



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky

**Optimalizace horní rejdý plavební komory Modřany na
fyzikálním modelu**

**Optimization of the Modřany lock with the use of the
physical scale model**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jan Hřebřina

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Praha, 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|---|-------------------|-----------------------------|
| Příjmení: <u>Hřebřina</u> | Jméno: <u>Jan</u> | Osobní číslo: <u>468383</u> |
| Zadávací katedra: <u>142 - Katedra hydrotechniky</u> | | |
| Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u> | | |
| Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u> | | |

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

| | |
|--|--------------------------|
| Název bakalářské práce: <u>Optimalizace horní rejdy plavební komory Modřany na fyzikálním modelu</u> | |
| Název bakalářské práce anglicky: <u>Optimization of the Modřany lock with the use of the physical scale model</u> | |
| Pokyny pro vypracování: Na vodním díle Modřany je v současné době se zastavována plavba již při průtoku 450 m ³ .s ⁻¹ . Důvodem jsou příliš vysoké hodnoty příčné složky rychlosti v okolí dělících zdí rejd plavební komory. V roce 2018 byla na 2D matematickém modelu ověřena řada možných úprav dělící zdi horní rejdy a na základě výsledných doporučení zadal státní podnik Povodí Vltavy zpracování optimalizace stavebních úprav na fyzikálním modelu realizovaném ve VÚV TGM v.v.i. Cílem probíhajícího výzkumu je zajištění bezpečných plavebních podmínek v okolí plavebního stupně až do průtoku 600 m ³ /s ve Vltavě. Cílem bakalářské práce je popis problematiky plavebních podmínek v rejdách plavebních komor s ohledem na bezpečnost plavebního provozu. V aplikační části se student zapojí do přípravy fyzikálního modelu a výzkumu na fyzikálním modelu ve VÚV TGM, v.v.i. Bakalářská práce bude obsahovat popis metodiky výzkumných prací, získané výsledky a technický popis optimalizovaného řešení dělící zdi horní rejdy plavební komory. Seznam doporučené literatury: Gabriel, P., Grandtner, M., Průcha, M., Výbora, P.: Jezy. SNTL, Praha 1989. Čábelka, J., Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Academia Praha 1987. Čábelka, J.: Vodní cesty a plavba. SNTL/ALFA, Praha 1976. | |
| Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur</u> | |
| Datum zadání bakalářské práce: <u>17.2.2020</u> Termín odevzdání bakalářské práce: <u>17.5.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i> | |
| Podpis vedoucího práce | Podpis vedoucího katedry |

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

| | |
|---|---------------------|
| <i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i> | |
| <u>19.2.2020</u> | |
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré potřebné informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21.5 2020

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat především panu doc. Dr. Ing. Pavlu Fošumpaurovi za poskytnutí příležitosti účastnit se v rámci bakalářské práce výzkumu ve výzkumném ústavu, které mi přineslo spoustu zkušeností. Děkuji za odborné vedení, trpělivost, cenné rady a pomoc při zpracování této práce.

Dále bych chtěl velice poděkovat panu Ing. Pavlu Balvínovi a panu Ing. Janu Hlomovi z Výzkumného ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v.v.i., že mi umožnili se na výzkumu podílet, za vřelé přijetí v týmu, poskytnutí pracovního zázemí, za jejich trpělivost a odborné rady.

Abstrakt a klíčová slova:

V současné době je snaha navýšit maximální plavební průtok v úseku Vltavy přes vodní dílo Modřany, kde je plavba zastavována již při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Důvodem jsou vysoké příčné složky vektoru rychlosti v blízkosti zhlaví dělící zdi a zhlaví průtočných svodidel horní rejdy plavební komory Modřany. V roce 2018 byla na 2D matematickém modelu ověřena řada možných úprav dělící zdi horní rejdy a na základě výsledných doporučení byl realizován ve Výzkumném ústavu vodohospodářském v.v.i. fyzikální model zabývající se optimalizací stavebních úprav pro zajištění bezpečných plavebních podmínek až do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Práce popisuje problematiku plavebních podmínek v rejdách plavebních komor a metodiku výzkumných prací na hydraulickém modelu včetně technického popisu optimalizovaného řešení dělící zdi horní rejdy plavební komory Modřany.

Klíčová slova: Vodní dílo Modřany, bezpečné plavební podmínky v rejdách plavebních komor, fyzikální model.

Summary:

The effort to elevate maximum navigation flow in section of river Vltava through hydraulic structure Modřany is currently increasing. Navigation is being canceled as soon as the flow reaches $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The reason to stop the navigation is high transverse component of velocity around the end of upstream dividing wall and flow barriers. In 2018 there was made 2D mathematical model of dividing wall, which offered many possible modifications. Based on the results of the mathematical model there was made physical scale model dealing with these modifications to ensure safe navigation conditions up to $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ by T. G. Masaryk Water Research Institute. This bachelor thesis deals with the problems of navigation conditions in locks and describes the process of research work during the hydrological modelling including final results of dividing wall modification.

Keywords: Hydraulic structure Modřany, safe navigation conditions in locks, physical scale model.

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. ÚVOD A CÍLE..... | 3 |
| 2. VODNÍ DÍLO MODŘANY..... | 5 |
| 3. PROBLEMATIKA PLAVEBNÍCH PODMÍNEK V REJDÁCH PLAVEBNÍCH KOMOR | 8 |
| 4. HYDROTECHNICKÝ VÝZKUM | 12 |
| 4.1 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ | 13 |
| 4.2 PODMÍNKY MECHANICKÉ PODOBNOSTI..... | 13 |
| 4.3 MEZNÍ PODMÍNKY MECHANICKÉ PODOBNOSTI..... | 14 |
| 5. FYZIKÁLNÍ MODEL VD MODŘANY | 15 |
| 5.1 PODKLADY PRO VÝSTAVBU HYDRAULICKÉHO MODELU..... | 16 |
| 5.2 VOLBA MĚŘÍTKA..... | 16 |
| 5.3 UMÍSTĚNÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU | 17 |
| 5.4 VÝSTAVBA HYDRAULICKÉHO MODELU | 17 |
| 6. SIMULACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK | 23 |
| 6.1 HORNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKA | 23 |
| 6.2 DOLNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKA..... | 23 |
| 6.3 MANIPULAČNÍ VARIANTY | 24 |
| 7. MĚŘENÉ VELIČINY NA MODELU | 27 |
| 7.1 MĚŘENÍ PRŮTOKŮ..... | 27 |
| 7.2 MĚŘENÍ HLADIN | 28 |
| 7.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTÍ..... | 30 |
| 8. PŘÍPRAVA MODELU PŘED VÝZKUMEM | 32 |
| 9. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ | 32 |
| 9.1 VARIANTA 01 | 34 |
| 9.1.1 METODIKA MĚŘENÍ | 36 |

| | |
|--|----|
| 9.1.2 VARIANTA 01 - VÝSLEDKY MĚŘENÍ..... | 37 |
| 9.1.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 01..... | 39 |
| 9.2 VARIANTA 02 | 41 |
| 9.2.1 METODIKA MĚŘENÍ | 41 |
| 9.2.2 VARIANTA 02 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ..... | 42 |
| 9.2.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 02..... | 44 |
| 9.3 VARIANTA 03..... | 45 |
| 9.3.1 METODIKA MĚŘENÍ | 46 |
| 9.3.2 VARIANTA 03 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ..... | 47 |
| 9.3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 03..... | 49 |
| 9.4 OPTIMALIZOVANÉ ŘEŠENÍ HORNÍ REJDY PLAVEBNÍ KOMORY MODŘANY | 50 |
| 10. ZÁVĚR | 52 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 55 |
| LITERATURA | 55 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 56 |

1. ÚVOD A CÍLE

V současné době v České republice vrcholí snaha o dokončení splavnění naší nejvýznamnější vodní cesty, kterou je Labsko – vltavská vodní cesta. Snahou je tak navýšit podíl vodní dopravy v naší dopravní soustavě. Plnému využití Labské vodní cesty, která je součástí integrované sítě evropských vodních cest, brání nesplavný úsek Chvaletice – Pardubice a regulačně splavný úsek Labe mezi Střekovem a Hřenskem, kde Labe opouští hranice České republiky. Z tohoto důvodu je v posledních několika letech připravován projekt plavebního stupně Přelouč II., pro zajištění splavnění Labe až do Pardubic a plavební stupeň Děčín, jehož realizací by měla být zajištěna splavnost úseku Střekov - Hřensko po celý rok. [1,5]

I na Vltavské vodní cestě je připravováno a realizováno několik projektů, které mají za cíl rozvoj a efektivnější využívání této vodní cesty. Snahou je především vybudování lodních zdvihadel na přehradách Orlík a Slapy, pro zajištění splavnění Vltavy mezi Prahou a Českými Budějovicemi. Vltava je od soutoku s Labem až po Třebenice (ř.km 91,5), včetně výústní části vodního toku Berounky po přístav Radotín, dle zákona č.114/1995 Sb. zařazena mezi sledované dopravně významné využívané vodní cesty. Splavnost této významné vodní cesty je ale omezena na několika místech. Od roku 2018 v úseku Mělník – Praha – Radotín probíhá prohlubování problematických lokalit Vltavské vodní cesty pro dosažení ponoru srovnatelného s Labskou vodní cestou. To umožní zvýšení dopravního využití na Vltavě. Avšak plnému využití tohoto úseku Vltavy brání i jiné skutečnosti. Podle vyhlášky č. 67/2015 Sb. nastává při různých průtocích na různých úsecích Vltavy vodní stav, ohrožující bezpečnost plavby. [12]

Jedním takovým úsekem je úsek Vltavy přes vodní dílo Modřany, které se nachází v hlavním městě Praha pod soutokem Berounky s Vltavou, na jejím 62,209 ř. km. V současné době je v tomto úseku Vltavy zastavována plavba již při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a vyšším. Hodnota maximálního plavebního průtoku je pro

jednotlivé úseky Vltavy různá. V úseku Vltavy Slapy-Třebeňovice až Praha-Velká Chuchle je to průtok $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a v úseku Praha-Velká Chuchle až Praha-Jiráskův most dokonce $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Plavební stupeň Modřany tak redukuje maximální plavební průtok na hodnotu $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v tomto úseku Vltavy. Důvodem jsou vysoké hodnoty příčných složek rychlostí v oblasti dělící zdi horní rejdy plavební komory Modřany, které upravuje vyhláška č. 222/1995 Sb. a to konkrétně § 6 odstavec (3), kde je uvedeno, že *rejdy jsou od řečiště odděleny dělícími zdmi nebo hrázemi, které svým lícem navazují na líc zdi plavební komory. Zhlaví dělící zdi nebo hráze musí být situováno a uspořádáno tak, aby příčná složka rychlosti proudění vody v plavební dráze bezprostředně před svodidly nebo zhlavím dělící zdi nepřekročila $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.*

Tím, že se úsek Vltavy přes plavební komoru Modřany nachází na významné vodní cestě, je snahou v posledních letech navýšit maximální plavební průtok tak, aby zde bylo možné bezpečné proplutí lodí i při průtocích 450 až $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V roce 2018 byla zpracována studie proveditelnosti Fakultou stavební Českého vysokého učení technického v Praze, která se zabývala posouzením proudových poměrů pomocí 2D matematického modelu v okolí dělících zdí rejd plavební komory Modřany. Ze studie vyplývá, že za současné situace v oblasti dolní rejdy není překročena limitní hodnota příčné složky rychlosti ani při průtocích $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Naopak v horní rejdě v oblasti bezprostředně před svodidly, při stejném průtoku, dosahuje příčná složka rychlosti hodnot až $0,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ani při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ není splněno kritérium pro hodnotu příčné složky, kdy v oblasti před svodidly dosahovala hodnot $0,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Na 2D matematickém modelu byla ověřena řada možných variant úprav dělících zdí horní rejdy a na základě výsledného doporučení zadal státní podnik Povodí Vltavy zpracování optimalizace stavebních úprav na fyzikálním modelu realizovaném ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka v.v.i. Cílem výzkumu je návrh doplnění dělící zdi plavební komory Modřany, který zajistí bezpečné plavební podmínky až do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v okolí plavebního stupně. [3]

Cílem této bakalářské práce je popis problematiky plavebních podmínek v rejdách plavebních komor s ohledem na bezpečnost plavebního provozu. Popis

metodiky výzkumných prací a získaných výsledků z výzkumu na hydraulickém modelu. Dále technický popis optimalizovaného řešení dělící zdi horní rejdy plavební komory Modřany.

2. VODNÍ DÍLO MODŘANY

Od šedesátých let minulého století probíhala rekonstrukce Labsko – vltavské vodní cesty na parametry IV. třídy mezinárodní klasifikace vodních cest, kdy došlo také k výstavbě několika chybějících zdymadel na obou řekách. Jedním z těchto vodních staveb byl i na řece Vltava plavební stupeň Modřany. Vodní dílo bylo vybudováno především za účelem splavnění výustního úseku Berounky a k zajištění plavebních podmínek nad Prahou. Stavba začala v roce 1979 a dokončená byla v roce 1988. [3,6]

Plavební stupeň Modřany se skládá ze sportovní propusti, malé vodní elektrárny, pohyblivého jezu o 3 polích, plavební komory, jezové zdrže a zázemí vodního díla, jejichž dispoziční uspořádání je patrné z obrázku 1. [3]



Obrázek 1: VD Modřany - Ortofoto mapa dostupná online z webových stránek - ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální)

Účelem vodního díla je zajištění plavebních podmínek pro vodní dopravu, stabilizovat minimální hladiny a spádové poměry říční tratě, využití hydroenergetického potenciálu jezu v průběžné malé vodní elektrárně a zajištění povolených a smluvních odběrů podle příslušných povolení k nakládání s vodami. Dále lze využívat jezovou zdrž k neřízené rekreaci, sportovní plavbě a sportovnímu rybolovu. Omezeně lze využívat zadržovanou vodu jezem i pro krátkodobé nadlepšení průtoků v toku pod vodním dílem při výskytu havarijních znečištění. [3]

Objekt jezu je tvořen 3 jezovými poli, o šířce 27 m, oddělené od sebe pilíři o šířce 3 m (obrázek 2). Hradící konstrukcí je ocelová dutá klapka, která v příčném směru ve sklopené poloze, společně s pevným prahem, tvoří práh Jamborova typu. Maximální hrazená výška dutých klapek je 3,30 m. Manipulace na vodním díle se provádějí dle přítoku s cílem dodržet nominální vzdutou hladinu jezem na kótě 189,30 m n.m. s přípustnou tolerancí + 20 a – 0 cm a zároveň zachovat průtok pod vodním dílem alespoň $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ resp. $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pokud není stanoveno jinak vodoprávním úřadem. Neovladatelný průtok nastává při průtoku $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. [3]



Obrázek 2: Objekt jezu – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3]

Malá vodní elektrárna (MVE) je umístěna při levém břehu Vltavy, kde navazuje na jezový práh levého jezového pole stěnou tvořící levobřežní pilíř jezu. Objekt vodní elektrárny má délku 34,3 m a šířku 24,3 m. Elektrárna je vybavena třemi soustrojími s Kaplanovými turbínami s maximální hltností $3 \times 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Provoz MVE je omezen nutností přepadu minimálně $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ přes jezové pole. Dále po dosažení kóty 188,30 m n.m. dolní vody dochází k odstavení elektrárny pro nedostatečný spád. Základní údaje o MVE jsou následující: [3]

| | |
|------------------|---|
| Návrhový průtok | $3 \times 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Minimální průtok | 3×10 |
| Maximální spád | 2,25 m |
| Minimální spád | 1,50 m |
| Návrhový spád | 2,00 m |

Plavební komora Modřany je situovaná na pravém břehu Vltavy. Jedná se o dvoulodní plavební komoru, která je v příčném řezu navržena jako polorámová, železobetonová konstrukce. V horním ohlaví je vybavena typem vrat pro přímé podzáporníkové plnění systém Čábelka s dobou otevření 1 min. Ve dně komory v oblasti poklopových vrat je navržen vývar. Střední a dolní vrata jsou vzpěrná s otvory pro přímé prázdňení. U horního i dolního ohlaví jsou instalována svodidla. Plavební komora je vybavena běžným zařízením, jako například pacholaty, pevnými vázacími trny a žebříky. Parametry plavební komory jsou následující: [3]

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| Užitná délka | 192,10 m |
| Užitná šířka | 12,00 m |
| Celková délka plavební komory | 230,30 m |
| Horní užitná délka | 89,40 m |
| Dolní užitné délka | 85,20 m |
| Maximální překonávaný spád | 2,40 m |
| Minimální hloubka | 3,5 m |
| Doba plnění | cca 5 min |
| Doba prázdňení | cca 3,5 – 5 min |



Obrázek 3: Plavební komora Modřany – pohled z vrat horního ohlaví – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3]

3. PROBLEMATIKA PLAVEBNÍCH PODMÍNEK V REJDÁCH PLAVEBNÍCH KOMOR

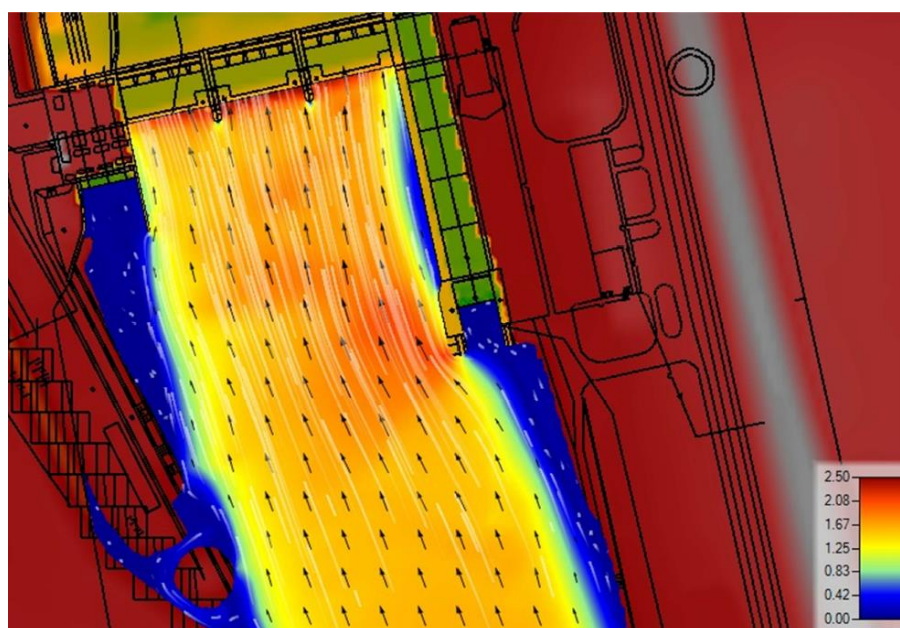
Rejdy plavebních komor jsou vymezené vodní plochy, které navazují na horní ohlaví (horní rejdy), resp. dolní ohlaví (dolní rejdy) plavební komory. Slouží jako manipulační prostor pro přechod všech plavidel mezi plavební tratí vodní cesty a plavební komorou (a naopak). [6]



Obrázek 4: Pohled na horní rejdou plavební komory Modřany – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3]

Před vplutím do rejdou plavební komory musí plavidla v předstihu snížit svou rychlost tak, aby v prostoru rejdou mohly dostatečně přibrzdit a měly tak přiměřenou plavební rychlost pro bezpečné vplutí do připravené plavební komory, případně aby byly schopné v rejdě úplně zastavit, čekají-li na proplavení jiné lodi, nebo plavební komora není na jejich vplutí připravena. Při nižších rychlostech je zpravidla zhoršena manévrovací schopnost lodí, závislá na kormidlech. Ve chvíli, kdy je plavební komora umístěna vedle jezu, jako je tomu na plavebním stupni Modřany (obrázek 1), vzniká, podle J. Čábelky [6], při průtoku vody jezem velká kontrakce vodního proudu s vírovou oblastí za zhlavím dělící zdi a příčné proudění na začátku horní rejdou komory. Vyvolaný vodní proud tak křížuje plavební dráhu před začátkem horní rejdou (obrázek 5). Při nízké kormidelní schopnosti mohou být plavidla vlivem příčného proudění strhávány do plavební dráhy protisměrně plující lodi nebo na přední zhlaví zdi oddělující zdrž od horní rejdou plavební komory. Limitní hodnota pro příčnou složku rychlosti bezprostředně před svodidly nebo zhlavím dělící zdi je podle vyhlášky 222/1995 Sb. $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při vyšších hodnotách může příčná složka rychlosti

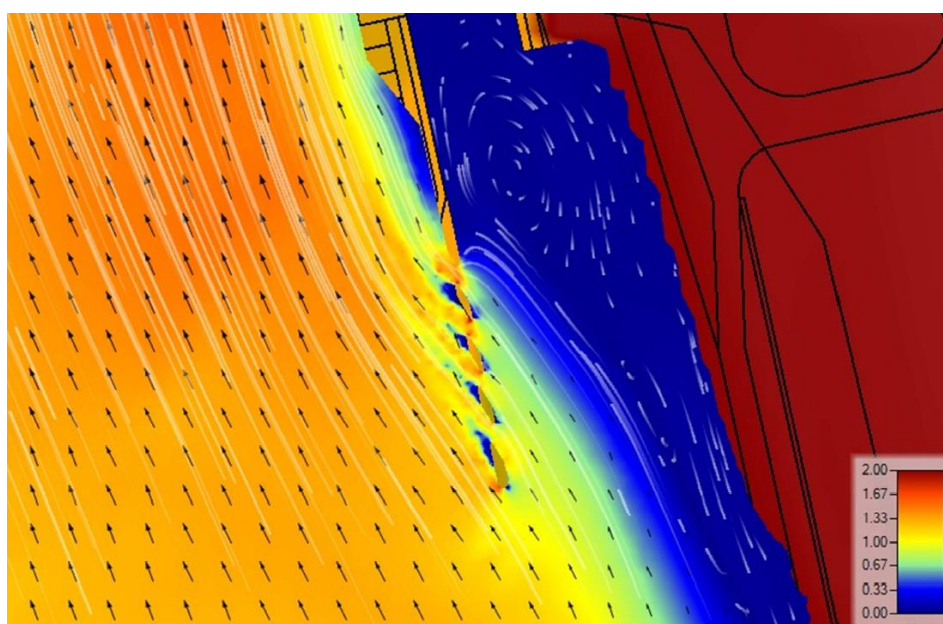
nepříznivě ovlivňovat kurs plavby. Kurs plavby může být vedle vysoké příčné složky rychlosti ovlivněn i silným bočním větrem. Tyto skutečnosti mohou způsobovat časové ztráty, či jiné těžkosti nebo dokonce nehody při proplouvání lodí plavebními komorami. Havárie lodí dnes už nejsou tak časté, díky používání motorových nákladních lodí a postrkových lodních souprav, které mají větší manévrovací schopnost. K bezpečnosti plavby při proplouvání rejdami komor přispívá i výstroj rejd, především se jedná o svodidlové zdi, svodidla nebo svodidlové dalby. [6]



Obrázek 5: Rozdělení celkových rychlostí za současné situace na plavebním stupni Modřany při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ - Studie proveditelnosti, ČVUT v Praze [2]

Vedle zmíněných nepříznivých vlivů na plavbu v rajdách plavebních komor způsobuje příčné proudění a kontrakce vodního proudu s vírovou oblastí další problémy, a to, podle J. Čábelky [6], zhoršení poměrů proudění v profilu jezu a podemílání předního zhlaví dělící zdi. Příkladem, které ve své knize Vodní cesty a plavba J. Čábelka uvádí [6], kdy k nebezpečnému podemletí zhlaví dělící zdi došlo jsou zdymadla Kostelec n. L., Kostomlátky, Snojedy a Klavary, kde se v roce 1946 zřítily velká část horní dělící zdi rejdý komory. [6]

Uvedené skutečnosti si vyžádaly rozsáhlý hydrotechnický výzkum, kdy se hledala vhodná úprava předního zhlaví dělící zdi horní rejdy. Jako vhodné řešení se osvědčilo na několika plavebních komorách prodloužení předního zhlaví dělící zdi proti proudu, ve kterém jsou navržena průtočná okna oddělena pomocí pilířů proudnicového tvaru, jejichž osy svírají s osou dělící zdi vhodný úhel. Díky těmto pilířům dochází k rozdělení vodního proudu tak, že se zmenší příčné složky rychlosti u vjezdu do rejdy (obrázek 6) a odstraní se původní boční kontrakce u předního zhlaví horní dělící zdi i mohutné víry o svislé ose za ním, které ohrožovali stabilitu dělící zdi. Tento koncept se osvědčil na několika plavebních komorách, jako první byl aplikován na zdymadle Klavary, při rekonstrukci zřícení dělící zdi a v posledních letech například na zdymadlech České Vrbné a Hluboká nad Vltavou. [2,4,7]



Obrázek 6: Vliv dělících zdí s průtočnými okny na rozdělení celkových rychlostních poměrů na plavebním stupni Modřany při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ - Studie proveditelnosti, ČVUT v Praze [2]

Další možnou úpravou je prodloužení předního zhlaví dělící zdi bez zprůtočnění. I tímto řešením lze v některých případech zajistit snížení příčného proudění. [4] Z výše uvedeného je zřejmé, že neexistuje jednotné řešení dělící zdi rejdy plavební komory aplikovatelné na všechny případové lokality, kde je snahou snížení příčné složky rychlosti. Navrhování dělících zdí závisí na mnoha faktorech, jako je morfologie terénu, dispoziční uspořádání jednotlivých objektů

plavebního stupně, návrhové průtoky apod. Vyžaduje si rozsáhlý hydrotechnický výzkum, na základě kterého lze usuzovat o vhodnosti daného typu dělící zdi rejdy komor.

V rámci studie proveditelnosti bylo na zdymadle Modřany pomocí 2D matematického modelu ověřena řada úprav dělících zdí horní rejdy plavební komory. Zkoumané úpravy dělící zdi na navazujícím hydraulickém modelu vycházejí ze získaných poznatků v této studii, jejichž technické specifikace a výsledky jsou pospány v kapitole č. 9.

4. HYDROTECHNICKÝ VÝZKUM

Hydrotechnický výzkum je nezbytnou součástí každého připravovaného projektu významných vodních staveb, zajistí tak technicky dokonalý a ekonomicky efektivní návrh vodního díla. [1] Bohužel plavební stupeň Modřany je příkladem, kdy hydrotechnického výzkumu při řešení dispozičního uspořádání jednotlivých objektů vodního díla nebylo využito a dnes se tato skutečnost jeví jako určitý deficit tohoto vodního díla. [2] V dnešní praxi se pro hydrotechnický výzkum používají matematické (numerické) nebo fyzikální modely, avšak nejvhodnější a nejefektivnější přístup se ukazuje jako kombinace obou prostředků. V posledních letech zaznamenala výpočetní technika a technika obecně velký vzestup, to umožnilo i vývoj matematického modelování, kdy jsme dnes schopni pomocí těchto modelů simulovat i složité hydrodynamické jevy. V převážné míře jsou tyto jevy matematicky popisovány pomocí diferenciálních rovnic. Fyzikální modelování se potom soustředí na oblasti výzkumu, kdy nejsme schopni dané hydrodynamické jevy dostatečně matematicky popsat nebo matematická formulace je natolik složitá, že její analytické řešení není v podstatě zvládnutelné. Fyzikální modelování tedy dodnes zastupuje nedílnou součást při hydrotechnickém výzkumu. [1,7]

4.1 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Fyzikální modelování je založeno na podobnosti mezi prototypem (skutečností) a jeho zmenšeným modelem. V případě hydrotechnického výzkumu hovoříme o hydraulických modelech, kde se při zkoumání hydrodynamických jevů vychází z mechanické podobnosti mezi prouděním vody na skutečném vodním díle a prouděním na jeho zmenšeném modelu. Tyto jevy umíme buďto dostatečně matematicky formulovat nebo bereme za základ rozměrovou analýzu fyzikálních veličin, které daný jev ovlivňují. V hydrotechnice se při popisu zkoumaných jevů využívají tři základní fyzikální veličiny, kterými jsou délka (L), čas (T) a hmotnost (M). Výzkum na hydraulickém modelu a jeho výsledky se zhodnocují na základě teorie mechanické podobnosti, která stanoví podmínky. Tyto podmínky je třeba plnit, aby bylo možné výsledky výzkumu převést do skutečnosti. [1,7]

4.2 PODMÍNKY MECHANICKÉ PODOBNOSTI

Vzhledem ke skutečnosti, že na modelu VD Modřany se jedná o proudění s volnou hladinou, vycházejí základní podmínky dynamické podobnosti hydraulických jevů z Froudova zákona podobnosti. K určení vztahu mezi průtokem ve skutečnosti a na modelu bylo použito bezrozměrné Froudovo číslo (Fr), které zajišťuje přibližnou dynamickou podobnost porovnávaných proudění za působení výhradně gravitačních sil. Účinky ostatních sil, jako odpor, tření vazké kapaliny, kapilární síly, objemové pružnosti apod., jsou v porovnání s gravitačními silami zanedbatelné. Při zachování geometrické podobnosti modelu a skutečného díla a současně, jsou-li podobné i okrajové podmínky, je zajištěna jak podobnost mezi silami vyvolanými gravitační silou, tak v širokém rozsahu i mezi odpory způsobenými třením. Proudění na modelu se však musí nacházet v kvadratické oblasti odporu. [1]

Rovnice (4.3.1 a 4.3.2) vyjadřuje rovnost Froudových čísel pro skutečné dílo a jeho model. [1,7]

$$Fr^2 = \frac{v^2}{g \cdot L} = idem \quad (4.3.1)$$

$$\frac{v_S^2}{g \cdot L_S} = \frac{v_m^2}{g \cdot L_m} \quad (4.3.2)$$

Kde g je gravitační zrychlení, v je rychlosti a l délková veličina.

Jestliže veličiny nahradíme příslušnými měřítky, dostaneme základní rovnici pro vyšetřování podobnosti proudění podle Froudova zákona podobnosti. Tato rovnice vychází z geometrické podobnosti jako základu podobnosti mechanické: [1,7]

$$M_{FR} = \frac{M_v^2}{M_g \cdot M_L} = 1 \quad (4.3.3)$$

Vzhledem k tomu, že $M_g = 1$, lze při zvoleném měřítku délek M_L určit měřítko pro ostatní veličiny: [1,7]

- Měřítko podobnosti rychlostí: $\frac{M_v^2}{M_L} = 1; M_v = M_L^{1/2} \quad (4.3.4)$

- Měřítko podobnosti průtoků ($Q = v \cdot S$): $M_Q = M_v \cdot M_L^2 = M_L^{1/2} \cdot M_L^2 = M_L^{5/2} \quad (4.3.5)$

4.3 MEZNÍ PODMÍNKY MECHANICKÉ PODOBNOSTI

Při modelování hydrodynamického jevu s využitím některého ze zákonů mechanické podobnosti, odvozeného pro určitý převážně ovlivňující druh síly, je nutné přičleňovat podmínky omezující jejich platnost, aby nedošlo k ovlivnění

výsledků výzkumu při chybě vzniklé spolupůsobením i ostatních sil než té převládající. [1]

Modelování VD Modřany na fyzikálním modelu je realizována za předpokladu výhradního působení gravitačních sil a pro model je tedy využit Froudův zákon mechanické podobnosti. Aby výsledky výzkumu byly platné musí být podle J. Čábelky a P. Gabriela [1] dodrženy následující mezní podmínky:

- Pro dosažení mechanické podobnosti musí být splněny podmínky geometrické, dynamické a tedy i kinematické podobnosti.
- Modelované proudění se musí nacházet v kvadratické oblasti odporů, v němž jsou ztráty nezávislé na Reynoldsově čísle.
- Povrchová rychlost proudu v okolí objektových modelů má být $u \geq 230 \text{ mm.s}^{-1}$
- Hloubka vodního proudu na modelu $h \geq 15 \text{ mm}$
- Světlná šířka přelivného pole jezu nebo přehrady musí být na modelu $b_0 \geq 60 \text{ mm}$.
- Šířka hydraulického žlabu, do nichž se umísťují výsekové modely $b \geq 200 \text{ mm}$.

5. FYZIKÁLNÍ MODEL VD MODŘANY

Model zobrazuje vodní dílo Modřany a části přilehlého koryta horní i dolní vody. Ve skutečnosti se jedná o úsek dlouhý 551 m na řece Vltava mezi 62,108 ř.km a 62,659 ř.km. Model byl zkonstruován jako nepřevýšený, říční, výsekový s nepohyblivým betonovým dnem. Veškeré objekty byly ze skutečnosti do modelu převedeny podle zásad mechanické podobnosti.

5.1 PODKLADY PRO VÝSTAVBU HYDRAULICKÉHO MODELU

Základním podkladem pro výstavbu hydraulického modelu bylo geodetické zaměření koryta nadjezí i podjezí vodního díla Modřany vyměřovací lodí Valentýna II, kterou provozuje Povodí Vltavy, státní podnik. Toto plavidlo zaměřuje jednou až dvakrát ročně koryto Vltavy pomocí ultrazvukových aparátů, které vyhodnocují hloubky ve formě souřadnic x, y, z. Povodí Vltavy tyto data poté poskytuje ve formátech *.JPEG, *.DXF a *.DAT., kde je toto zaměření vyhodnoceno formou vrstevnic po 20 cm. [2] Pro hydraulický model plavebního stupně Modřany bylo použito zaměření z května 2019 v úseku Vltavy 62,3 – 63,8 ř.km pro horní vodu a pro dolní vodu zaměření z června 2018 v úseku Vltavy 61,95 – 62,1 ř.km.

Informace o provozu vodního díla Modřany byly čerpány z poskytnutého manipulačního řádu, který vypracoval Centrální vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, státní podnik, v červenci 2014. Součástí byla i výkresová dokumentace vodního díla Modřany, podle které byl konstruován objekt malé vodní elektrárny a jezu, včetně pohyblivé hradící konstrukce.

5.2 VOLBA MĚŘÍTKA

Model byl vybudován v měřítku geometrického zmenšení 1:50, které platí jednotně pro délku, šířku i hloubku: $M_l = M_b = M_h = 50$, celková plocha tohoto modelu je asi 55 m². Toto měřítko bylo zvoleno především na základě prostorové dispozice hydraulické laboratoře ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka a na základě podmínek mechanické podobnosti. Především, aby měřené hodnoty složek rychlostí, v okolí navržené dělící zdi horní rejdny plavební komory, nebyly v měřítku modelu příliš nízké a byly tak měřitelné.

5.3 UMÍSTĚNÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU

Pro výstavbu hydraulického modelu byla zvolena malá laboratoř ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka. V této hydraulické laboratoři je na stálo zabudovaná betonová vana o rozměrech 21 x 5 m a výškou svislých zdí 0,65 m. Na delších stranách betonové vany jsou instalovány vodorovné kolejnice, které byly využity k měření hladin pomocí hrotové měřítka a na měření podélných a příčných složek rychlostí. V místě nátoky vody do betonové vany jsou umístěny rošty vyplněné štěrkem z důvodu zklidnění, utlumení proudící vody a zajištění rovnoměrného nátoky. V laboratoři se nachází pohyblivý jeřáb s únosností 1000 kg, který byl především využit pro dopravu materiálu potřebného na stavbu modelu.

Pro cirkulaci vody byl využit stávající hydraulický okruh, kde čerpací stanice dopravuje vodu ze zásobních nádrží, umístěných pod úroveň dna laboratoře, výtlačným potrubím do vysoko položené nádrže. Odtud se voda gravitačně dostává pomocí rozvodného potrubí opatřené šoupátkovým uzávěrem do nádrží s Thomsonovým přelivem, které jsou umístěné těsně před hydraulickým žlabem. Voda proudící z hydraulického žlabu se dostane systémem odtokových kanálů zpět do zásobních nádrží, odkud je znovu čerpána do celého cirkulačního systému.

5.4 VÝSTAVBA HYDRAULICKÉHO MODELU

V první fázi výstavby hydraulického modelu se v betonové vaně rozprostřel štěrk frakce 4–16 a vybuodovala se plavební komora, která je tvořena betonovými tvárnicemi, prostor mezi nimi je vyplněn štěrkem a celý objekt je překryt vrstvou betonu tloušťky 1,5 cm. Vzhledem k tomu, že při měření uvažujeme horní vrata plavební komory jako uzavřená, nebylo tedy třeba prostor plavební komory konstruovat. Proběhla pouze modelace zdí horní rejdý plavební komory v místě před vraty podle zaměření.

Dále byly osazeny příčné profily, které vycházely z digitálního modelu terénu. Příčné profily se volily podle vrstevnic, tedy v místech, kde docházelo ke změně morfologie terénu. Jednotlivé příčné profily byly převedeny do měřítka 1:50, vytištěny, následně lepeny na polypropylénové desky, a nakonec vyřezány podle nalepených mustrů. Ve vodohospodářské laboratoři byly profily ukládány podle vytyčovacího schématu (Obrázek 7). Místo uložení bylo připraveno tak, aby se zde nenacházela žádná nerovnost v podobě zrn šterku apod. Jednotlivé profily musely mít břehy ve stejné výškové úrovni, což bylo kontrolováno pomocí běžné vodováhy. Prostor mezi nimi byl vyplněn šterkem. Následně se provedla modelace šterku (obrázek 8), nad který byla uložena vrstva betonu tloušťky přibližně 1,5 cm (obrázek 9). Morfologie terénu na modelu vychází z dílčích příčných profilů, případně některé detaily z ortofotomap.



Obrázek 7: Osazení příčných profilů



Obrázek 8: Modelace štěrku



Obrázek 9: Betonáž povrchu modelu

Dominantním prvkem celého modelu je malá vodní elektrárna společně s jezovým objektem, který je podle skutečnosti tvořen třemi jezovými poli a má ovládatelnou klapkovou hradicí konstrukci. Jak těleso jezu, tak i malá vodní elektrárna byly vyrobeny z polypropylenu a v modelu jsou uloženy na podkladu tvořeném nosníky se stavitelnými šrouby pro přesné výškové usazení. Na modelu se při výstavbě plavební komory nechala drážka na umístění jezového tělesa (obrázek 10), kdy tento styk plavební komory s tělesem jezu byl zabetonován. Na opačné straně je zabráněno obtékání objektu betonovými tvárnicemi, které jsou postavené napříč mezi stěnou žlabu a tělesem malé vodní elektrárny (obrázek 10).



Obrázek 10: Osazení jezu společně s MVE

V poslední fázi byl nejprve povrch modelu zbaven jemných nečistot a následně natřen cementovou mazaninou a poté i stavební penetrací (obrázek 11). Dále se provedlo barevné znázornění koryta, břehů a ostatních prvků na modelu podle ortofotomap a dalších výkresů (obrázek 13). Podle vytyčovací schémata byla zakreslena sportovní propust, plavební komora a cesty v okolí vodního díla Modřany. Na závěr se podle skutečnosti vytyčily a následně umístily průtočná svodidla (obrázek 12), vyrobeny 3D tiskárnou,

u nátoku do horní rejdy plavební komory. Jednotlivé varianty úprav dělicích zdí byly převedeny do měřítka modelu (1:50), vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PET, přesně osazeny podle vytyčovacího schématu do vymodelovaného terénu a následně zabetonovány tak, aby byla možná jejich případná výměna.



Obrázek 11: Hotová Betonáž včetně natření koryta horní vody cementovou mazaninou.



Obrázek 12: Průtočná svodidla na modelu



Obrázek 13: Barevné znázornění fyzikálního modelu VD Modřany



Obrázek 14: Pohled na VD Modřany srovnatelný s modelovou podobností na obrázku 12 - Ortofoto mapa dostupná online z webových stránek - ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální)

6. SIMULACE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

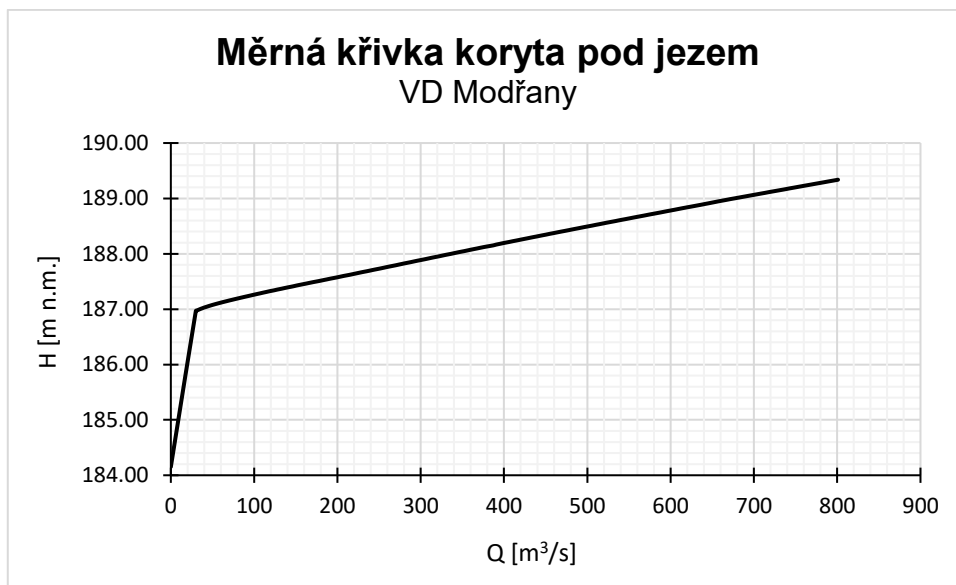
6.1 HORNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKÁ

Před každým měřením bylo nutné na modelu nastavit průtok na jeho začátku – horní okrajová podmínka. Vzhledem k zadání byly na modelu simulovány průtoky $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, při kterém je v současné době na vodním díle Modřany plavba zastavována a průtok $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, který reprezentuje výhledový maximální plavební průtok. [2]

6.2 DOLNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKÁ

Dalším nastavovaným parametrem na modelu byla hladina vody pod jezem a hladina vody nad jezem – dolní okrajová podmínka. Simulované úrovně hladin horní vody vycházely z manipulačního řádu, kde se uvádí, že nominální hladina v jezové zdrži nad jezem je udržována na kótě 189,30 m n.m. s povolenou tolerancí +20 cm a –0 cm. [3]

Hladiny dolní vody, odpovídající sledovaným průtokům, vycházely z měrné křivky koryta pod jezem. (graf 1). V době výzkumu nebyly k dispozici aktualizovaná data pro vytvoření měrné křivky dolní vody. Z tohoto důvodu byly hladiny dolní vody ověřovány a počítány pomocí 2D matematického modelu v programu HEC-RAS 2D z profilů vytvořených ze zaměřeného koryta vyměřovací lodí. Jako vstupní hodnoty zde byly použity průtoky a jim odpovídající úrovně hladin v profilu Vltavy Praha – Chuchle ř. km. 60,1. Ze získaných dat byla vytvořena měrná křivka koryta pod jezem. (graf 1)



Graf 1: Měrná křivka koryta pod jezem – HEC-RAS 2D. Zdroj: Autor bakalářské práce

Dle této křivky je hladina dolní vody při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni $188,40 \text{ m n.m.}$ a při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na úrovni $188,80 \text{ m n.m.}$

6.3 MANIPULAČNÍ VARIANTY

Jako poslední se nastavovaly polohy klapek u jednotlivých jezových polích dle manipulačních variant (tabulka 1). Oproti 2D matematickému modelu z roku 2018 bylo rozhodnuto o vynechání provozu malé vodní elektrárny ze všech manipulačních variant, jak uvádí tabulka 1. Tím se změnilo i rozložení průtokových poměrů v jezových polích. (tabulka 2 a 3). Důvodem byl nedostatečný spád pro provoz malé vodní elektrárny. Dle manipulačního řádu vodního díla Modřany je vzduť hladina jezem udržována na předepsané kótě $189,30 \text{ m n.m.}$ s tolerancí $+ 20$ a $- 0 \text{ cm.}$ Provoz malé vodní elektrárny je odstaven v okamžiku, kdy hladina dolní vody dosáhne kóty $188,30 \text{ m n. m.}$ Podle měrné křivky koryta pod jezem je tato kóta u obou sledovaných průtoků překročena, tudíž nelze zajistit dostatečný spád pro provoz malé vodní elektrárny při těchto průtocích. [2,3]

Tabulka 1: Manipulační varianty

| varianta | jez | | | Poznámky |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | 1. pole | 2. pole | 3. pole | |
| | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | |
| 1 | ANO | ANO | ANO | Všechna pole v provozu |
| 2 | NE | ANO | ANO | 1. pole mimo provoz |
| 3 | ANO | NE | ANO | 2. pole mimo provoz |
| 4 | ANO | ANO | NE | 3. pole mimo provoz |

Tabulka 2: Manipulační varianty pro průtok 450 m³/s

| varianta | jez | | | Poznámky |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | 1. pole | 2. pole | 3. pole | |
| | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | |
| 1 | 150 | 150 | 150 | Všechna pole v provozu |
| 2 | 0 | 225 | 225 | 1. pole mimo provoz |
| 3 | 225 | 0 | 225 | 2. pole mimo provoz |
| 4 | 225 | 225 | 0 | 3. pole mimo provoz |

Tabulka 3: Manipulační varianty pro průtok 600 m³/s

| varianta | jez | | | Poznámky |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | 1. pole | 2. pole | 3. pole | |
| | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | [m ³ .s ⁻¹] | |
| 1 | 200 | 200 | 200 | Všechna pole v provozu |



Obrázek 15: Manipulace s jezovými klapkami pomocí táhla

Oproti předpokladu byl zredukován počet manipulačních variant pro průtok $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, jak uvádí tabulka 3. Důvodem byla malá kapacita jezového pole, které, dle tabulky měrné křivky přepadu přes sklopenou klapku (příloha 1), není schopné, při provozu dvou jezových polí, převést průtok $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dle měrné křivky při maximálním přípustném vzduť hladiny $189,50 \text{ m n.m.}$ a při plném sklopení klapky, je jedno jezové pole schopno převést průtok maximálně $280,48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dolní hladina je v tomto případě na úrovni $188,80 \text{ m n.m.}$ [3]

Pro ostatní vypočtené průtoky v manipulačních variantách je dle tabulky měrné křivky přepadu přes sklopenou klapku kapacita jezového pole dostačující. [3]

7. MĚŘENÉ VELIČINY NA MODELU

7.1 MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

Pro stanovení napouštěného průtoku na modelu se využívalo Thomsonova přelivu s vrcholovým úhlem 90° – pravoúhlý trojúhelníkový přeliv, kde se průtok stanovuje podle rovnice: [7]

$$Q = 1,4 \cdot h^{2,5} \quad (7.7.1)$$

Kde Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je průtok a h [m] je přepadová výška.

Nejprve bylo třeba zjistit hodnoty průtoků přepočtené podle měřítká podobnosti průtoků, který vyplývá z platnosti Froudova zákona podobnosti. [1]

- Měřítka podobnosti průtoku: $M_Q = M_L^{5/2} = 50^{5/2} = 17677,67$
- Přepočet průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: $Q_{450} = 450 : M_Q = 450 : 17677,67 = 0,025456 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 25,456 \text{ l/s}$
- Přepočet průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: $Q_{600} = 600 : M_Q = 600 : 17677,67 = 0,033941 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 33,941 \text{ l/s}$

Při známém průtoku se poté se z Thomsonova vztahu (rovnice 7.7.1) vyjádřila přepadová výška. Následně byla šoupátkovým uzávěrem, umístěným na přiváděcím potrubím, regulována voda tak, aby přepadová výška u Thomsonova přelivu odpovídala vypočtené přepadové výšce napouštěného průtoku, která byla kontrolována hrotovým měřítkem umístěným v nádrži před přelivem. Vzhledem k tomu, že malá laboratoř je vybavena dvěma Thomsonovými přelivy, byl testován vliv přelivu na proudové podmínky v případě používání pouze jednoho, či obou přelivů najednou. Z výsledného šetření se ukázalo, že pro zajištění rovnoměrného nátoku a stejných proudových podmínek bude vhodnější používání obou přelivů současně, tedy že na každém přelivu bude napouštěn poloviční požadovaný průtok.

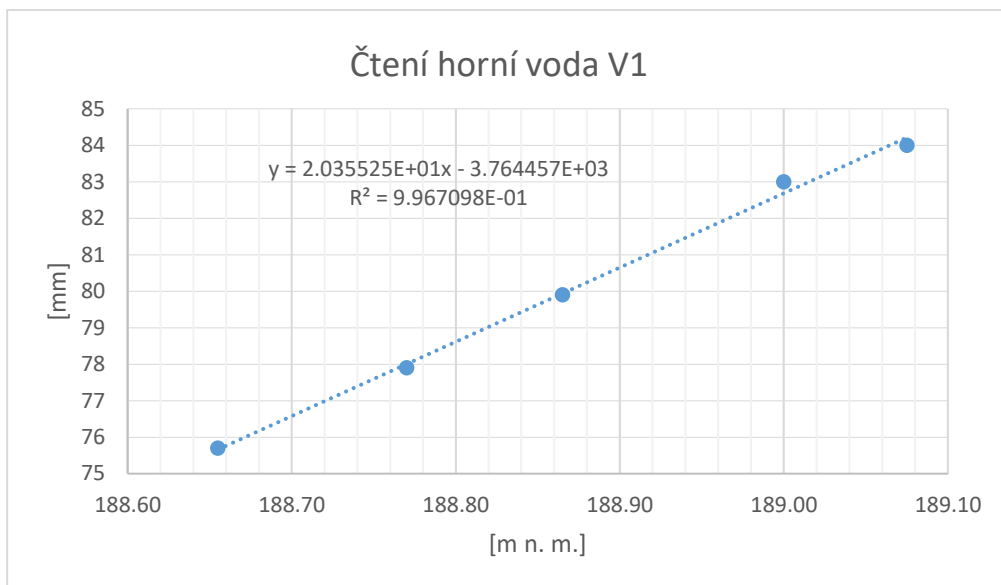
7.2 MĚŘENÍ HLADIN

Pro stanovení úrovně hladiny na modelu se využívá principu spojených nádob, kdy ze dna koryta horní i dolní vody, v blízkosti jezu, je veden odběr, který je zaústěn do měrných válců s hrotovým měřítkem. Měrný válec V1 znázorňuje úroveň hladiny horní vody a měrný válec V2 znázorňuje úroveň hladiny dolní vody. Pro přepočet úrovně hladiny v modelu na skutečnou nadmořskou výšku bylo potřeba pomocí nivelačního přístroje zaměřit jeden bod na modelu a stejný bod na vodním díle Modřany. Bod byl zvolen v místě začátku dělicí zdi horní rejdý plavební komory a výška tohoto bodu byla 604, 2 mm, což odpovídá 190,615 m n. m ve skutečnosti. Pro přesné stanovení hladin v modelu se provedla kalibrace, před kterou bylo nutné nejprve celý model napustit a nechat vodu v něm ustálit. Samotná kalibrace spočívala v zaznamenávání několika naměřených hodnot úrovně hladiny pomocí hrotového měřítka po určitém časovém intervalu, jak v měrných válcích, tak i v samotném modelu. Pro tyto hodnoty bylo dopočteno, pomocí znivelovaného bodu, jaké nadmořské výšce se ve skutečnosti rovnají (tabulka 4).

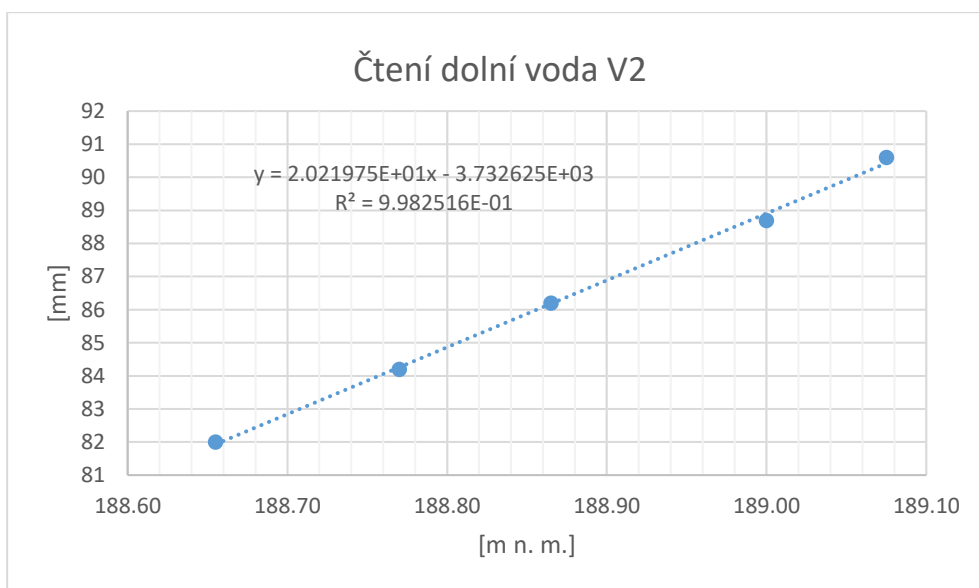
Tabulka 4: Přepočtené úrovně hladin

| Hodnoty na modelu | | | Skutečnost |
|-------------------|------|-------|------------|
| V1 | V2 | Model | |
| [mm] | [mm] | [mm] | [m n. m.] |
| 84,0 | 90,6 | 573,4 | 189,08 |
| 83,0 | 88,7 | 571,9 | 189,00 |
| 79,9 | 86,2 | 569,2 | 188,87 |
| 77,9 | 84,2 | 567,3 | 188,77 |
| 75,7 | 82,0 | 565,0 | 188,66 |

Hodnoty čtené na válci a jejich příslušné nadmořské výšky byly vyneseny do grafu, kde se jim přidělila funkce (graf 2 a 3). Pomocí předpisu této funkce se dopočetly úrovně hladin horní i dolní vody (tab. 5 a 6), které podle měrné křivky koryta pod jezem nastanou při průtocích $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Graf 2: Hodnoty pro kalibraci horní vody



Graf 3: Hodnoty pro kalibraci dolní vody

Tabulka 5: Hodnoty úrovně hladiny horní vody

| Q | H | V1 |
|--------------------------|------------------|-------------|
| [m³/s] | [m n. m.] | [mm] |
| 450 | 189,3 | 88,6 |
| 600 | 189,4 | 90,6 |
| 600 | 189,5 | 92,6 |

Tabulka 6: Hodnoty úrovně hladiny dolní vody, zdroj: Autor bakalářské práce

| Q | H | V2 |
|--------------------------|------------------|-------------|
| [m³/s] | [m n. m.] | [mm] |
| 450 | 188,4 | 76,9 |
| 600 | 188,8 | 84,9 |

Před začátkem měření byly vždy příslušné výšky kontrolovány v měrných válcích hrotovým měřítkem. Úroveň hladiny dolní vody byla regulována zahrazením konce modelu pomocí slupic – kovové pásky zapřené o nosník. Poloha hladiny horní vody byla regulována pomocí manuálně ovládané klapky.

7.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTÍ

Pro měření rychlostí na modelu se používal ultrazvukový hydrometrický přístroj FlowTracker2 (obrázek 16) od americké firmy SonTek, který ke stanovení podélných a příčných složek rychlostí využívá Dopplerova jevu. Zařízení vydává ultrazvukový impulz určité frekvence a na základě změny této frekvence, která je způsobena odrazem od mikročastic proudící ve vodě, stanovuje rychlost těchto částic, resp. rychlost proudící vody. Přístroj se skládá z řídicí jednotky a sondy, obsahující ultrazvukový vysílač a dva přijímače ultrazvukových impulzů. Měřený prostor je ve vzdálenosti 10 cm od sondy a má tvar válce o průměru 6 mm a délky 9 mm. Zařízení je schopné vyhodnocovat i velmi nízké rychlosti proudění. Podmínkou však je množství mikročastic obsažených ve vodě. [8]

Měřící zařízení bylo připevněno na hrotové měřítko, což umožňovalo přesnou manipulaci s měřicí sondou a bylo tak možné zkoumat hodnoty příčné složky rychlostí v různých vzdálenostech a hloubkách (obrázek 16). Zaměřovány byly oblasti, kde by příčné proudění mohlo nepříznivě ovlivňovat kurs plavby lodí. Hodnoty příčné složky rychlostí byly tak zkoumány jak v bezprostřední blízkosti zhlaví dělicí zdi, ale i do určité vzdálenosti před začátkem horní rejdy. V případě zdi s průtočnými okny je třeba mít na paměti, že voda jimi protéká a tudíž i v oblasti zprůtočnění dělicí zdi je nutné zkoumat hodnoty příčné složky.

Hloubky, ve kterých byly rychlosti zaměřovány, byly voleny na základě ponorů lodí. Byly tak zaměřovány rychlosti jak 0,5 tak i 2,2 m pod hladinou. Podle současné vyhlášky je maximální ponor lodí na Vltavě 1,8 m. Probíhající prohrábky by měly zajistit ponor právě 2,2 m. Z tohoto důvodu byly rychlosti zkoumány do této hloubky. [12]



Obrázek 16: Měření příčné složky rychlosti hydrometrickým přístrojem FlowTracek2

Před samostatným měřením byl přístroj vždy umístěn tak, aby se vysílač signálu nacházel 10 cm před měřeným prostorem a zároveň, aby osa vysílaného signálu byla kolmo na zkoumanou dělicí zeď. Následně byl v řídicí jednotce nastaven časový interval o délce jedné minuty, po který přístroj zaznamenával dílčí hodnoty složek rychlostí v měřeném prostoru. Z těchto hodnot přístroj po uplynutí časového intervalu, pomocí aritmetického průměru, vyhodnotil reprezentující hodnoty podélných a příčných složek rychlostí v měřeném prostoru, včetně možné odchylky měření. Tyto hodnoty byly zaznamenávány do příslušného formuláře, následně převedeny podle Froudova zákona podobnosti na skutečné hodnoty a porovnávány s mezní hodnotou příčné složky rychlosti $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kterou upravuje vyhláška 222/1995 Sb.

- Měřítka podobnosti rychlostí: $M_v = M_l^{1/2} = 50^{1/2} = 7.071$

8. PŘÍPRAVA MODELU PŘED VÝZKUMEM

Každému výzkumu na modelu předcházely tyto činnosti:

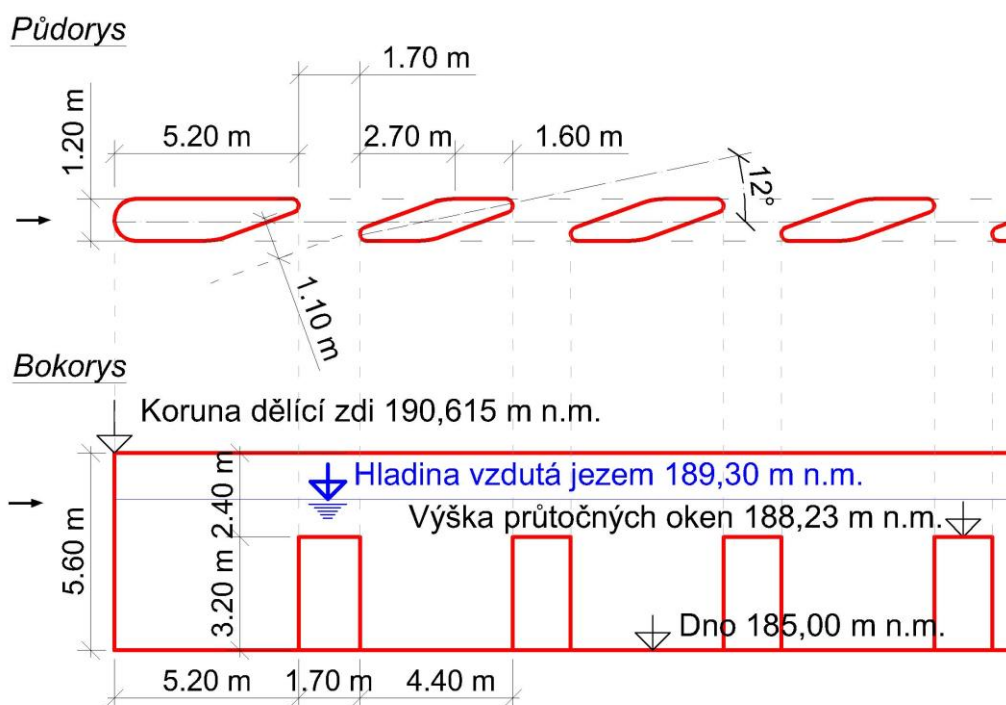
- Nejprve pomocí Thomsonova přelivu byly nastaveny sledované průtoky $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nebo $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Poté byla pomocí zahrazení konce modelu kovovými slupicemi regulována úroveň hladiny dolní vody. Hladina dolní vody byla nastavovaná především za účelem neovlivnit rychlostní pole nad jezem. Je zřejmé, že ve vzdálenosti, kde měření probíhalo, by se tato skutečnost neprojevila, avšak z důvodu jistoty byl zvolen právě takovýto postup.
- Po ustálení hladiny dolní vody následovala regulace úrovně hladiny horní vody pomocí táhel umístěných na nosníku (obrázek 5).
- Obě úrovně hladin byly kontrolovány v příslušném měrném válci hrotovým měřítkem. V tomto okamžiku byly na modelu nastaveny obě okrajové podmínky a bylo možné přejít k měření.
- Před měřením byl nejprve připevněn měřicí přístroj k hrotovému měřítku (obrázek 15) a následně umístěn na nosník. V řídicí jednotce byly nastaveny vstupní informace o měření, a to v jaké výšce se měřicí sonda nachází a časový interval, po který bude zaznamenávat složky rychlostí v daném měřeném prostoru.

9. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

Hodnoty složek rychlostí uvedené v následujících tabulkách jsou již převedené na skutečné rychlosti podle platnosti Froudova zákona podobnosti. Vzhledem k poloze sondy vůči dělicí zdi je značená ve všech uvedených tabulkách příčná složka rychlosti jako V_y .

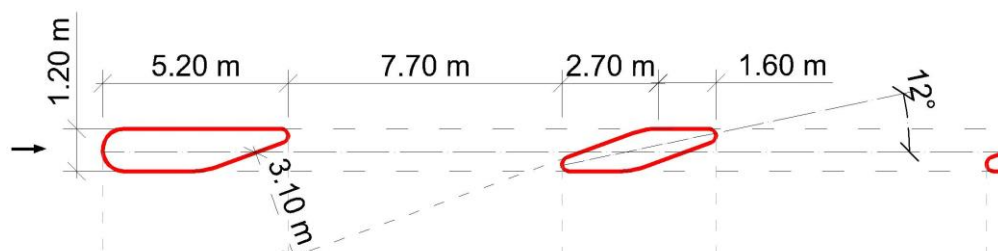
Pro veškeré obrázky znázorňující výsledky měření byla jako podklad použita ortofoto mapa zobrazující plavební stupeň Modřany, která je online dostupná z webových stránek ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální).

Obrázky č. 17 a 18 ukazují geometrii průtočných oken v horní části dělicí zdi použitou při variantě 01 (obrázek č. 17) a při variantách 02 a 03 (obrázek č. 18). Použitá geometrie průtočných oken vychází z geometrie použité ve 2D matematickém modelu [2], která navazuje na zdymadla Hluboká nad Vltavou a České Vrbné, kde tento koncept byl použit. [2]

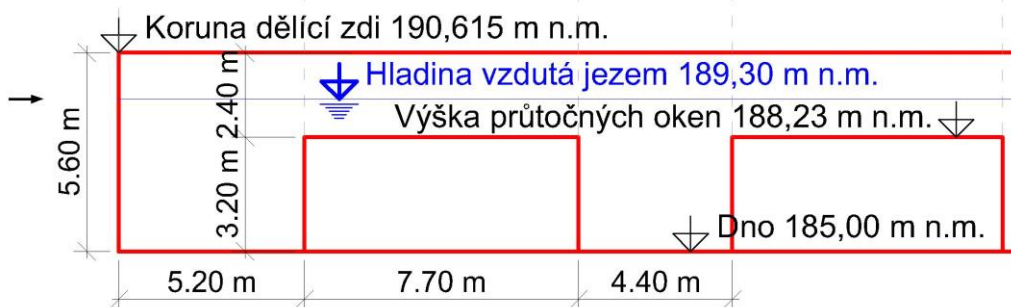


Obrázek 17: Geometrie dělicí zdi v přední části použitá pro variantu 01

Půdorys



Bokorys



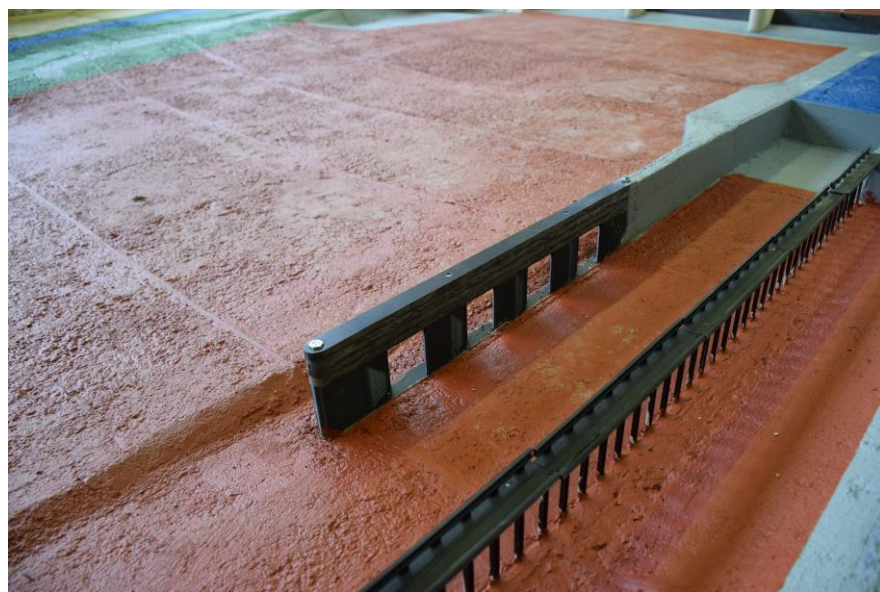
Obrázek 18: Geometrie dělicí zdi v přední části použitá pro varianty 02 a 03

9.1 VARIANTA 01

Jako první zkoumanou variantou byla dělicí zeď o celkové délce 42 m, která má na prvních 25 m navržena čtyři průtočná okna (obrázek 19 a 20). Tato varianta vyšla podle 2D matematického modelu jako nejpříznivější, kdy se hodnoty příčných složek rychlostí u zhlaví navržené dělicí zdi horní rejdy nejvíce přibližovaly limitní hodnotě $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [2] Geometrie průtočných oken dělicí zdi je patrná z obrázku č. 17.



Obrázek 19: Model 1. varianty dělicí zdi



Obrázek 20: Model 1. varianty dělicí zdi

9.1.1 METODIKA MĚŘENÍ

Simulované okrajové podmínky, při kterých měření probíhalo a nastavované manipulační varianty, zvolené pro toto měření, jsou přehledně uvedené v tabulkách 7 a 8. Pro toto měření byl v provozu pouze jeden Thomsonův přeliv, získané výsledky byly porovnány s výsledky při provozu dvou těchto přelivů, kdy se hodnoty výrazně od sebe nelišily. Závěrem bylo rozhodnuto, že pro další varianty budou v provozu oba Thomsonovy přelivy, kdy každý převede poloviční napouštěný průtok.

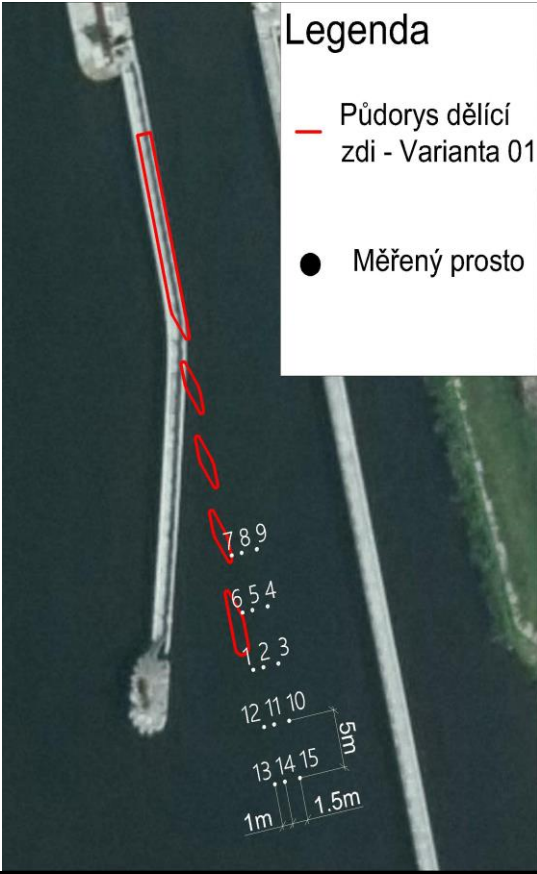
Tabulka 7: Simulované okrajové podmínky při měření dělicí zdi – varianta 01

| Okrajová podmínka | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|
| Horní | Dolní | |
| Nastavovaný průtok [m ³ .s ⁻¹] | Úroveň hladiny horní vody [m n.m.] | Úroveň hladiny dolní vody [m n.m.] |
| 450 | 189,30 | 188,40 |
| 600 | 189,30 | 188,80 |

Tabulka 8: Nastavované manipulační varianty při měření dělicí zdi – varianta 01

| Průtok [m ³ .s ⁻¹] | Manipulační varianty | | | |
|---|----------------------|--------|--------|--------|
| | MWE | POLE 1 | POLE 2 | POLE 3 |
| 450 | × | × | ✓ | ✓ |
| 600 | × | ✓ | ✓ | ✓ |

9.1.2 VARIANTA 01 - VÝSLEDKY MĚŘENÍ

|  | | Rychlostní poměry 1 m pod hladinou | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Podélná složka rychlosti V_x [m.s ⁻¹] | | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | | | | | |
| | | Při průtoku: | | Při průtoku: | | | | | |
| | | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ | | | | |
| 1 | - | 0.37 | - | 0.45 | | | | | |
| 2 | 0.31 | 0.40 | 0.28 | 0.40 | | | | | |
| 3 | 0.33 | 0.44 | 0.26 | 0.36 | | | | | |
| 4 | 0.32 | 0.40 | 0.24 | 0.33 | | | | | |
| 5 | 0.28 | 0.39 | 0.19 | 0.30 | | | | | |
| 6 | 0.32 | 0.40 | 0.11 | 0.28 | | | | | |
| 7 | 0.18 | 0.25 | 0.18 | 0.23 | | | | | |
| 8 | 0.22 | 0.29 | 0.22 | 0.31 | | | | | |
| 9 | 0.27 | 0.37 | 0.24 | 0.33 | | | | | |
| 10 | 0.45 | 0.57 | 0.27 | 0.32 | | | | | |
| 11 | 0.55 | 0.68 | 0.31 | 0.38 | | | | | |
| 12 | 0.68 | 0.79 | 0.32 | 0.40 | | | | | |
| 13 | 0.96 | 1.23 | 0.36 | 0.41 | | | | | |
| 14 | 0.86 | 1.06 | 0.30 | 0.37 | | | | | |
| 15 | 0.64 | 0.75 | 0.25 | 0.33 | | | | | |
| Rychlostní poměry 2 m pod hladinou | | | | | Rychlostní poměry 2,5 m pod hladinou | | | | |
| Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | | Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | |
| | Při průtoku: | | Při průtoku: | | | Při průtoku: | | Při průtoku: | |
| | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ | | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ | 450 m ³ .s ⁻¹ | 600 m ³ .s ⁻¹ |
| 1 | - | 0.21 | - | 0.53 | 1 | - | 0.12 | - | 0.52 |
| 2 | - | 0.30 | - | 0.45 | 2 | - | 0.30 | - | 0.44 |
| 3 | 0.25 | 0.37 | 0.30 | 0.35 | 3 | - | 0.40 | - | 0.41 |
| 4 | - | 0.45 | - | 0.37 | 4 | - | 0.46 | - | 0.36 |
| 5 | - | 0.39 | - | 0.35 | 5 | - | 0.44 | - | 0.39 |
| 6 | 0.38 | 0.41 | 0.28 | 0.34 | 6 | 0.42 | 0.47 | 0.30 | 0.41 |
| 7 | 0.25 | 0.30 | 0.16 | 0.23 | 7 | 0.27 | 0.26 | 0.16 | 0.23 |
| 8 | 0.26 | 0.33 | 0.23 | 0.32 | 8 | - | 0.37 | - | 0.34 |
| 9 | 0.27 | 0.35 | 0.26 | 0.36 | 9 | 0.28 | 0.32 | 0.27 | 0.36 |
| 10 | 0.40 | 0.53 | 0.29 | 0.40 | 10 | 0.39 | 0.50 | 0.28 | 0.39 |
| 11 | 0.43 | 0.55 | 0.30 | 0.41 | 11 | 0.45 | 0.56 | 0.33 | 0.43 |
| 12 | 0.57 | 0.74 | 0.33 | 0.45 | 12 | 0.52 | 0.67 | 0.37 | 0.44 |
| 13 | 0.88 | 1.08 | 0.35 | 0.45 | 13 | 0.87 | 1.06 | 0.37 | 0.49 |
| 14 | 0.77 | 0.91 | 0.30 | 0.38 | 14 | 0.68 | 0.85 | 0.31 | 0.37 |
| 15 | 0.50 | 0.64 | 0.25 | 0.30 | 15 | 0.50 | 0.68 | 0.26 | 0.35 |

Tabulka 9: Výsledky měření dělicí zdi varianty 01

Na obrázcích č. 19 a 20 jsou znázorněné směry vektorů rychlostí měřených prostorů z tabulky č. 9 společně s hodnotou příčné složky rychlosti při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 21: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 1 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 01



Obrázek 22: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2.5 m při průtoku 600 m³.s⁻¹ u varianty 01

9.1.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 01

Již při měření prvních bodů, v oblasti zhlaví dělicí zdi, byly hodnoty příčných složek při obou sledovaných průtocích nad povoleným limitem. V zájmové oblasti byl limit překročen skoro dvojnásobně (Obrázky č. 21 a 22). Vzhledem k tomu, že navržená dělicí zeď horní rejdry neumožňuje zajištění požadavků podle vyhlášky 222/1995 Sb., tedy že příčné složky rychlostí jsou v oblasti zhlaví dělicí zdi větší jak 0,2 m.s⁻¹, nebylo v měření pokračováno.

Pro srovnání byly vyneseny maximální a minimální hodnoty příčné složky rychlosti v měřených prostorech 1,2,11 a 12 (Tabulka 9) ve všech hloubkách do následující tabulky a byly porovnány s hodnotami získaných 2D matematickým modelem. [2] Výsledky se úplně nepřikrývají, což je pravděpodobně způsobené tím, že při výzkumu na hydraulickém modelu byla použita jiná geometrie dělicí zdi, než při 2D matematickém modelu [2], kdy okno není zprůtočněné na celou výšku, ale hladina vzdutá jezem se nachází nad kótou hrany průtočného okna. (viz. obrázky č. 17 a 18)

Tabulka 10: Porovnání získaných výsledků z 2D matematického modelu a fyzikálního modelu

| Získané výsledky | Hodnoty příčné složky rychlosti v okolí zhlaví dělicí zdi při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] | Hodnoty příčné složky rychlosti v okolí zhlaví dělicí zdi při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] |
|-------------------------|---|---|
| Fyzikální model | 0,27 – 0,37 | 0,38 – 0,53 |
| 2D Matematický model | 0,19 – 0,28 | 0,25 – 0,33 |

9.2 VARIANTA 02

Druhá varianta dělicí zdi vychází z varianty první, kdy byla zachována délka dělicí zdi 42 m, která má ale na prvních 25 m navržena dvě průtočná okna místo původních čtyř (obrázek č. 23). Geometrie průtočných oken je patrná z obrázku č. 18. Cílem bylo zjistit vliv velikostí oken při zachování stejné délky dělicí zdi na změnu příčné rychlosti.




Obrázek 23: Model 2. varianty dělicí zdi

9.2.1 METODIKA MĚŘENÍ

Měření u druhé varianty dělicí zdi probíhalo pouze pro nejnepříznivější možnou variantu a to při výhledovém maximálním plavebním průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy jsou v provozu všechna 3 jezová pole. Hladina dolní vody byla nastavena na odpovídající úroveň 188,80 m n. m. a hladina horní vody na úroveň 189,30 m n.m.

9.2.2 VARIANTA 02 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ

|  | | | Rychlostní poměry 0.5 m pod hladinou | | |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | |
| Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] |
| 1 | 0.42 | 0.00 | 1 | 0.42 | 0.00 |
| 2 | - | - | 2 | - | - |
| 3 | 0.76 | 0.16 | 3 | 0.76 | 0.16 |
| 4 | 0.84 | 0.69 | 4 | 0.84 | 0.69 |
| 5 | 0.66 | 0.18 | 5 | 0.66 | 0.18 |
| 6 | 0.76 | 0.14 | 6 | 0.76 | 0.14 |
| 7 | 1.17 | 0.44 | 7 | 1.17 | 0.44 |
| 8 | 1.06 | 0.40 | 8 | 1.06 | 0.40 |
| 9 | 0.91 | 0.31 | 9 | 0.91 | 0.31 |
| Rychlostní poměry 1 m pod hladinou | | | Rychlostní poměry 2.2 m pod hladinou | | |
| Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | | Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | |
| Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] |
| 1 | 0.15 | 0.01 | 1 | 0.21 | 0.01 |
| 2 | - | - | 2 | 0.84 | 0.48 |
| 3 | 0.74 | 0.21 | 3 | 0.78 | 0.39 |
| 4 | 0.57 | 0.67 | 4 | 0.66 | 0.77 |
| 5 | 0.59 | 0.22 | 5 | 0.35 | 0.33 |
| 6 | 0.62 | 0.23 | 6 | 0.53 | 0.25 |
| 7 | 1.15 | 0.49 | 7 | 1.03 | 0.49 |
| 8 | 0.99 | 0.40 | 8 | 0.81 | 0.43 |
| 9 | 0.82 | 0.35 | 9 | 0.69 | 0.38 |

Tabulka 11: Výsledky měření dělicí zdi varianty 02



Obrázek 24: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 0,5 m při průtoku 600 m³.s⁻¹ u varianty 02



Obrázek 25: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2,2 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 02

9.2.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 02

Při zvětšení průtočných oken došlo pouze k malému snížení velikosti příčných rychlostí. Na základě dosavadních výsledků bylo zaměřeno rychlostní pole v různých vzdálenostech od dělicí zdi a bylo zjištěno, že limitní hodnoty $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ byly překročeny i ve vzdálenosti 100 m před začátkem dělicí zdi.

9.3 VARIANTA 03

V návaznosti na výsledcích při měření dělicí zdi – varianta 02 byla navržena nová zeď o celkové délce 108 m, se zprůtočněním na prvních 80 m pomocí šesti otvorů o světlosti 7,7 m (obrázek č 26 a 27), jejíž půdorysné řešení je patrné z obrázku č. 28 a geometrie průtočných oken z obrázku č. 18.



Obrázek 26: Model 3. varianty dělicí zdi



Obrázek 27: Model 3. varianty dělicí zdi



Obrázek 28: Půdorysné řešení dělicí zdi – varianta 03

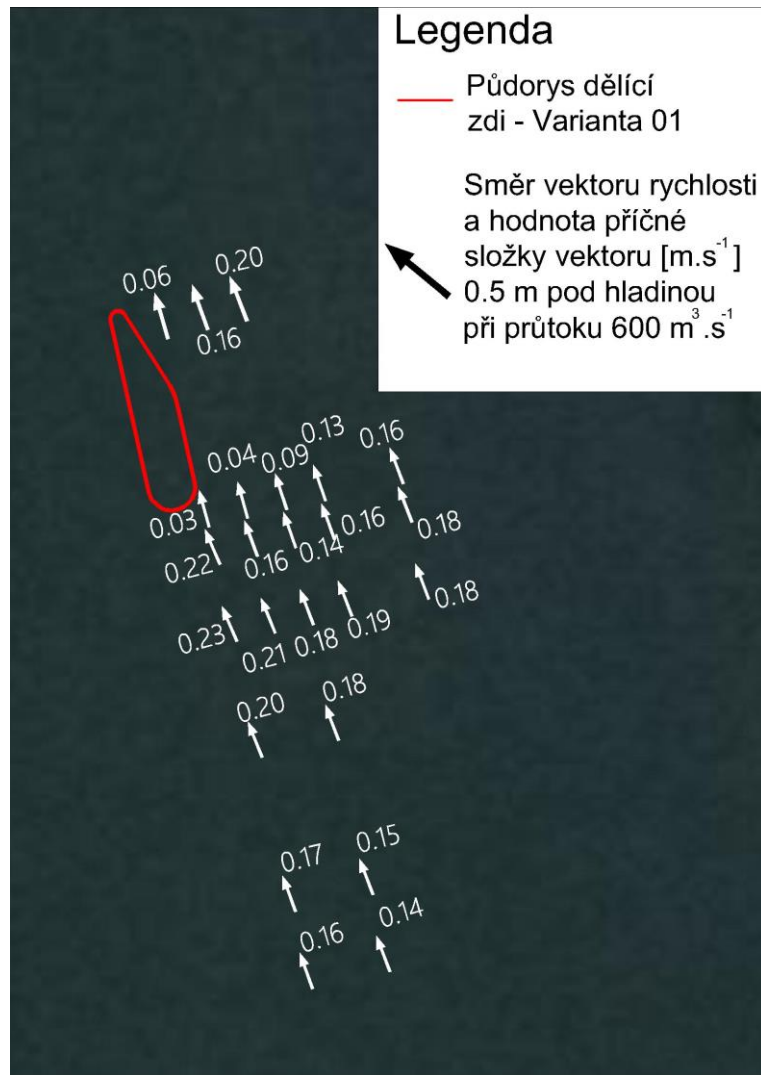
9.3.1 METODIKA MĚŘENÍ

Výzkum probíhal opět pouze při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tedy totožně jako v případě měření druhé varianty dělicí zdi (viz. 9.2.1 Metodika měření).

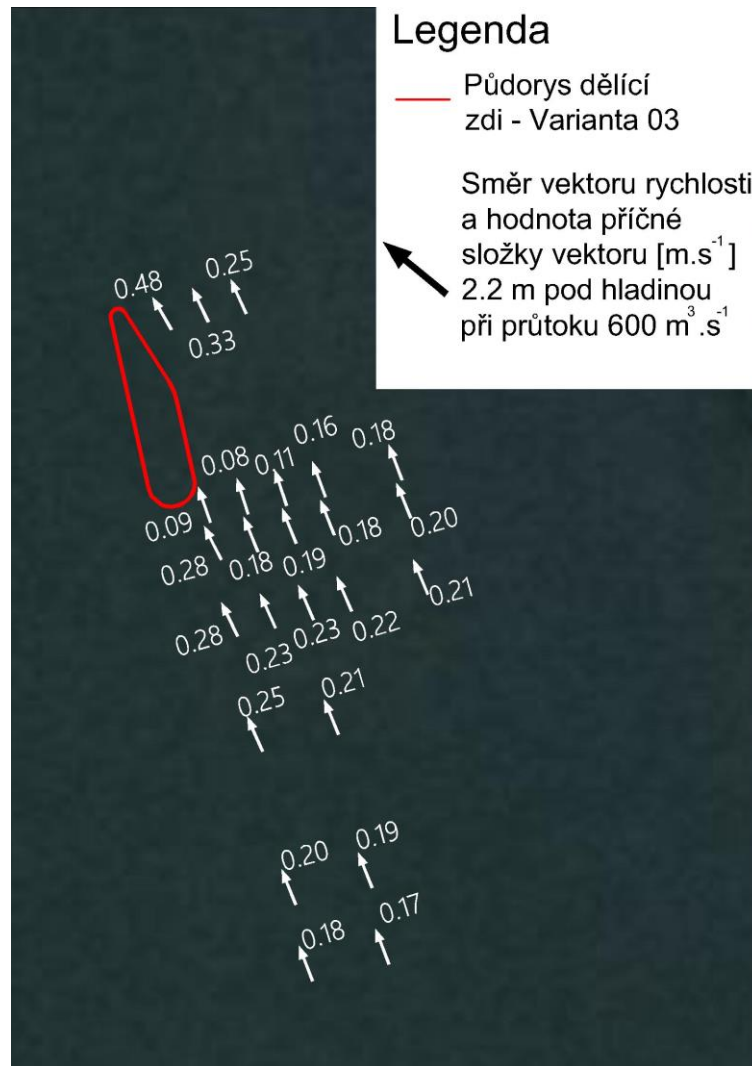
9.3.2 VARIANTA 03 – VÝSLEDKY MĚŘENÍ

| Legenda | | | Rychlostní poměry 0.5 m pod hladinou | | |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | |
| | | | Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] |
| | | | 1 | 1.60 | 0.06 |
| | | | 2 | 1.57 | 0.16 |
| | | | 3 | 1.58 | 0.20 |
| | | | 4 | 1.02 | 0.03 |
| | | | 5 | 1.30 | 0.04 |
| | | | 6 | 1.41 | 0.09 |
| | | | 7 | 1.46 | 0.13 |
| | | | 8 | 1.46 | 0.16 |
| | | | 9 | 1.25 | 0.22 |
| | | | 10 | 1.35 | 0.16 |
| | | | 11 | 1.41 | 0.14 |
| | | | 12 | 1.42 | 0.16 |
| | | | 13 | 1.45 | 0.18 |
| | | | 14 | 1.40 | 0.23 |
| | | | 15 | 1.44 | 0.21 |
| | | | 16 | 1.37 | 0.18 |
| | | | 17 | 1.44 | 0.19 |
| | | | 18 | 1.43 | 0.18 |
| | | | 19 | 1.48 | 0.20 |
| | | | 20 | 1.45 | 0.18 |
| | | | 21 | 1.48 | 0.17 |
| | | | 22 | 1.46 | 0.15 |
| | | | 23 | 1.48 | 0.16 |
| | | | 24 | 1.46 | 0.14 |
| Rychlostní poměry 1 m pod hladinou | | | Rychlostní poměry 2.2 m pod hladinou | | |
| Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | | Při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | | |
| Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] | Měřený prostor | Podélná složka rychlosti V_x [m/s] | Příčná složka rychlosti V_y [m/s] |
| 1 | 1.37 | 0.16 | 1 | 1.58 | 0.48 |
| 2 | 1.58 | 0.18 | 2 | 1.56 | 0.33 |
| 3 | 1.53 | 0.18 | 3 | 1.46 | 0.25 |
| 4 | 1.02 | 0.04 | 4 | 0.93 | 0.09 |
| 5 | 1.34 | 0.06 | 5 | 1.24 | 0.08 |
| 6 | 1.40 | 0.08 | 6 | 1.34 | 0.11 |
| 7 | 1.46 | 0.14 | 7 | 1.36 | 0.16 |
| 8 | 1.41 | 0.16 | 8 | 1.39 | 0.18 |
| 9 | 1.23 | 0.22 | 9 | 1.16 | 0.28 |
| 10 | 1.32 | 0.16 | 10 | 1.24 | 0.18 |
| 11 | 1.36 | 0.15 | 11 | 1.34 | 0.19 |
| 12 | 1.41 | 0.16 | 12 | 1.37 | 0.18 |
| 13 | 1.45 | 0.18 | 13 | 1.30 | 0.20 |
| 14 | 1.40 | 0.25 | 14 | 1.33 | 0.28 |
| 15 | 1.40 | 0.23 | 15 | 1.27 | 0.23 |
| 16 | 1.39 | 0.21 | 16 | 1.32 | 0.23 |
| 17 | 1.43 | 0.20 | 17 | 1.36 | 0.22 |
| 18 | 1.44 | 0.21 | 18 | 1.39 | 0.21 |
| 19 | 1.40 | 0.20 | 19 | 1.39 | 0.25 |
| 20 | 1.44 | 0.20 | 20 | 1.39 | 0.21 |
| 21 | 1.46 | 0.19 | 21 | 1.38 | 0.20 |
| 22 | 1.45 | 0.18 | 22 | 1.36 | 0.19 |
| 23 | 1.48 | 0.17 | 23 | 1.38 | 0.18 |
| 24 | 1.44 | 0.15 | 24 | 1.39 | 0.17 |

Tabulka 12: Výsledky měření dělicí zdi varianty 03



Obrázek 29: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 0,5 m při průtoku $600 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ u varianty 03



Obrázek 30: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2,2 m při průtoku 600 m³.s⁻¹ u varianty 03

9.3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VARIANTY 03

Oproti předchozím variantám byly hodnoty příčné složky bezprostředně před zhlavím dělicí zdi minimální, jak ukazují obrázky č. 29 a 30 a také tabulka č. 12. Vyšších hodnot, než limitní, dosahovaly příčné složky rychlosti v měřených prostorech do vzdálenosti 10 m od zhlaví dělicí zdi převážně v hloubce 2,2 m. (obrázek č. 30).

V případě dělicích zdí s průtočnými okny je nutné zjistit, zdali jsou příčné rychlosti podlimitní v celém rozsahu dělicí zdi, tedy od jejího zhlaví až k ohlaví plavební komory. Bohužel při zpracování této bakalářské práce bylo k dispozici pouze zaměření v oblasti zhlaví dělicí zdi.

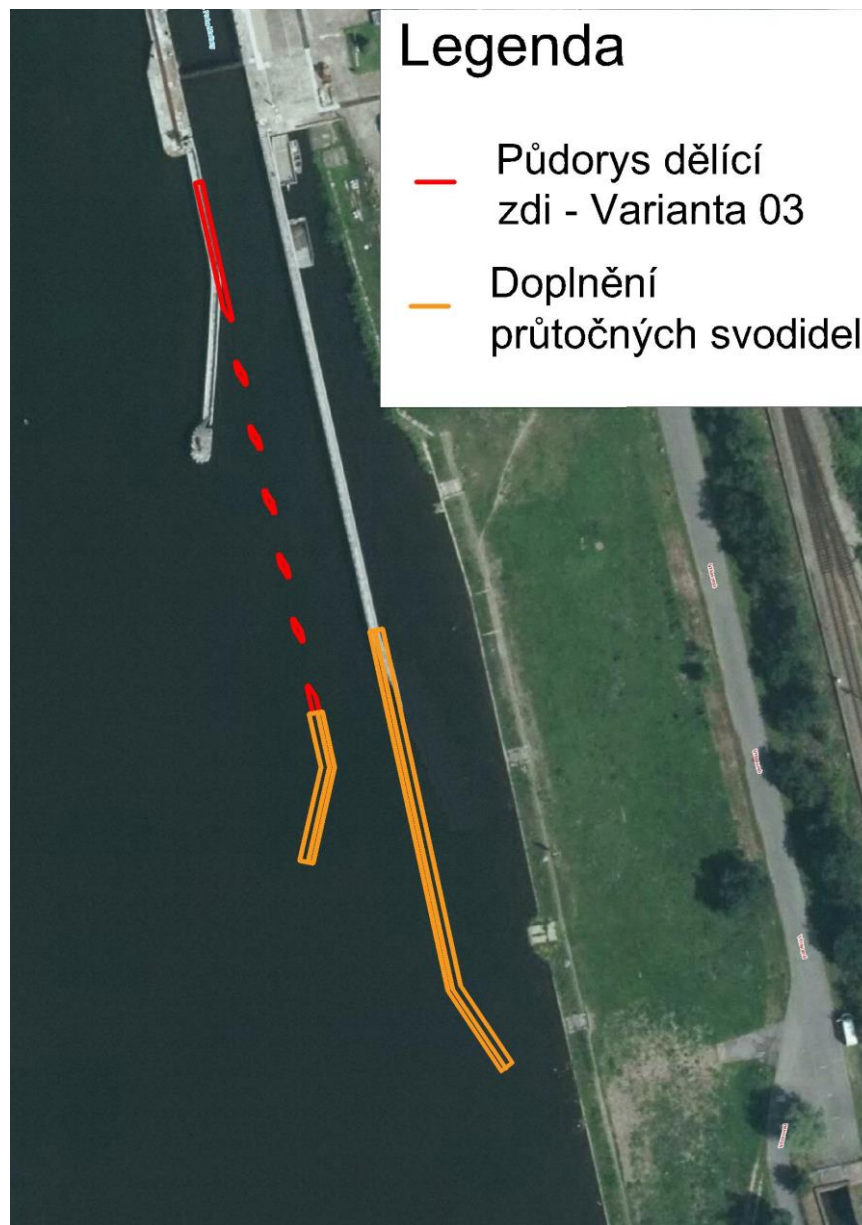
9.4 OPTIMALIZOVANÉ ŘEŠENÍ HORNÍ REJDY PLAVEBNÍ KOMORY MODŘANY

Následující řešení bude platné pouze v případě, že by doměřené hodnoty příčných složek rychlostí byly podlimitní v celém rozsahu dělicí zdi. V opačném případě by to ve skutečnosti znamenalo značné komplikace při vplouvání dlouhých tlačných sestav do plavební komory.

Možným řešením, na základě dosavadních výsledků, zajišťující bezpečné plavební podmínky v úseku Vltavy přes plavební stupeň Modřany do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, je vybudování dělicí zdi v horní rejdě plavební komory Modřany o délce 108 m, která má na prvních 80 metrech 6 průtočných oken o světlosti 7,7 m oddělené pilíři, jejichž osa svírá s osou dělicí zdi úhel 12° . Dispoziční řešení dělicí zdi je patrné z obrázku č. 31 a geometrie průtočných oken z obrázku č. 18.

Do problematického úseku před zhlavím dělicí zdi, kde není limitní hodnota $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ splněna, by se do vzdálenosti minimálně 10 m od zhlaví dělicí zdi doplnila průtočná svodidla (obrázek 31), které by zvýšily bezpečnost plavebních podmínek.

V případě, že by doměřené příčné složky rychlosti byly v celém rozsahu této dělicí zdi podlimitní, tak by takováto konstrukce splňovala kritérium vyhlášky 222/1995 Sb., podle které má být v bezprostřední blízkosti zhlaví dělicí zdi nebo průtočných svodidel příčná složky rychlosti maximálně $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a umožňovala by plynulost a bezpečnost plavebního provozu přes plavební stupeň Modřany do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 31: Možné optimalizační řešení dělicí zdi plavební komory Modřany

10. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo popsat současný stav a problematiku plavebních podmínek v horní rejdě plavební komory Modřany. Závěr bakalářské práce je následující:

V současné době je v úseku Vltavy přes vodní dílo Modřany zastavována plavba již při průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Snahou je navýšení maximálního plavebního průtoku až do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Plavbu v rejdách plavebních komor nepříznivě ovlivňuje podle J. Čábelky [6] příčné proudění a boční vítr. Právě překročení limitní hodnoty příčné složky v oblasti průtočných svodidel je důvodem, že plavba přes plavební stupeň Modřany je od průtoku $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zastavována. Podle vyhlášky 222/1995 Sb. je stanovena maximální příčná složka rychlosti, v bezprostřední blízkosti zhlaví dělící zdi nebo průtočných svodidel, na hodnotu $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při vyšších hodnotách může být nepříznivě ovlivněn kurs plavby lodí, které zpomalují při vplouvání do plavební komory. V roce 2018 byla v rámci studie proveditelnosti [2] pomocí 2D matematického modelu ověřena řada možných úprav dělících zdí a na základě výsledného doporučení zadal státní podnik Povodí Vltavy zpracování optimalizace stavebních úprav na fyzikálním modelu realizovaném ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v.v.i. Cílem výzkumu bylo dosáhnout optimalizovaného řešení horní rejdy plavební komory pro zajištění bezpečných plavebních podmínek až do průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při tomto výzkumu se autor této bakalářské práce aktivně podílel na výstavbě celého modelu, jednotlivých měření a následně samostatně zpracovával jejich grafické a popisné vyhodnocení. Dále autor této bakalářské práce prováděl své vlastní výpočty (graf 1) a kontroly prováděných prací (měření průtoků, hladin, rychlostí).

Cílem této bakalářské práce bylo zároveň popsat výsledky navazujícího výzkumu na hydraulickém modelu a optimalizace řešení úprav dělící zdi horní rejdy plavební komory Modřany. Závěry, které byly výzkumem získány, jsou následující:

První zkoumanou variantou byla dělicí zeď o celkové délce 42 m, se zprůtočněním od zhlaví na délku 25 m pomocí 4 průtočných oken. Výsledky měření ukázaly, že hodnoty příčné složky byly v oblasti zhlaví této varianty překročeny skoro až dvojnásobně, a to při obou sledovaných průtocích. Následně bylo přistoupeno k experimentu, který měl za cíl zjistit vliv zvětšení šířky průtočných oken při zachování délky dělicí zdi na příčnou složku rychlosti. Měření ukázalo, že hodnoty se výrazně neliší, dojde pouze ke zvětšení celkových rychlostí v zájmové oblasti. Na základě těchto výsledků bylo proměřeno rychlostní pole v horní rejdě plavební komory. Ukázalo se, že příčná složka rychlosti je vyšší než $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až do vzdálenosti 100 m od začátku původní dělicí zdi. Z tohoto důvodu byla navržena nová zeď o celkové délce 108 m, která obsahuje celkem 6 průtočných oken na prvních 80 m. Měření ukázalo, že při průtoku $600 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ se sníží příčná složka rychlosti v bezprostřední blízkosti zhlaví dělicí zdi, kde dosahovala v měřených hloubkách hodnot v rozmezí $0,03$ až $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabulka 13: Porovnání výsledků jednotlivých variant

| Varianta | Hodnota příčné složky rychlosti v bezprostřední blízkosti zhlaví dělicí zdi při průtoku $600 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] |
|----------|--|
| 01 | 0.45 - 0.52 |
| 02 | 0.69 - 0.77 |
| 03 | 0.03 - 0.09 |

V případě zdí s průtočnými okny je třeba vždy počítat s tím, že voda jimi protéká a tudíž i v oblasti zprůtočnění dělicí zdi je nutné zkoumat hodnoty příčné složky. Vysoké příčné proudění by v této oblasti mohlo způsobovat značné potíže při proplouvání dlouhých tlačných sestav horní rejdou plavební komory. Je třeba zdůraznit, že práce popisuje výsledky výzkumu ke dni 5.5.2020., kdy ještě neproběhlo zaměření v oblasti průtočných oken. Z tohoto důvodu vyplývají dva závěry:

- 1) Pokud by doměřené příčné rychlosti v oblasti průtočných oken nebyly překročeny, bylo by možné budovat zeď o délce 108 m s šesti průtočnými okny, která by byla doplněna průtočnými svodidly do vzdálenosti minimálně 10 m od zhlaví dělící zdi (obrázek 31), tedy do vzdálenosti, kde je limitní hodnota příčné složky rychlosti mírně překročena. Taková to konstrukce by splňovala požadavek vyhlášky 222/1995 Sb. a zajišťovala by navýšení maximálního plavebního průtoku v úseku Vltavy přes vodní dílo Modřany na hodnotu $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při bezpečných plavebních podmínkách.

- 2) V případě, že by hodnoty příčných rychlostí byly v oblasti průtočných oken překročeny, tak by bylo nutné hledat další řešení. Výzkum by se poté soustředil na snížení příčné složky rychlosti v oblasti průtočných oken, kde možnou variantou by mohl být experiment se zprůtočněním oken až po nominální hladinu udržovanou jezem 189,30 m n.m., vzhledem k tomu, že porovnání (tabulka 10) získaných výsledků z 2D matematického modelu a fyzikálního modelu u první zkoumané varianty dělící zdi ukázalo, že při zprůtočnění oken na celou výšku vyjde příčná složka v celém rozsahu, včetně bezprostřední blízkosti zhlaví dělící zdi, nižší, než při současné navržené geometrii průtočných oken (obrázek č. 17 a č 18). Dále lze vyzkoušet variantu s plnou dělící zdí, kde se ovšem předpokládá zvýšení příčné složky rychlosti v bezprostřední blízkosti zhlaví dělící zdi. Dosavadní výsledky zároveň ukázaly, že bude nezbytně nutné vybudovat zeď o větší délce než je 42 m.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1

Měrná křivka přepadu přes klapku, hladina horní vody 189,50 m n.m.

LITERATURA

- [1] **Jaroslav Čábelka, Pavel Gabriel.** *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice.* Praha : Academia, 1987.
- [2] **Pavel Fošumpaur, Veronika Jarošová a Martin Horský.** *Studie poveditelnosti: Doplnění dělicích zdí rejd plavební komory Modřany.* Praha : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2018.
- [3] **DISPEČINK, CENTRÁLNÍ VODOHOSPODÁŘSKÝ.** *Manipulační řád pro vodní dílo Modřany na Vltavě: Povodí Vltavy, státní podnik.,* 2014.
- [4] **Pavel Gabriel, Josef Libý, Pavel Fošumpaur.** *Hydraulický výzkum vodního díla Děčín.* Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce, 2008.
- [5] **Vladimír Medřický, Petr Valenta.** *Vodní cesty, Navrhování plavebních komor.* Praha : Skriptum ČVUT, 2009.
- [6] **Čábelka, Jaroslav.** *Vodní cesty a plavba.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1976.
- [7] **Vladimír Havlík, Ivana Marešová.** *Hydraulika 20.* Praha : Skriptum ČVUT, 2001.
- [8] **Český hydrometrický ústav.** *Hydrologická ročenka České republiky 2016 - kapitola 5.* Praha : 2017.
- [9] **Vyhláška Ministerstva dopravy 222/1995 Sb.** ze dne 14. září 1995 o vodních cestách, plavebním provozu v přístavech, společné havárie a dopravně nebezpečných věcí
- [10] **Vyhláška Ministerstva dopravy 67/2015 Sb.** ze dne 1. dubna 2015 o pravidlech plavebního provozu.
- [11] **Zákon č. 114/1995 Sb.** ze dne 14. července 1995 o vnitrozemské plavbě.
- [12] **Internetová stránka Ředitelství vodních cest ČR** [online]. Česká republika. Dostupné z: <http://www.rvccr.cz/strategie-zamery-a-stavby/dolni-vltava/zvyseni-ponoru-na-vltavske-vodni-ceste-ricni-cast>

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: VD Modřany - Ortofoto mapa dostupná online z webových stránek - ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální)..... | 5 |
| Obrázek 2: Objekt jezu – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3]..... | 6 |
| Obrázek 3: Plavební komora Modřany – pohled z vrat horního ohlaví – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3]..... | 8 |
| Obrázek 4: Pohled na horní rejdu plavební komory Modřany – Manipulační řád, příloha fotodokumentace [3].. | 9 |
| Obrázek 5: Rozdělení celkových rychlostí za současné situace na plavebním stupni Modřany při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ - Studie proveditelnosti, ČVUT v Praze [2]..... | 10 |
| Obrázek 6: Vliv dělicích zdí s průtočnými okny na rozdělení celkových rychlostních poměrů na plavebním stupni Modřany při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ - Studie proveditelnosti, ČVUT v Praze [2]..... | 11 |
| Obrázek 7: Osazení příčných profilů..... | 18 |
| Obrázek 8: Modelace šterku..... | 19 |
| Obrázek 9: Betonáž povrchu modelu..... | 19 |
| Obrázek 10: Osazení jezu společně s MVE..... | 20 |
| Obrázek 11: Hotová Betonáž včetně natření koryta horní vody cementovou mazaninou..... | 21 |
| Obrázek 12: Průtočná svodidla na modelu..... | 21 |
| Obrázek 13: Barevné znázornění fyzikálního modelu VD Modřany..... | 22 |
| Obrázek 14: Pohled na VD Modřany srovnatelný s modelovou podobností na obrázku 12 - Ortofoto mapa dostupná online z webových stránek - ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální)..... | 22 |
| Obrázek 15: Manipulace s jezovými klapkami pomocí táhla..... | 26 |
| Obrázek 16: Měření příčné složky rychlosti hydrometrickým přístrojem FlowTrace2..... | 31 |
| Obrázek 17: Geometrie dělicí zdi v přední části použité pro varianty 01..... | 33 |
| Obrázek 18: Geometrie dělicí zdi v přední části použité pro variantu 02 a 03..... | 34 |
| Obrázek 19: Model 1. varianty dělicí zdi..... | 35 |
| Obrázek 20: Model 1. varianty dělicí zdi..... | 35 |
| Obrázek 21: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 1 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 01..... | 38 |
| Obrázek 22: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2,5 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 01..... | 39 |
| Obrázek 23: Model 2. varianty dělicí zdi..... | 41 |
| Obrázek 24: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 0,5 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 02..... | 43 |
| Obrázek 25: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2,2 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 02..... | 44 |
| Obrázek 26: Model 3. varianty dělicí zdi..... | 45 |
| Obrázek 27: Model 3. varianty dělicí zdi..... | 45 |
| Obrázek 28: Půdorysné řešení dělicí zdi – varianta 03..... | 46 |
| Obrázek 29: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 0,5 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 03..... | 48 |
| Obrázek 30: Poměry příčných složek rychlostí v hloubce 2,2 m při průtoku $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ u varianty 03..... | 49 |
| Obrázek 31: Možné optimalizační řešení dělicí zdi plavební komory Modřany..... | 51 |