 65
3.46 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po úpravě kvantilu Freudovým číslem $Fr$ souhrnně pro všechny modely mostovky 66

3.47 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a Reynoldsovým číslem $Re(R)$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 66
3.48 Graf vztahu mezi mediánem $\Delta H_{0,50}$ a kvantilem $\Delta H_{0,05}$ po přenásobení kvantilu Froudovým číslem $Fr$ a poměrným zatopením $h^*$ souhrnně pro všechny modely mostovky . . . . . 66

# SEZNAM TABULEK


2.1 Součinitele pro výpočet mostních objektů dle [5] . . . . . 14
2.2 hodnoty součinitelů zatopení $\sigma_z$ v závislosti na $h_\sigma/h_p$ [6] . . . . . 20
3.1 tíhy a hmotnosti jednotlivých typů modelu mostovky [15] . . . . . 34
3.2 $Q$ - zkušební průtok, $v$ - rychlost vody při zkušebním průtoku a $h$ - hloubka vody ve vzdálenosti 300 mm před modelem při zkušebním průtoku . . . . . 35
3.3 kvantil $F_{x,0,95}$, kvantil $F_{x,0,05}$ a medián $F_{x,0,50}$ horizontální síly $F_x$ pro jednotlivé modely mostovky . . . . . 40
3.4 kvantil $F_{y,0,95}$, kvantil $F_{y,0,05}$ a medián $F_{y,0,50}$ vertikální síly $F_y$ pro jednotlivé modely mostovky . . . . . 43
3.5 kvantil $M_{0,95}$, kvantil $M_{0,05}$ a medián $M_{0,50}$ horizontální síly $M$ pro jednotlivé modely mostovky . . . . . 46
3.6 kvantil $\Delta H_{0,95}$, kvantil $\Delta H_{0,05}$ a medián $\Delta H_{0,50}$ horizontální síly $\Delta H$ pro jednotlivé modely mostovky . . . . . 49