

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



Optimalizace technického rybího přechodu

Optimization of the technical fish passage

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Martin Král
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur
Datum: Leden 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Bc. Martin Král

Poděkování

Poděkování patří v první řadě mé rodině a mým nejbližším za podporu, kterou mi během celého mého studia věnovali. Za odborné vedení a předání zkušeností děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Fošumpaurovi. Dále bych rád poděkoval kolegům ze státního podniku Povodí Vltavy, konkrétně panu Ing. Pecharovi a panu Ing. Šimůnkovi, za možnosti a odborné připomínky, kterých se mi během zpracování této práce dostalo.

Bc. Martin Král

Název práce:

Optimalizace technického rybího přechodu

Autor: Bc. Martin Král

Studijní program: Stavební inženýrství

Obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur
České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Předmětem diplomové práce je optimalizovat přepážky technického rybího přechodu s ohledem na zajištění migrační účinnosti, technickou proveditelnost, ekonomickou efektivitu a provozní požadavky. Pro splnění těchto požadavků byla provedena rozsáhlá rešerše o migračních schopnostech ryb a informací o fragmentovaných částech toku, kde je potřebné migraci zajistit. V rámci výzkumu proběhla za účelem propojení techniky a biologie řada jednání se zástupci Povodí Vltavy, s.p. a členy Komise pro rybí přechody při AOPK ČR, ze kterých vzešly podněty na ověření obecných hypotéz v této problematice. Navržené varianty tyto podněty ověřují pomocí matematických modelů, které budou následně ověřeny na fyzikálním modelu v hydrotechnické laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Klíčová slova: Hydraulický výzkum; Matematické a fyzikální modelování;
Technický rybí přechod; Optimalizace rybího přechodu

Title:

Optimization of the technical fish passage

Author: Bc. Martin Král

Abstract: The subject of the thesis is to optimize the obstacles of a technical fish passage with respect to ensuring migration efficiency, technical feasibility, economic efficiency and operational requirements. In order to meet these requirements, an extensive research on fish migration capabilities and information on fragmented parts of the stream where migration needs to be ensured was carried out. In the framework of the research, a series of meetings were held with representatives of the Povodí Vltavy, s.p. and members of the Commission for Fish Passage at the AOPK ČR to link technology and biology, which resulted in suggestions for testing general hypotheses on this issue. The proposed variants verify these hypotheses by means of mathematical models, which will be subsequently verified on a physical model in the hydrotechnical laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague.

Key words: Hydraulic research; Mathematical and physical simulations;
Technical fish passage; Fish passage optimization

Obsah

Úvod	1
Seznam použitých zkratek	3
1 Migrace ryb a migrační zprůchodnění vodních toků	4
1.1 Migrace ryb	4
1.2 Migrační zprůchodnění vodních toků	6
2 Hydrotechnický výzkum technického rybího přechodu	12
2.1 Matematické modelování	13
2.2 Fyzikální modelování	18
2.3 Verifikace modelu	25
3 Technická proveditelnost	28
4 Optimalizace technického rybího přechodu	30
Závěr	51
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek	55
Literatura	56

Úvod

Téma zprůchodnění říční sítě je již řadu let rozšířené téma. V minulosti vznikla celá řada jezů a přehrad, které z pohledu migrace rozdělila celky vodních toků do malých fragmentů, které se v současné době opět snažíme odstranit. Tyto překážky byly vždy budovány k nějakému účelu, který si většina vodních děl drží dodnes, ať už se jednalo o vytvoření spádu pro využití vodní energie, či vytvoření vzdutí k vodárenským odběrům. S ohlednutím na vodní zákon, je již v dnešní době při rekonstrukcích těchto vodních děl povinností zajistit migrační zprůchodnění.

Pokud ze zmíněných účelů nelze vodní dílo fyzicky odstranit, využívají se ke zprůchodnění tzv. rybí přechody, zajišťující pro ryby a vodní živočichy snadnější podmínky pro jeho překonání. Téma rybích přechodů ovšem není příliš rozšířené a odborníci se často neshodnou na kritériích, které by měly u rybích přechodů být vyžadovány. Státní podniky povodí, jakožto správci a zhotovitelé těchto VD, tak narážejí již ve fázi přípravy stavby na záporná stanoviska od příslušných orgánů hájící zájmy ochrany přírody.

Volí se tedy vždy mírnější způsoby a zhotovitelé jsou pak nuceni stavět velmi pozvolné a dlouhé rybí přechody okolo příčné překážky, které bývají prostorově, majetkoprávně a finančně náročné. Nejčastěji jsou požadavky na stavby z přírodních kamenů, přičemž zajištění dostatečného počtu vhodných balvanů bývá obtížné a jejich skutečné uspořádání v rybím přechodu se nemusí vždy shodovat s projektem. Na případné nedostatky v hydraulických podmínkách se zpravidla narazí až při mokřých zkouškách, které se provádějí před předáním hotového díla.

Vzhledem k výše zmíněným důvodům byl státním podnikem Povodí Vltavy zadán požadavek na výzkum rybího přechodu, který by po správné optimalizaci dokázal nejen urychlit a zlevnit samostatnou výstavbu, ale i předešel problémům s nevhodnými hydraulickými podmínkami. Úpravy geometrie po dokončení stavby totiž vedou k dalším vícepracím, které pak mohou převyšovat náklady spojené s hydraulickým výzkumem.

Pro spolehlivější hydraulické podmínky a hlavně levnější a časově méně náročné řešení byl k optimalizaci zvolen technický rybí přechod, který by místo přírodních balvanů využíval betonové menhiry.

V této práci bude pozornost věnována spíše vhodnému rozmístění jednotlivých překážek, nežli samotnému technickému provedení. Nicméně i přesto mu bude jedna kapitola věnována.

Cílem této diplomové práce je tyto přepážky optimalizovat tak, aby zmíněné požadavky byly splněny. Bude k tomu využit matematický model, který bude verifikován na fyzikálním modelu v hydrotechnické laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Mimo technicko-ekonomické požadavky bude v potaz brána i migrační schopnost ryb. A proto v souvislosti s tím proběhnou jednání se zástupci Povodí Vltavy, s.p., členy Komise pro rybí přechody při AOPK ČR. Vznikne tak propojení techniky a biologie, resp. ichtyologie, které by mohlo tuto problematiku posunout o krok dále.

Práce je rozdělena na dvě části - první postupně představí jednotlivé informace, které jsou potřebné k optimalizaci tohoto typu rybího přechodu. Je zde rozvedeno proč ryby migrují, z čehož mohou vyplývat různé migrační skupiny ryb a tím pádem různé požadavky na geometrii rybího přechodu. Různé výkonnostní schopnosti ryb totiž vedou k odlišným rychlostně-selektivním požadavkům. Navazující kapitoly objasňují možnosti zprůchodnění a optimalizační přístupy použité v tomto výzkumu.

Druhá část je věnována samotné optimalizaci navržených variant, u kterých bude probíhat ověření různých hypotéz, které se v oboru k tomuto tématu vyskytují.

Seznam použitých zkratk

AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny ČR
DOP	Dolní okrajová podmínka
DVT	Drobný vodní tok
HOP	Horní okrajová podmínka
KRP	Komise pro rybí přechody
MVE	Malá vodní elektrárna
MZE	Ministerstvo Zemědělství
MŽP	Ministerstvo Životního prostředí
RP	Rybí přechod
VD	Vodní dílo
VTO	Vodní tok

Kapitola 1

Migrace ryb a migrační zprůchodnění vodních toků

1.1 Migrace ryb

Potřebu migrovat v sobě ryby mají již geneticky, přičemž u některých druhů je poproudová migrace doslova existenční záležitostí [4]. Všeobecně známí jsou lososi, migrující stovky, někdy až tisíce kilometrů hluboko do říční sítě do míst, kde se narodili. Takovou skupinu ryb nazýváme *diadromní*, které část svého života tráví v moři, aby podpořili rychlost svého růstu, ale pro potřeby rozmnožování se vrací zpět do sladkých vod, do tzv. trdlišť, kde dochází k přirozenému výtěru a k líhnutí jiker a plůdků. Z toho se odvíjí první typ migrace: *reprodukční*, nebo ji také nazýváme třecí.

Ryby, které jsou odkázány pouze na říční systémy, zařazujeme pod *potamodromní* druhy. S tím se váže druhý typ migrace: *kompensační*, kterou lze chápat jako návrat ryb na jejich bývalá stanoviště, příp. přesun do příznivějších životních podmínek vedoucí k obnově výskytu.

Pod pojmem **migrace** tedy obecně rozumíme hromadný přesun jedinců z jednoho místa do druhého za předem daným cílem: zpravidla kvůli rozmnožování, vyhledání úkrytu před predátorem, pro přezimování, či za potravou. S posledním zmiňovaným cílem se také pojí třetí typ migrace a to *potravní*.

Výše zmíněné migrace pak označujeme jako biologické [13], [14], [15].

Z různých druhů migrace bychom mohli usuzovat, že každá ryba bude mít jiné migrační schopnosti a nároky, jak na geometrii rybiho přechodu, tak na rychlosti proudění, které se mezi jednotlivými liniemi balvanů vyskytují.

Pro příklad pstruh migrující stovky kilometrů nebude v tělese rybiho přechodu vyžadovat přílišné zátiší, které jiným rybám může sloužit jako úkryt, ale bude vyžadovat co nejefektivněji danou překážku překonat. Zcela rozdílný požadavek bude mít např. vranka obecná, která se pohybuje při dně po kamenech a bude tak vyžadovat spíše drsnější dno a malé rychlosti.

Migrační schopnosti ryb

Pro pochopení migračních schopností ryb proběhla řada experimentů, které měli za cíl určit na čem je výkonost ryb závislá. Jeden z těchto výzkumů prováděl Clough a kol., ve Velké Británii. Experimenty proběhly nejprve v roce 2001, na které navazovalo pokračování v roce 2004 [18][19].

Při experimentu využili žlab ve sklonu 20%, dolní koš pro uchování ryb a horní přelivnou hranu jako okrajovou podmínku, přes kterou se ryby nedostaly. Experiment spočíval v měření času a velikosti jedinců, kteří proplutí zvládli. Postupně dolní koš vědci zvedali tak, aby se s přibývajícím časem přidávali i slabší jedinci.

Z těchto experimentů bylo představeno hned několik závěrů. Clough a kol. pochopili, že je ryba při plavání vystavena několika silám, které se odvíjejí od jejího tvaru, tření jejího povrchu s vodou a vlnového odporu. Obecně zde lze říci, že relativní tah, který ryba dokáže vyvinout, klesá se zvětšující se délkou ryby [18].

Schopnost ryb překonávat překážky se však neodvíjí pouze od velikosti svalů, či ideální teploty vody, ale záleží také na motivaci ryby vůbec vyplout. Téměř v každé skupině, kterou Clough a kol. testovali, se vyskytli jedinci, kteří nevypluli i když k tomu měli patřičné podmínky i parametry. V přírodě však tyto jevy nenajdeme, neboť každá ryba v sobě má „genetickou motivaci“ táhnout proti proudu, ať už z důvodu rozmnožování, nebo při útěku před predátorem.

Co je z tohoto experimentu podstatnější je to, že definovali pojem „Burst swimming speed“, což je v tuzemské literatuře přeloženo jako „**Skoková rychlost plavání**“. Tu lze chápat jako maximální rychlost, kterou dokáže ryba po krátkou dobu vyvinout (předpoklad alespoň 20 s). Většinu dne totiž ryba využívá minimum ze své výkonnostní kapacity, nicméně v případě potřeby dokáže vyvinout obrovské úsilí¹ a plout rychlostí 2x až 4x větší [12], [15].

Data o rychlostech, které ryby zvládnou takto vyvinou slouží jako jeden ze základních parametrů pro modelování rybích přechodů a zajištění jejich správné účinnosti. V České republice jsou bohužel tyto údaje dost často neúplné, ale přesto technická norma TNV 752321 předkládá základní přehled, který je pro některé druhy uveden v následující tabulce 1.1 níže. V našich podmínkách je obecný předpoklad, že prů-

Tabulka 1.1: Hodnoty migrační výkonosti některých druhů ryb (Zdroj: [15])

Druh	Délka těla ryby [cm]	Skoková rychlost plavání
Pstruh obecný	5 - 30	0,92 - 3,10 m/s
Vranka obecná	7	0,60 - 1,00 m/s
Jelec tloušť	30	1,50 - 2,70 m/s
Parma obecná	35	1,80 - 2,70 m/s

měrné širší spektrum ryb zvládne překonat rychlost proudění až 1,2 m/s. Nicméně zpravidla kvůli realizačním a materiálovým nepřesnostem se uvažuje určitá rezerva. Proto je obecně doporučovaná návrhová hodnota spíše 0,8 - 1,0 m/s. Nicméně díky optimalizaci prefabrikovaných dílců, lze výše zmíněné nepřesnosti teoreticky eliminovat a jako kritériální pak lze uvažovat hodnoty vyšší.

¹Např. při úniku před predátorem, nebo pro překonání vertikální překážky

1.2 Migrační zprůchodnění vodních toků

V ČR je výstavba rybích přechodů zpravidla spojena s rekonstrukcemi vodních děl na našich tocích. Ty mohou pro širší spektrum ryb a vodních organismů totiž vytvářet tzv. *migrační překážku*, kterou lze chápat jako příčnou stavbu na vodním toku, která brání rybám a ostatním vodním živočichům dostat se z dolní vody do horní a naopak. V další literatuře, např. [13] se lze dočíst, že migrační překážka není pouze příčná konstrukce jako jsou zpravidla bystřinné přehrážky a jezy, ale může se jednat i o úseky toku, kde je ve vysoké míře čerpána voda, či voda znečištěná odpadními nebo chemickými látkami.

Za posledních několik desetiletí se u nás změnila priority, které řeší migrační prostupnost, kdy velkou proměnnou, která pohyb vodních živočichů v minulosti ovlivňovala, byla právě čistota vody [1]. Ta se za poslední roky změnila k lepšímu. V současné době tedy jako hlavní faktor migrační neprostupnosti zůstávají jednotlivá vodní díla.

Z toho důvodu vydalo MŽP v roce 2009² *Koncepci zprůchodnění říční sítě ČR* [14], jejíž cílem je řešení defragmentace říčních úseků jako celku. V konceptu jsou zohledněny nároky vodních a na vodu vázaných ekosystémů tak, aby byla vyloučena, nebo alespoň minimalizována druhově a velikostně selektivní průchodnost migračních překážek. Těchto příčných objektů, které jsou vysoké alespoň 1 m bylo k roku 2020 na našem území přibližně 6 600 [14].

Koncepce zároveň stanovuje konkrétní priority z pohledu mezinárodních a národních závazků, které následně plní dílčí plány jednotlivých povodí. Na základě toho jsou vymezeny migračně významné toky, které koncept rozděluje na

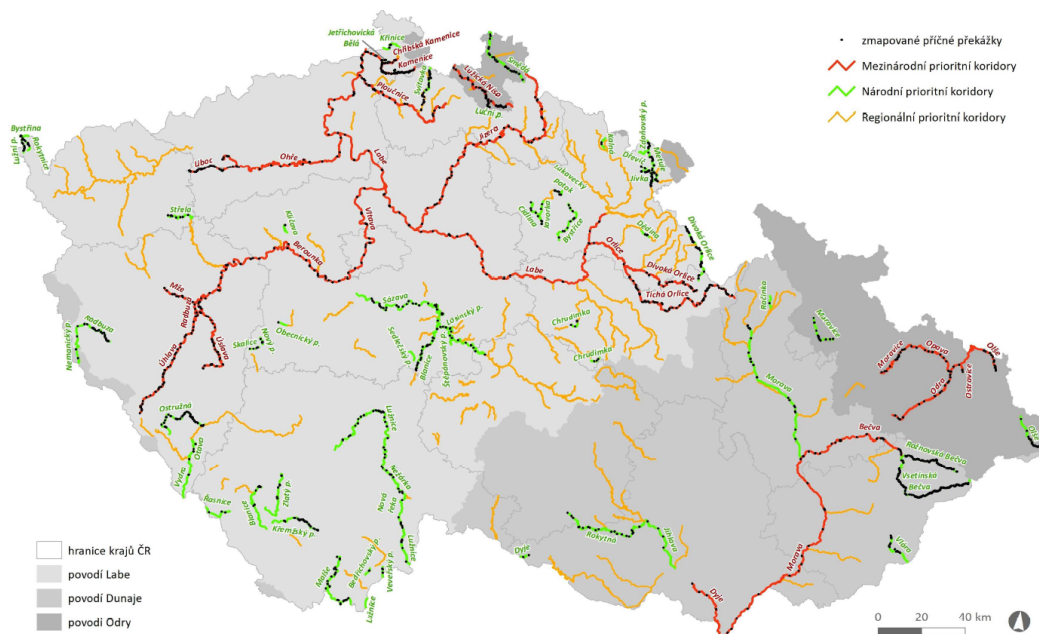
*mezinárodní prioritní koridory (např. Vltava od Labe po soutok s Berounkou),
národní prioritní koridory (např. Sázava od Vltavy po Ledec nad Sázavou) a
regionální prioritní koridory (např. Rakovnický potok od Berounky po CHKO Křivoklátsko).*

Na Obr. 1.1 níže je vyobrazeno schéma těchto migračně významných toků v ČR. V rámci tohoto výzkumu je pozornost věnována hlavně menším vodním tokům, které zde mají široké zastoupení a je zde tedy větší míra využitelnosti. Výsledky však lze následně přepočítat na měřítku větší, čemuž se věnuje kap. 2.2 Modelová podobnost.

Na zmíněné koncepci se podíleli i odborníci z Agentury ochrany přírody a krajiny ČR, pod níž spadá, mimo jiné odborné skupiny, i *Komise pro rybí přechody*, jejíž náplní není jen je odborná podpora ke koncepčním materiálům, ale i např. posuzování již konkrétních studií a projektů.

Po vzniku této komise (2000) lze předcházet „realizačním a provozním“ komplikacím díky probíhajícím konzultacím již od fáze studie proveditelnosti. Tyto konzultace sice prodlužují proces přípravy stavby, nicméně se v praxi ukázalo, že tento „mezikrok“ je u stavby RP zásadní pro odhalení limitů realizace [1].

²S aktualizací v letech 2014 a 2020



Obrázek 1.1: Schéma vymezení prioritních koridorů (Zdroj: [14])

Rozdělení rybích přechodů

V předchozích kapitolách byly zmíněny pojmy *migrace* a *migrační překážka*. Ty pak propojuje termín **rybí přechod**, který je normou TNV 75 2321 vymezen následovně

„Rybí přechod je stavba nebo konstrukce umožňující rybám bezpečně překonat migrační bariéru z dolní vody do horní a v případě poproudové migrace opačně“

Tyto stavby lze řadit do různých skupin, mezi nimiž není přesná hranice a jejich rozdělení tak závisí spíše na úhlu pohledu [13]. Nicméně pro základní členění využíváme vždy nějakou společnou charakteristickou vlastnost.

Nejčastěji se v literatuře, ať už tuzemské [13], [16], nebo zahraniční [17], [20] lze setkat s rozdělením **bazénové RP** a **šikmé rampy**. Toto rozdělení vychází z hydrauliky proudění, resp. způsobu a schopnosti rybiho přechodu tlumit hybnou sílu vody.

Bazénové rybí přechody se pomocí příčných překážek, ať už umělých³, nebo přírodních⁴ snaží omezit přímý průtok a vytvořit tak soustavu bazénů s rozdílnými hladinami, které jsou pro migrující vodní faunu snadněji překonatelné.

V případě šikmých ramp se k tlumení energie vody využívá postupné zdrsnění dna a jednotlivých balvanů. Tím je docílen efekt peřejnatých úseků, které se na vodních tocích běžně vyskytují (zpravidla na horských a bystřinných VTO).

Technická norma [15] člení RP také podle vzhledu a charakteru na **přírodě blízké** a **technické**. Prvně zmiňované se nejen svým přírodním charakterem, ale i prouděním snaží co nejvíce přiblížit poměrům, které jsou typické v přírodních tocích.

³např. štěrbínový, nebo komůrkový RP

⁴např. tůňový RP, nebo s balvanitými liniemi

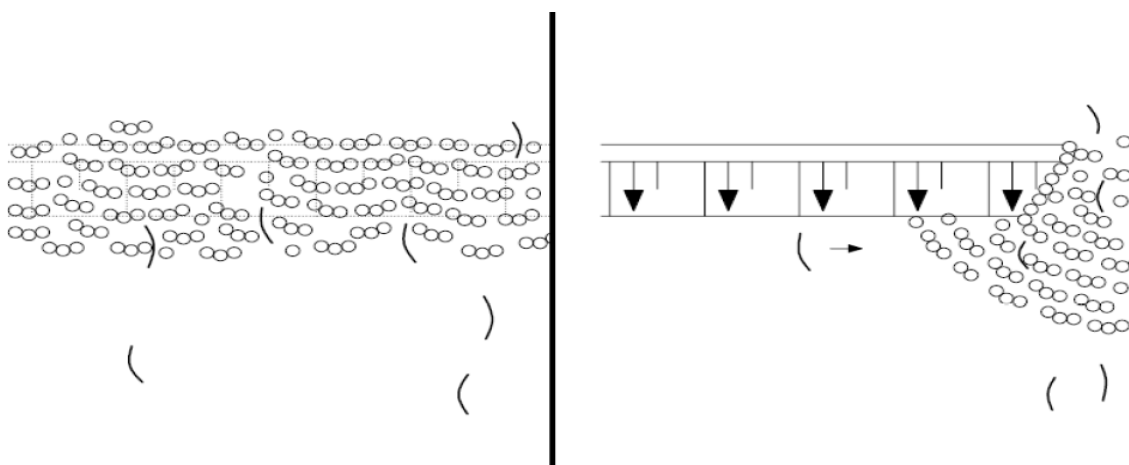
a.2) Dnové peřeje

Pro překonání nízkých spádů lze využít ukotvené větší balvany do dna představující peřejnaté úseky. Dnové peřeje jsou zpravidla budované přímo na migrační překážce a mají tak přímou trasu. Jsou charakteristické větším sklonem a menší hloubkou vody. Energie je tlumena drsným dnem, příp. rozptýlenými ukotvenými menšími. Jako peřej je nazýván tehdy, zaujímá-li RP celou šířku koryta.

a.3) Migrační rampa

Posledním typem přírodě blízkých rybích přechodů je migrační rampa. Ta bývá součástí jezového tělesa a její základ tak tvoří betonová konstrukce, do které jsou upevněny větší kameny a balvany. Přepážky lze dělat z přírodních kamenů, popř. z betonových prvků.

Rozdílnost oproti dnové peřeji je, že o rampu se jedná tehdy, je-li šířka koryta větší než šířka rampy.



Obrázek 1.3: Schéma dnové peřeje (vlevo) a migrační rampy (vpravo) (Zdroj: [16])

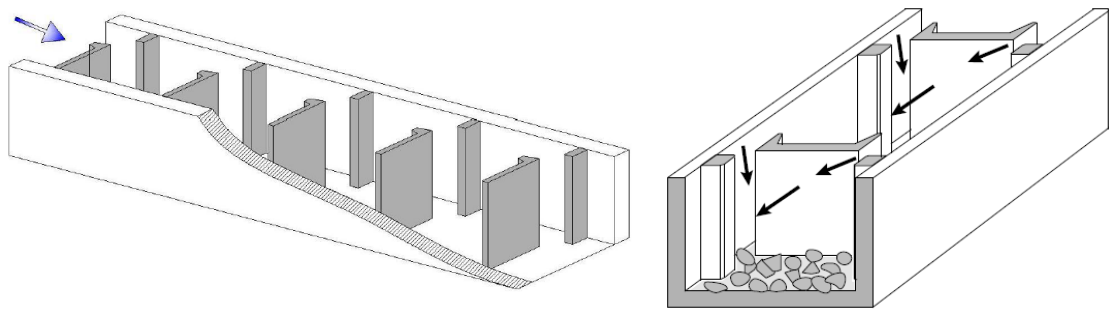
b) Technické rybí přechody

Základním typem technického přechodu je RP žlabový. Ten je tvořen nakloněným betonovým žlabem simulující koryto, v němž jsou pomocí přírodních, nebo betonových konstrukcí vytvořeny bazénky a tůně. Zpravidla se snažíme o žlab přímý s pozvolným sklonem. U vysokých spádů tak vzniká dlouhá trasa, kterou lze zalomit a zkrátit tak délku při zachování navrženého sklonu.

b.1) Štěrbínový

Nejčastějším typem žlabového RP je štěrbinový. Je nejvíce preferovaný hlavně pro jeho vlastnosti, protože i při kolísavých průtocích se v něm proudové poměry příliš neliší a snadněji se čistí. Rozdíl hladin jednotlivých bazénů je zapříčiněn zpravidla ŽB deskami⁵ s jednou nebo více štěrbinami po celé výšce profilu.

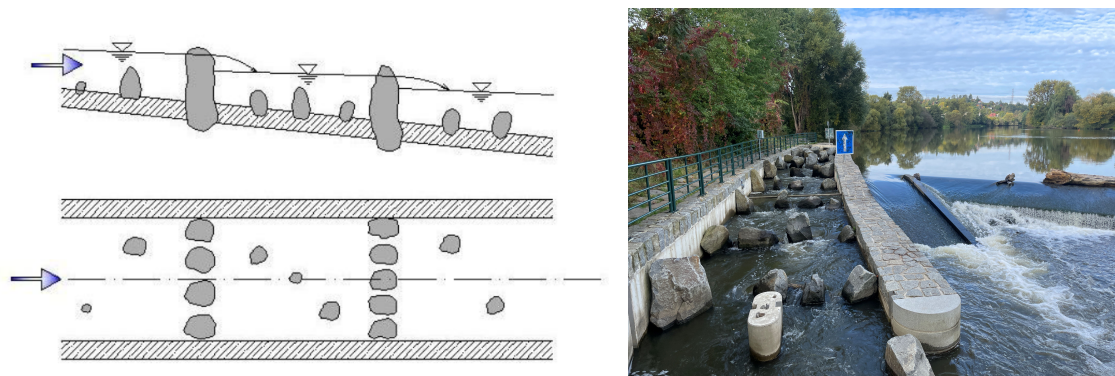
⁵Pozn. lze využít také např. dřevěné fošny, příp. trámký



Obrázek 1.4: Schéma technického RP - Štěrbínový s jednou štěrbinou (vlevo) a dvojitou (vpravo) (Zdroj: [15] a [20])

b.2) Žlabový s přepážkami z kamenů⁶

Mezi další často používané patří žlabové rybí přechody s přepážkami z kamenů. Ty k tlumení využívají překážky zpravidla z přírodního kamene, nebo výjimečně z betonu. Tento typ je upozaďován přírodními balvanitými bypassy, nebo štěrbinovými RP.



Obrázek 1.5: Schéma technického RP - Žlabový s přepážkami z kamenů (Zdroj: [15]) a RPI na jezu Řevnice.

b.3) Žlabový s kartáči

Posledním typem technického žlabového přechodu je žlabový RP s kartáči. Ten k tlumení energie proudění využívá do dna zakotvených kartáčových trsů, které jsou tvořeny elastickými pruty. Ty postupem času ztrácí svou pružnost a je nutné je častěji vyměňovat (trvanlivost cca 5-10 let).

Tento typ je zpravidla využíván na vodáckých cestách pro sdružení více funkcí do jednoho objektu - vodácké propusti a rybího přechodu. Ovšem v praxi se tento typ příliš neosvědčil.

b.4) Speciální RP

Existuje další řada technických RP, které ale nejsou blíže specifikovány, protože se v našich podmínkách buď nepoužívají, a nebo se v minulosti neosvědčily. Jde hlavně o komůrkové RP a specifické RP (speciální komory a rybí výtahy).

⁶Pozn. Tento typ bude podrobněji rozebrán a optimalizován ve zbylé části práce.

Provoz rybích přechodů

Na migrační zprůchodnění vodního toku má také svůj podíl účinnost rybiho přechodu, která se odvíjí z velké části od jeho správného provozu. Stejně jako pro další části VD, je i pro rybí přechody vypracován samostatný provozní řád, který by měl být vždy v souladu s manipulačním řádem příslušného VD [15]. Provozní řád pak stanovuje, mimo jiné, i četnost prohlídek a způsob čištění RP, které nejčastěji provádějí správci VD a rybáři spravující příslušný rajon.

Rybí přechod by zpravidla měl být provozován celoročně, proto je potřeba ho během roku dostatečně udržovat, aby postupem času neztrácel svou účinnost. Hlavní problémy nastávají při zvýšených průtokových stavech, kdy se korytem mohou splavovat např. kmeny stromů (mrtvé dřevo), spadané listí nebo také vysypaná posečená tráva z přilehlých zahrad. Tyto materiály mohou být unášeny jak na hladině, tak u dna. Část lze zachytit např. nornou stěnou na vtoku do RP, ale většina se však postupně zanáší do jednotlivých bazénů, nebo ucpávají navržené šterbiny, což vede k neúčinnosti RP.

Tyto faktory hlavně způsobují a) zúžený průtočný profil ve šterbinách. To může zapříčinit zrychlení proudění vody až na kritické hodnoty, které již ryby nemusejí překonat. Za b) původně zdrsňené dno nebude s postupem času dostatečně drsné, aby mohli RP využít i slabší jedinci.

Z toho důvodu by měly proběhnout pravidelné⁷ celkové prohlídky za sníženého stavu a zkontrolovat, příp. vyčistit, jednotlivé naplaveniny.

Se zanášením souvisí také umístění RP v profilu toku. V úvahu připadá hned několik variant, např. lze RP umístit přímo do tělesa hráze - čímž je rybám umožněno nehladat RP po celé šířce. Nebo při velkých šířkách koryt je pak doporučeno budovat více než jeden RP. Pro provoz je však nejvýhodnější umístění u břehu, kam lze dopravit i těžší mechanizaci, která je, zvláště po velkých průtocích potřeba k odklizení těžkých předmětů i za plného průtokového stavu v RP.

Konkávními břehy jde přirozený vábivý proud, který je pro ryby přívětivější. Nicméně z provozního hlediska vhodný není, neboť bude s hlavním proudem unášeno i více splavenin.

V konvexním břehu jsou z právě zmíněných důvodů často umístěny MVE. Jejich provozem však vzniká migračně nežádoucí proud, který může navést ryby do turbín MVE. Nicméně při snížených průtocích ryby využívají, skrze celou šířku koryta, tohoto proudu k nalezení vstupu do konvexně umístěných RP. Naopak při větších průtocích využívají silného unášecího proudu a migrují spíše v konkávních RP. Příkladem tomu jsou rybí přechody v profilu jezu Řevnice na Berounce, kde z předběžných výsledků biologického monitoringu ryby při zvýšených průtocích migrují v pravém (konkávním) břehu a při snížených průtocích v levém (konvexním) břehu, kde je také situována MVE.

I přestože se tento výzkum věnuje obecné optimalizaci, tzn., že není uvažováno ovlivnění nátokem, ani výtokem z RP, je důležité na tyto věci při návrhu pamatovat. Optimalizované jednoduché tvary příčných překážek tak mají za cíl snadnější údržbu a snahu si zachovat hydraulické podmínky i při menším zanesení.

⁷Zpravidla před začátkem hlavních migračních období - jaro, podzim

Kapitola 2

Hydrotechnický výzkum technického rybího přechodu

Hydrotechnický výzkum má své opodstatnění již desítky let, protože už našim předkům se díky němu podařilo vybudovat celou řadu významných vodních děl. Ještě před rozvojem digitálních technologií se studie a projekty zkoumali na zmenšených modelech v laboratořích a pozorované jevy se pak popisovaly základními rovnicemi, které se zpravidla museli řešit ručně, nebo graficky.

Cílem těchto výzkumů bylo nejčastěji vyšetření zákonitosti proudění vody a jeho působení na vodní díla a okolní prostředí [2]. To pak vedlo k hydraulicky vhodnějším, bezpečnějším, ale i stavebně a provozně účelnějším řešením. Díky modelům se tak dal využívat mnohem širší rozsah zátěžových stavů a možnosti jejich opakování, které na skutečném vodním díle nelze bezpečně testovat.

V dnešní době je nedílnou součástí tohoto fyzikálního modelování i matematické, které celý proces různých iterací a přestavby modelů značně zjednodušuje a snižuje jak časovou, tak finanční náročnost. Úprava rybího přechodu, po jeho dokončení, na základě negativního biologického monitoringu může finančně převyšovat náklady spojené s hydraulickým modelem ve fázi přípravy.

Na rozdíl od většiny ostatních hydrotechnických výzkumů, se koncepce modelování rybího přechodu liší. Jinde je snaha místní hydraulické ztráty, vznikající při styku proudící vody s řešeným objektem, snížit na minimum. K tomu se využívají různé hydraulicky vhodné tvary a materiály. Tyto úpravy pak vedou ke zkapacitnění řešených objektů při zachování téměř stejných rozměrů okrajových konstrukcí.

Principiálně není tento přístup k modelování u rybího přechodu příliš vhodný. U něj jsou naopak vyšší ztráty u šterbin přívětivé, neboť a) snižují kritické rychlosti proudění, které mohou bránit v migraci některých jedinců a za b) vzdují hladinu v jednotlivých bazénech. Obecně tak vyšší místní ztráty snižují v bazénech celkovou energii proudění, která se v nich rozptyluje a kterou musejí ryby jinak překonávat.

Výzkumy s tematikou rybího přechodu se v ČR provádí zpravidla ve spojení s výstavbou nebo rekonstrukcí konkrétního vodního díla. Proto výzkum optimalizace obecného technického rybího přechodu je nejen v České republice, ale i ve světě relativně ojedinělý.

2.1 Matematické modelování

Rozvoj digitální techniky přinesl do hydraulického výzkumu obrovský posun. Ten spočíval zejména v rychlosti řešení složitých matematických rovnic. S využitím digitálních technologií se také potlačila potřeba vše příliš zjednodušovat¹, aby se daný problém dal řešit ručně, příp. graficky.

Matematické a fyzikální modely se začaly využívat a zdokonalovat postupně na teoretických základech hydrodynamiky. Ta se začala rozvíjet již od poloviny 18. století díky objevům Daniela Bernoulliho a Leonharda Eulera a na teoretických pracích řady významných vědců 19. století počínaje de Saint-Venantem. Až do dnešních let zatím nikdo nedokázal matematicky popsat nestacionární proudění vody v otevřených korytech tak dobře, jako to dokázal právě de Saint-Venant před více než sto padesáti lety [2].

Mnohá zahraniční výzkumná pracoviště považují matematické modelování v oblasti hydrotechnického výzkumu za vhodnější a správnější metodu řešení problémů než experimentální výzkum na fyzikálních hydraulických modelech [2]. S tím né vždy lze souhlasit - jednoduché problémy, např. 1D proudění v potrubí, takto řešit lze, ale složitější problémy je stále i v dnešní době lepší verifikovat s fyzikálním modelováním, byť může být řádově nákladnější.

Ve výzkumu optimalizace rybního přechodu přináší matematické modely vhodný nástroj, kterým lze operativně optimalizovat rozmístění, tvar i velikost navržených překážek, které se následně použijí pro ověření na fyzikálním modelu v laboratoři.

Principy matematických modelů se v hydrotechnice odvíjí od řešení základních matematických a hydromechanických rovnic, které popisují jak bilanci kapalin v našem modelu (rovnice kontinuity), tak její hybnost ve spojitém prostoru (pohybové rovnice).

Při studiu proudění se využívají dvě odlišné, avšak z hlediska mechaniky rovnocenné metody - Lagrangeovu a Eulerovu metodu - tzn., že fyzikální nebo mechanické vztahy mohou být matematicky vyjádřeny dvěma způsoby [9].

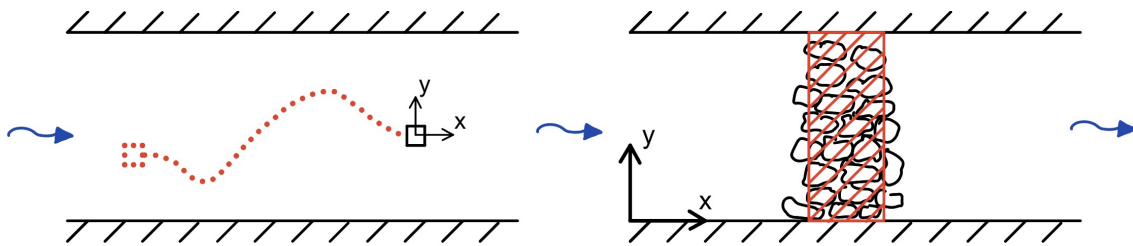
Lagrangeova metoda² vychází ze známé závislosti polohy částice v čase t a na její výchozí poloze a vlastnostech (např. rychlost, nebo tlak) v čase t_0 . Tzn., že vidíme pouze jednu částici jak se pohybuje v prostoru v daném čase (viz. Obr. 2.1 vlevo). Výhoda Lagrangeovy metody je, že se nemusí vytvářet výpočetní síť, nicméně ji lze využít jen pro menší počet částic a ve spojitém prostředí je tato metoda téměř nepoužitelná, proto se častěji využívá druhý způsob.

Eulerův přístup³ je založen na znalosti změny veličiny (např. rychlosti) v pevných bodech v prostoru a v různých časových okamžicích. Tzn., že vidíme rychlostní pole v řešené oblasti z pevného geometrického bodu (viz. Obr. 2.1 vpravo). To sice vyžaduje výpočetní síť, která může být náročná na výpočetní techniku, nicméně lze takto sledovat spojitý prostor modelu.

¹pozn.: stále se ale do řady modelů zavádí určitá zjednodušení

²V zahraničí je známá také jako diferenciální

³V zahraničí je znám také jako integrální



Obrázek 2.1: Schéma Lagrangeovy metody (vlevo) a Eulerovy metody (vpravo)

Hydrotechnické modely jsou obecně založeny na řešení řídicích rovnic pro 3D proudění, které jsou dané zákonem zachování hmotnosti (rovnice kontinuity) a zákonem zachování hybnosti (pohybové rovnice).

Základní pohybové rovnice reálné kapaliny jsou dány soustavou Navier-Stokesových rovnic, které vycházejí z obecnějších Eulerovských rovnic. Ty v roce 1757 publikoval Leonhard Euler jako popis vztahu mezi silami a zrychlením pohybu ideální kapaliny, tzn. že zde neuvažoval vnitřní tření. U reálné se však jednotlivé částice tekutiny pohybují okolo sebe v různých rychlostech a vzniká mezi nimi vnitřní tření a proto Navier a Stokes do rovnic zavedli kinematickou viskozitu⁴ ν .

Navier-Stokesovu rovnici můžeme obecně v kartézských souřadnicích napsat jako

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} u_j = a_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}$$

a při úpravě a rozpisu pro osy x , y a z takto

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) &= \rho \cdot a_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) &= \rho \cdot a_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= \rho \cdot a_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

kde levá strana reprezentuje setrvačné síly a pravá strana pak chronologicky sílu objemovou, tlakovou⁵ a třecí⁶.

Všechny síly jsou odvozeny z působení těchto základních sil na elementární hranol.

Pro simulaci proudění v našem modelu je využit software HEC-RAS 2D (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) od *U.S. Army Corps of Engineers*, který byl vyvinut hlavně za účelem využití jako základní technologie pro plánování a analýzu v oblasti povodňových škod říčních systémů. Software dokáže pracovat s ustáleným i neustáleným 1D a neustáleným 2D prouděním, které HEC-RAS řeší pomocí difuzní nebo dynamické vlny, pomocí numerické metody konečných diferencí [10].

⁴pozn. ta je dána podílem dynamické viskozity μ a hustoty ρ

⁵od normálového napětí

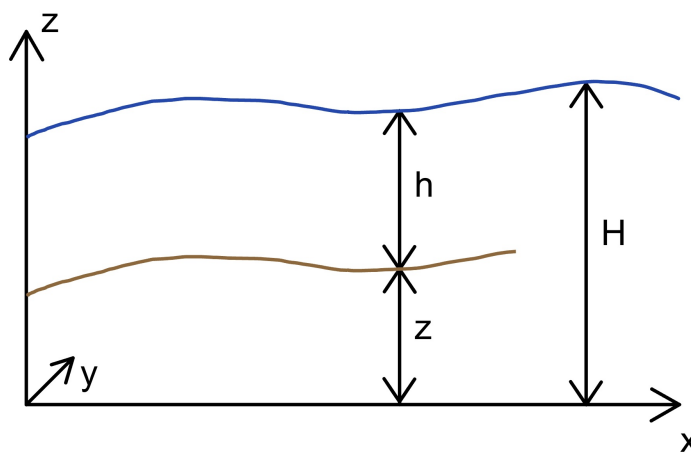
⁶od smykového napětí

Metoda konečných diferencí patří mezi nejstarší numerické metody, která se využívala ještě před výkonnými číslicovými počítači [11], a nachází své uplatnění hlavně u dlouhých a přímých koryt. Jak je na Obr. 2.3 patrné, vytváří čtvercovou síť, která u některých modelů nemusí dostatečně popsat řešenou oblast - v těchto případech se využívá buď metoda konečných prvků, nebo objemů, které často využívají i trojúhelníkovou síť pro podrobnější popis oblasti. Nicméně u zkoumaného výsekového modelu RP je více než dostatečná a dokáže pokrýt přesně celou oblast proudění. Správné nastavení podrobnosti výpočetní sítě je důležité pro vyvážení časové náročnosti a potřebné přesnosti výsledků.

Pohybová rovnice, tzv. **Difuzní vlna** se využívá u větších modelů, které nevyžadují detailní řešení obtékaní určitých překážek. Svě uplatnění tak nachází např. u modelů otevřených koryt při návrhu protipovodňových opatření. Difuzní vlna je prakticky zjednodušená dynamická vlna, kde aproximace spočívá v zanedbání nelineárního členu setrvačné síly, protože předpokládá malou změnu průtoku s přibývajícím časem.

Dynamická vlna je známá také jako de Saint-Venantova rovnice, která se využívá pro popis nestacionárního proudění u otevřených modelů. Základem pro odvození Saint-Venantových rovnic byla soustava Navier-Stokesových rovnic popsaných výše. Model HEC-RAS 2D je využívá v aproximovaném tvaru, tzv. Shallow Water Equations (SWE), protože se u 2D proudění předpokládají zanedbatelné vertikální složky rychlosti a dále že je proudící kapalina nestlačitelná a s konstantní hustotou.

Na Obr. 2.2 je schématicky naznačen popis výškových veličin, který byl upraven podle českého značení, např. h („hloubka“) místo originálního d („depth“), a které jsou využívány při výpočtu pomocí SWE.



Obrázek 2.2: Schéma vertikálních veličin [Zdroj: [25]]

Kde $h(x,y)$ je hloubka vody, $z(x,y)$ úroveň dna koryta a poloha hladiny je $H(x,y)$.

2D Shallow Water Equations mají tvar

pro rovnici kontinuity

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h u_y)}{\partial y} = 0, \quad (2.1)$$

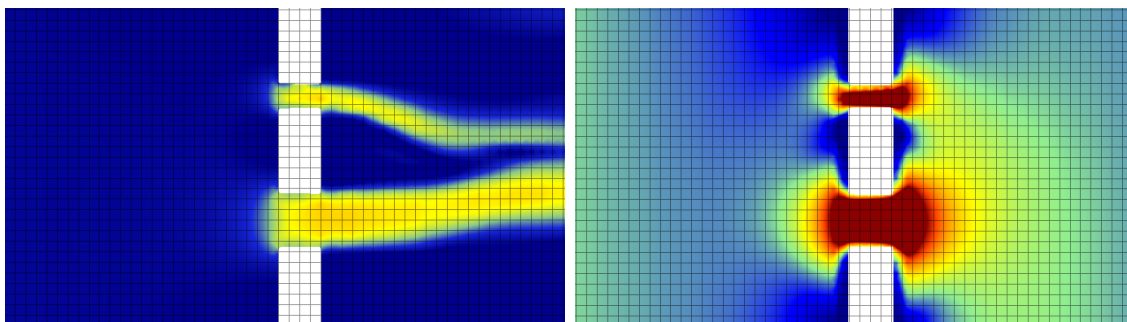
a pro pohybové rovnice

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} - f u_y + \frac{g u_x |U|}{C^2 h} = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} - f u_x + \frac{g u_y |U|}{C^2 h} = 0,$$

kde u_x a u_y jsou průměrné svislicové rychlosti v příslušných směrech, f je součinitel zahrnující Coriolisovo zrychlení, C pak značí Chézyho rychlostní součinitel zahrnující Manningův drsnostní součinitel.

Pro porovnání jsou na Obr. 2.3 zobrazeny výstupy obou přístupů, kde je jasně vidět nevyhovující popis difuzní vlnou. Je důležité nastavit dostatečně krátký výpočetní krok, který zahrne fluktuaci řešeného proudění. U detailního řešení objektových modelů se využívají kroky 0,1 s, který je využit i u tohoto modelu.



Obrázek 2.3: Porovnání výpočtu pomocí SWE (vlevo) a difuzní vlny (vpravo)

Po stanovení řídicích rovnic se musí výpočetnímu modelu nastavit okrajové podmínky. První nastavení spočívá v určení hranice prostoru, kudy bude kapalina proudit, tedy oblast proudění dána geometrií rybího přechodu.

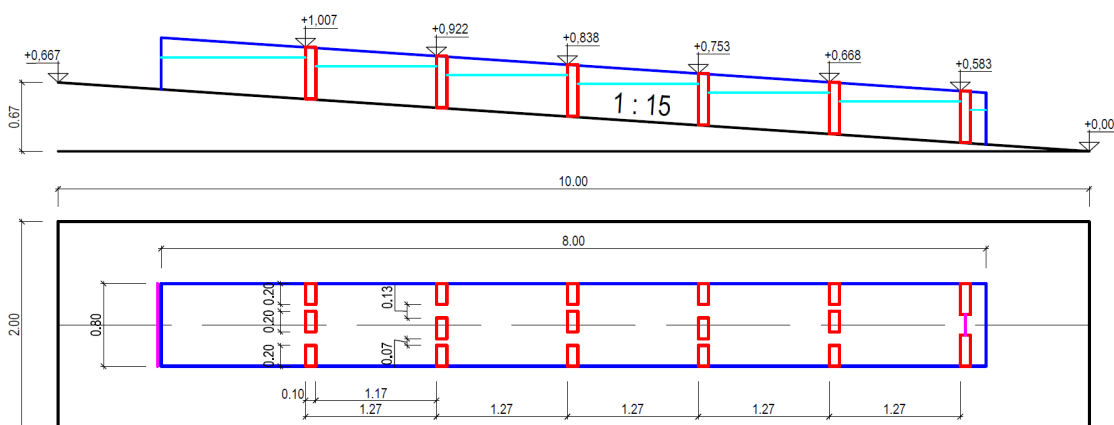
Pro pilotní variantu je ke stanovení potřebných rozměrů využita norma *TNV 75 2321 Zprůchodňování migračních bariér rybími přechody* [15]. Základní rozměry a veličiny jsou znázorněny v Tab. 2.1. Tato varianta má za cíl a) ověřit funkčnost a správnost zvoleného modelového přístupu a b) dát základní znalosti o proudění v rybím přechodu pro další fáze výzkumu. Vzhledem k optimalizaci obecného rybího přechodu a nikoliv konkrétního pracuje se s výsekovou částí napřímeného žlabu. Je tedy důležité mít na paměti, že zde není např. řešení nátok na RP nebo zalomení tratě, které se využívá u vyšších spádů pro zkrácení podélného profilu. Tyto jevy mohou pak v realitě způsobovat určité ovlivnění proudu a při následné aplikaci výsledků je potřeba brát to v potaz.

Tabulka 2.1: Rozměry pro variantu 0 a jejich přepočítání pro měřítko 1:1,5

Parametr	Kritérium	Skutečnost	Model 1:1,5	Jednotky
Délka bazénu	-	1,9	1,27	m
Šířka bazénu	-	1,2	0,80	m
Šířka štěrbin	-	0,1 a 0,2	0,067 a 0,133	m
Výška žlabu	-	1,2	0,8	m
Hloubka vody - přeřej	min	0,3	0,2	m
- bazén	min (opt)	0,5 (0,8)	0,33 (0,53)	m
Průtok	min	150	55	l/s

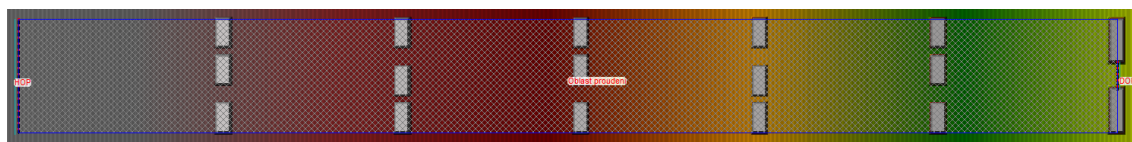
Takto sestavená geometrie je znázorněna na Obr. 2.4, kde černou barvou je naznačeno dno v modelovaném sklonu 1:15. Technickému žlabu RP (oblasti proudění) odpovídá tmavě modrá barva a červená barva představuje příčné překážky. Fialová barva na začátku a konci úseku představuje okrajové podmínky.

Aby se předešlo chybám při vytváření výpočetní sítě, bylo dno (černý polygon) půdorysně rozšířeno, aby jeho okraj nepřilhal k definované oblasti proudění (modrému polygonu).



Obrázek 2.4: Geometrie modelu rybího přechodu - AutoCAD Civil 3D

U modelů otevřených koryt se často na hranicích proudění uvažují po geometrii další dvě okrajové podmínky. Na začátku modelu, v tomto případě tedy na vtoku rybího přechodu, je uvažována podmínka konstantního známého průtoku (horní okrajová podmínka - HOP). Na konci modelu, tedy na výtoku z rybího přechodu, je postupnou iterací nastavena hladina v jednotlivých bazénech (dolní okrajová podmínka - DOP).



Obrázek 2.5: Geometrie modelu rybího přechodu - HEC-RAS

2.2 Fyzikální modelování

Do této chvíle se práce zabývala matematickými modely a popisům mechaniky proudění. Nyní přejde k fyzikálním modelům, které i v dnešní době mají své opodstatnění i přes velký rozvoj výpočetní techniky. Na fyzikálních modelech lze sledovat celou řadu veličin, které u matematického modelování buď nelze kvůli složitosti provést, nebo není pro takový výpočet dostatek vstupních dat [9].

Přestože je tato diplomová práce zaměřená spíše na matematické modelování, běží souběžně s ní hydraulický výzkum v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze, který slouží jako hlavní ověřovací a optimalizační nástroj.

Je to dáno hlavně tím, že matematický 2D model nedokáže svým rozsahem popsat rozdělení rychlostí po svislici a některé jevy tak nelze správně vyhodnotit (více je tomu věnováno v Kap. 2.3 na str. 25). Nicméně ho lze velmi dobře využít na návrh rozmístění překážek a pochopení rozdělení proudění u jednotlivých variant, které pak lze ověřit a vyhodnotit na fyzikálním modelu.

Pro zachování hydraulických zákonů na modelu, které platí i ve skutečnosti, musejí fyzikální modely odpovídat předem danému měřítku, které se odvíjí z teorie modelové podobnosti.

Modelová podobnost

Teorie podobnosti v zásadě pracuje se dvěma základními směry, kde každý bere jiný pohled na rozměrovou homogenitu veličin. První směr je založen na popisu a rozboru systému pomocí základních diferenciálních rovnic, které řešený fyzikální jev přímo vystihují. Druhý směr využívá zákony mechanické (modelové) podobnosti. Ty sice vyžadují předběžně vědět, jaká hlavní fyzikální podstata jevu se na modelu bude vyskytovat, ale nemusí se znát přesná matematická formulace řešeného jevu (ta u nově zkoumaných jevů ani nemusí být známo).

V této práci je využit druhý směr, u kterého je dobré znát pojem **mechanická podobnost**, která v sobě dále zahrnuje podobnosti geometrické⁷, kinematické⁸ a dynamické⁹.

Odvození zákona mechanické podobnosti vychází ze shromáždění všech fyzikálních veličin, které obecně mohou ovlivňovat zkoumaný pohyb tekutin a tělesa (jedná se o veličiny, jako je např. měrná hmotnost obtékaného tělesa ρ , rychlost proudění vody v , ale i veličiny rozměrové, jako je délka tělesa l , nebo jeho šířka b , atd.).

Síly, které působí na těleso v tekutině lze tedy vyjádřit vztahem

$$P = c' \mu^a \rho^c K^e \sigma^f v^i b^k l^n h^p d^x \rho_s^y g^z$$

kde c' je konstanta, exponenty jsou neznámé a zbylé jednotky vyjadřují veličiny ovlivňující zkoumaný pohyb proudění na těleso.

⁷kde všechny úhly a velikosti jsou v měřítku

⁸předpokládá podobnost příslušných složek rychlosti a zrychlení

⁹úměrná podobnost celkových sil

Po rozměrové analýze v základní soustavě fyzikálních jednotek získáme obecnou rovnici pro sílu působící na těleso v tekutině při jejich vzájemném pohybu, ve tvaru

$$P = \rho l^2 v^2 \varphi \left(\frac{v^2}{gl}, \frac{\rho l v}{\mu}, \frac{\rho v^2 l}{\sigma}, \frac{\rho v^2}{K}, \frac{h}{l}, \frac{b}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad (2.3)$$

Rovnice platí jak ve skutečnosti, tak na modelu. Z odvození této rovnice pak plyne, že všechny výrazy v závorce jsou bezrozměrná čísla. Pro probíhající výzkum je důležitý hned první výraz v závorce, který představuje **Froudovo číslo**.

Znamená to tedy, že pro model i skutečnost bude Froudovo číslo identické

$$Fr = \frac{v^2}{gl} = idem \quad (2.4)$$

z toho pak vyplývá

$$M_{Fr} = 1 \quad (2.5)$$

značí Froudův zákon mechanické podobnosti hydrodynamických jevů [2].

Teorie podobnosti pak umožňuje získaná data z experimentů převést na hodnoty odpovídající skutečným případům. Proto je důležité, aby všechny části modelu vždy splňovaly příslušné měřítko, aby zkoumané jevy měly v ideálním případě totožný průběh na modelu i na skutečném vodním díle [9].

Podobnost dle Frouda se využívá hlavně tam, kde převažují gravitační síly oproti dalším silám, např. třecím, kapilárním atd., tedy zpravidla tam, kde probíhá proudění o volné hladině. Při využití rovnic 2.4 a 2.5 lze dostat

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g M_L} = 1$$

z čehož lze snadno určit měřítko potřebná k dalšímu postupu.

Při úvaze, že gravitační zrychlení bude jak u modelu, tak ve skutečnosti stejné, tudíž $M_g = 1$, platí

pro rychlost

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_L} = 1 \text{ a tedy } M_v = \sqrt{M_L}$$

a pro průtok

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_L} = \frac{\left(\frac{M_Q}{M_L^2}\right)^2}{M_L} = 1 \text{ a tedy } M_Q = M_L^{5/2}$$

kde M_{Fr} je měřítko Froudova čísla, M_L délkové měřítko a M_v , resp. M_Q jsou měřítka rychlosti, resp. průtoku. Takto lze jednoduše získat potřebné modelové hodnoty

pro rychlost

$$\text{pokud } M_v = \frac{v_{skut}}{v_{model}} \text{ tak } v_{model} = \frac{v_{skut}}{\sqrt{M_L}}$$

a pro průtok

$$\text{pokud } M_Q = \frac{Q_{skut}}{Q_{model}} \text{ tak } Q_{model} = \frac{Q_{skut}}{M_L^{5/2}} \quad (2.6)$$

Při modelování proudění podle Froudova zákona je důležité dodržet mezní modelové hodnoty, protože by jinak při velmi malých modelových rozměrech mohla spolupůsobící kapilární síla vyvolávající povrchové napětí při proudění zdeformovat paprsek. Pak by nebylo možné, bez vnesení chyb, extrapolovat modelovaný jev na skutečnost [2]. Níže jsou uvedeny některé parametry, které se týkají probíhajícího výzkumu:

- a) *Povrchová rychlost proudu na objektových modelech má být ≥ 230 mm/s;*
- b) *Hloubka vodního proudu na modelu ≥ 15 mm;*
- c) *Na modelu je nutné zachovat stejný režim proudění, jako ve skutečnosti;*

Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi malé hodnoty, které nastávají zpravidla buď u velkých měřítek nebo výsekových modelů, tak se v tomto případě (tedy u měřítka 1:1,5) k daným limitům nedostaneme. Výjimka nastává u rychlostí ve vytvořených tůních, kde se rychlost proudění blíží nule. Ale vzhledem k tomu, že je to součástí kritérií a tento jev nastává i ve skutečnosti, je to zde tedy naopak žádoucí.

Pro určení modelového měřítka byla využita *Koncepce zprůchodnění říční sítě* [14], která již byla popsána v kapitole 1.2. Proběhla rozsáhlá rešerše vodních toků, které je potřeba zprůchodnit a kde má tento výzkum tedy své uplatnění. Zaměřeno bylo na mezinárodní povodí Labe, resp. její Vltavskou větev, která spadá pod správu Povodí Vltavy, s.p. Rešerše spočívala v určení vodnatosti ($Q_{355,d}$) vymezených úseků fragmentovaného toku a pomocí tabulky 2.2 byl určen minimální průtok potřebný pro rybí přechod.

Tabulka 2.2: Hodnoty minimálních průtoků v RP odvozené z $Q_{355,d}$ [15].

$Q_{355,d}[m^3/s]$	Minimální podíl pro RP [%]	Minimální průtok RP
< 0.2		do $0.1 m^3/s$ celé Q
0.2 - 0.5	50	$0.1 m^3/s$
0.5 - 1.0	50	min. $0.25 m^3/s$
1.0 - 5.0	40	min. $0.4 m^3/s$
5.0 - 25	20	min. $1.0 m^3/s$
> 25	20	min. $5.0 m^3/s$

Při znalosti minimálních průtoků, které RP vyžaduje, bylo jednotlivým vodním tokům přiřazeno měřítko s ohledem na maximální průtokové možnosti, kterých lze dosáhnout ve sklopném žlabu (tj. 150 l/s). K tomu tomu využito Froudova zákona mechanické podobnosti. Při úpravě rovnice 2.6 dostaneme

$$M_L = \left(\frac{Q_{skut}}{Q_{model}} \right)^{2/5} \quad a \quad tedy \quad M_L = \left(\frac{Q_{min,RP}}{0,15} \right)^{2/5}$$

V tabulce 2.3 níže jsou znázorněny vybrané vodní toky, pro které bylo dostatek informací pro stanovení rozpětí fyzikálních měřítek.

Tabulka 2.3: Vybrané vodní toky vymezené Konceptí zprůchodnění říční sítě

Vodní tok	Vymezení vodního toku	$Q_{355,d}$ m^3/s	$Q_{min,RP}$ m^3/s	Měřítko $1:M_L$
Vltava	od ústí do Labe po Berounku	48,4 - 28,0	9,68 - 5,60	5,3 - 4,3
Berounka		5,11 - 8,64	1,02 - 1,73	2,2 - 2,7
Mže		1,51 - 2,20	0,60 - 0,88	1,7 - 2,0
Radbůza		1,33 - 1,41	0,53 - 0,56	1,7 - 1,7
Blanice	od ústí do Sázavy po ř. km 43.122	0,06 - 0,17	0,06 - 0,10	0,7 - 0,9
Lužnice	od soutoku s Vltavou po soutok s Nežárkou	0,78 - 3,25	0,39 - 1,30	1,5 - 2,4
Malše	od ř.km 36.050 po ř.km 93.164	0,13 - 0,64	0,10 - 0,32	0,9 - 1,4
Sázava	od ústí do Vltavy po město Ledč nad Sázavou	1,45 - 3,58	0,58 - 1,43	1,7 - 2,5
	a od hranice EVL Sázava po ř. km 207,87	0,22 - 1,45	0,11 - 0,58	0,9 - 1,7
Stropnice	od ř. km 18,384 po vodní dílo Humenice	0,07 - 0,09	0,07 - 0,09	0,7 - 0,8
Trnava	od konce vzduť VD Trnávka po ř. km 44,46	0,25 - 0,29	0,13 - 0,15	0,9 - 1,0
Želivka	od ř. km 66,69 po ř. km 93,27	0,18 - 1,95	0,10 - 0,78	0,9 - 1,9

Na základě této rešerše bylo zvoleno měřítko 1:1,5.

Fyzikální model rybího přechodu

Pro verifikování matematického modelu a optimalizaci překážek byl za tímto účelem v hydrotechnické laboratoři ČVUT v Praze sestaven fyzikální model ve sklopném žlabu zajišťující operativní náklony modelu, viz. Obr. 2.6.



Obrázek 2.6: Sklopný žlab v hydrotechnické laboratoři ČVUT v Praze

Sestavený model lze operativně měnit dle potřeby - posun nebo výměnu dřevěných hranolů lze provést v řádu několika minut. Modelový žlab pak lze během několika hodin nastavit na libovolné měřítko a šířku.

Tyto časové horizonty lze považovat za krátké, nicméně zde se projevuje výhoda synergie matematického a fyzikálního modelování. Díky předpřípravě v matematickém modelu se v řádu několika desítek minut mohou připravit a zkalibrovat různé varianty a na fyzikálním modelu ověřit již konkrétní návrhy.

Po sestavení navržené dispozice je potřeba nastavit okrajové podmínky. Na modelech je možno pracovat s dvěma okrajovými podmínkami - horní okrajová podmínka představuje průtok, který rybím přechodem prochází. Voda je přiváděna z centrálního okruhu hydrotechnické laboratoře do uklidňovacího prostoru v horní části žlabu. K měření průtoků se zde využívá indukční průtokoměr.

Dolní okrajová podmínka stanovuje potřebnou hloubku v rybím přechodu. Je zde využita již řadu let osvědčená metoda, kterou využívali již naši předci na hradlových jezích - hradítka. Mezi hradítky se iteračním postupem vytvoří průtočný otvor, který ve žlabu vyrovná hodnoty přítoku s odtokem, čímž se ustálí hladiny v jednotlivých bazénech.

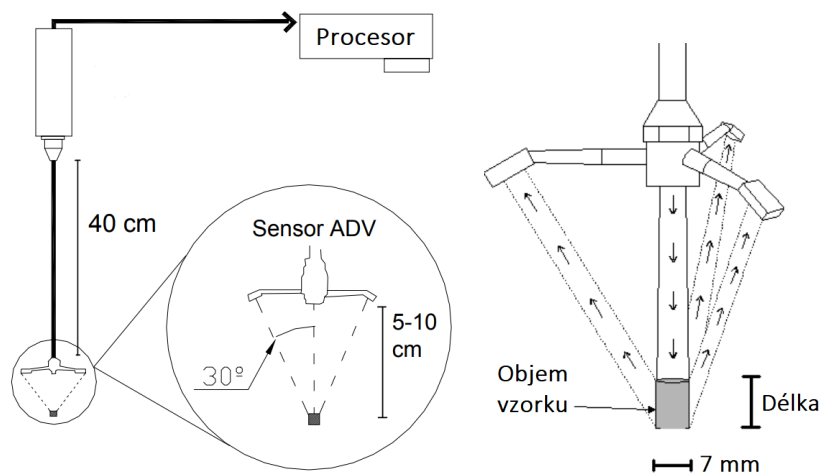


Obrázek 2.9: Nastavení horní okrajové podmínky (vlevo) a dolní okrajové podmínky (vpravo)

Na obr. 2.9 je vidět velmi provzdušněné a turbulentní proudění. U většiny objektových modelů se mezi uklidňovací komoru a samotnou oblast proudění využívají uklidňovací prvky,¹⁰ které takovéto proudění ustálí. U modelu RP tomu tak není, protože jak nejprve ukázaly matematické modely a následně i první zkoušky na fyzikálním modelu, tak se proudění uklidní samovolně při obtoku prvními překážky a ve druhém, případně třetím bazénu je proudění již ustálené.

¹⁰např. soustavu paralelních trubek menších průměrů, nebo ocelové perforované plechy

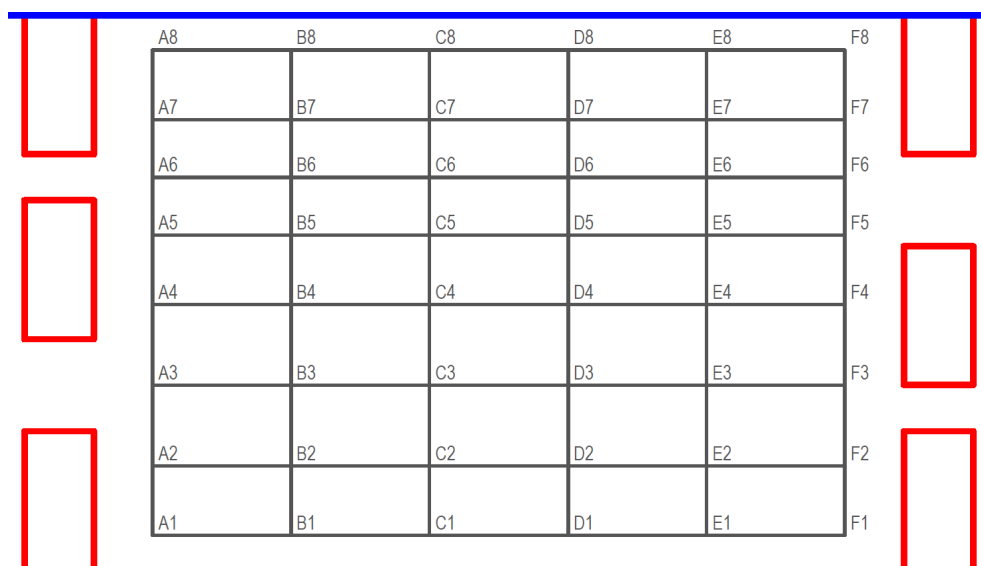
Po nastavení dispozice a okrajových podmínek lze přejít k měření rychlostního pole. K tomu je využita ADV sonda (Acoustic Doppler Velocimeter), která k měření využívá Dopplerův princip.



Obrázek 2.10: Schéma ADV sondy (vlevo) a schéma směru signálů (vlevo) (Zdroj: Nortek ADV Manual)

Sonda před sebe vydává velmi krátké akustické impulsy, jenž se odrážejí cca 5 - 10 cm před vysílačem od suspendovaných částic ve vodě, které jsou následně přijaty ve třech přijímačích. Měření je pak sondou přepočteno na rychlosti ve směru os x , y a z .

Pro zachycení celkového rychlostního pole byla vytvořena šachová měřící síť s body od A1 po F8 (Obr. 2.11), která rovnoměrně pokryla řešenou plochu, a kde v každém bodě bylo po celou minutu provedeno měření. Pro pokrytí rychlostních fluktuací se výsledné minutové měření zprůměrovalo a následně pomocí softwaru MATLAB vyhodnotilo.

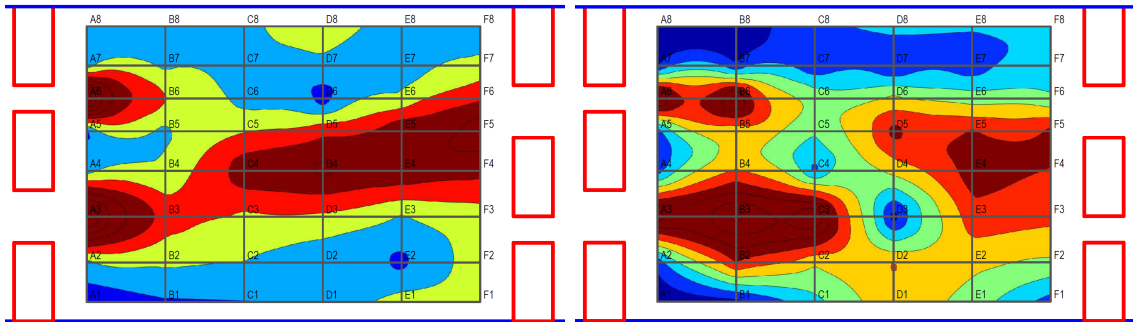


Obrázek 2.11: Měřící síť

2.3 Verifikace modelu

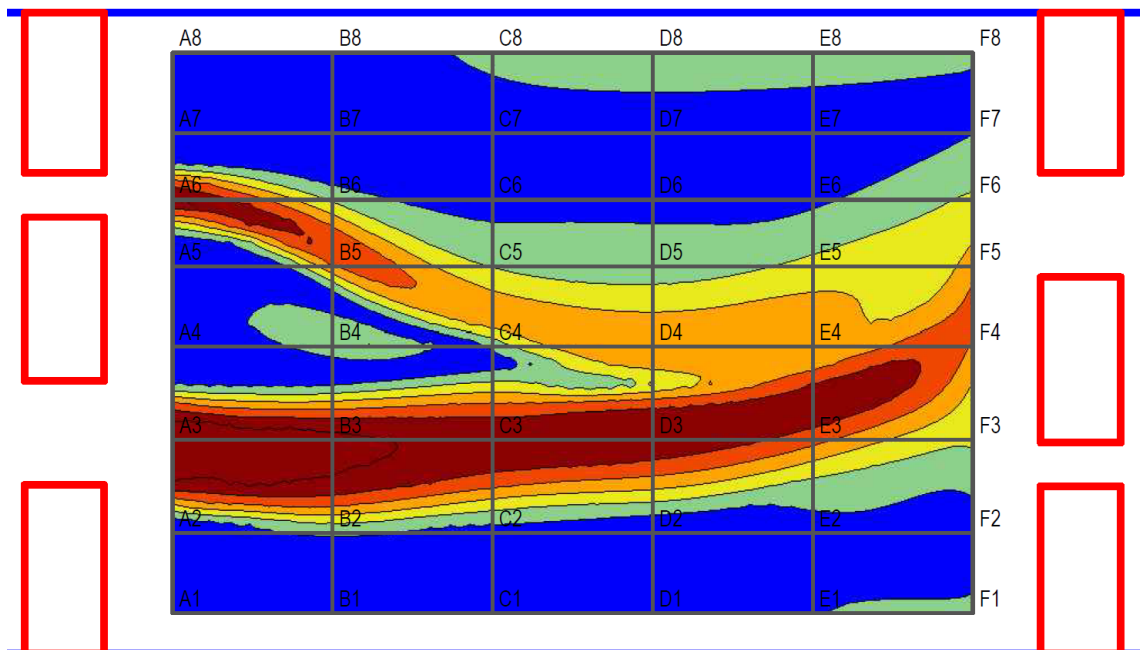
Použitý matematický model ze své podstaty nedokáže pracovat s vertikálním rozložením rychlosti. Z toho důvodu je důležité provést verifikaci s fyzikálním modelem pro zjištění odchylek a nepřesností.

S využitím výpočetní techniky a postupu zmíněným v předchozí kapitole proběhlo měření na fyzikálním modelu ve dvou úrovních. První měření v úrovni 15 cm nade dnem a druhé 5 cm nade dnem. Výsledky tohoto měření jsou znázorněny na Obr. 2.12 níže.



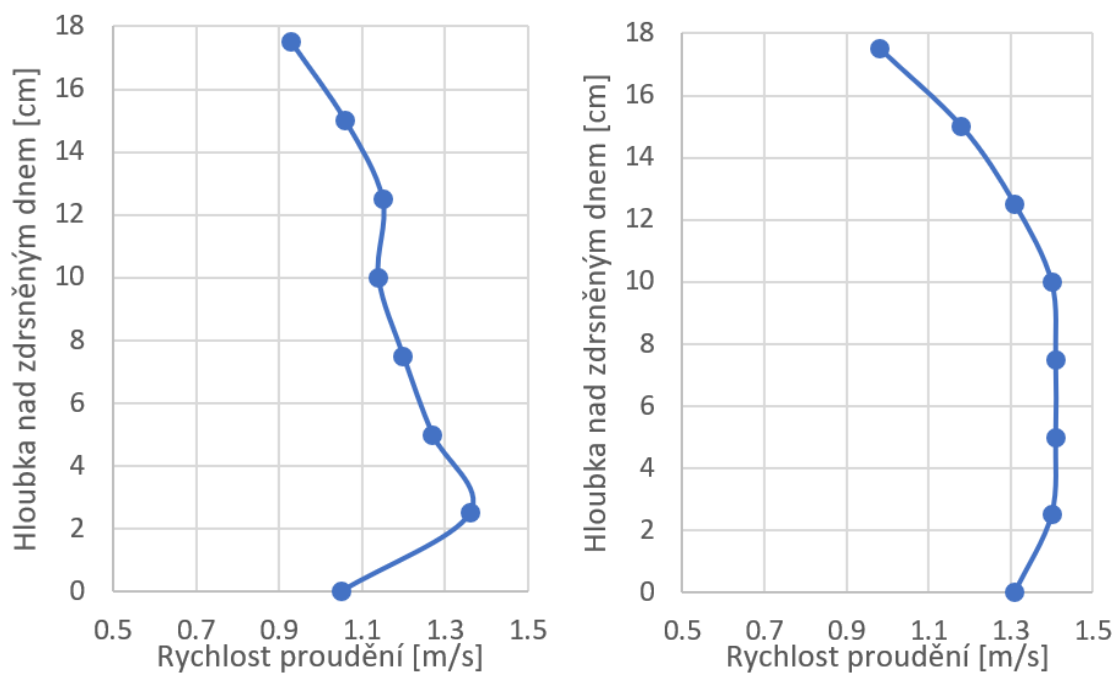
Obrázek 2.12: Výsledky měření na fyzikálním modelu 15 cm nade dnem (vlevo) a 5 cm nade dnem (vpravo)

Z výsledků je patrné, že se těsně za štěrbinou nachází výrazná vertikální složka rychlosti v_z směrem ke dnu, kterou matematický model nedokáže správně popsat (viz. Obr. 2.13).



Obrázek 2.13: Výsledky z matematického modelu

Pro ověření také proběhlo měření rychlostí ve štěrbině po svislici s 30 sekundovým zprůměrováním. Na obr. 2.14 vlevo je svislice měřena na začátku štěrbiny, vpravo pak na jejím konci. Jsou zde patrné relativně vysoké hodnoty rychlostí u dna, i přes jeho zdrsňelý povrch.



Obrázek 2.14: Rozložení rychlosti po svislici

Na obr. 2.15 níže je zachyceno možné zavzdušnění proudu přímo za štěrbinou. Tento jev může mít v ojedinělých případech výrazný vliv na migrační účinnost, neboť vysoké nasycení vzduchem může fungovat jako bublinková clona bránící rybám v pohybu.



Obrázek 2.15: Zavzdušnění proudu těsně za štěrbinou

Závěrem této kapitoly tedy lze říci, že 2D matematický model není pro samostatné modelování dostačující, ale je možné ho velmi dobře využít jako optimalizační nástroj pro analýzu variant k fyzikálnímu modelování. Relativně spolehlivě zobrazuje průběhy hladin a hlavní proudové poměry s tůňovými oblastmi.

Extrémy rychlostí ve štěrbinách vyhodnocuje velmi dobře, což potvrzují výsledky z verifikačního měření (Obr. 2.14) a z pilotní varianty v tab. 4.2 na str. 34. Z fyzikálního měření vyšla extrémní měřítková hodnota 1,41 m/s a u matematického modelu 1,38 m/s.

Pro věrohodnější simulaci proudění, která uvažuje i vertikální složky rychlosti, by se muselo vycházet z 3D modelu, který je neúměrně více časově náročný, než je tomu u 2D modelu. Výhoda matematického modelu v podobě operativních úprav variantních návrhů by tak pominula.

Veškeré modelové varianty je tak nutné ověřit na fyzikálním modelu pomocí podrobné měřicí sítě a výkonné měřicí techniky zachycující složky rychlosti ve všech třech směrech (např. ADV sonda).

Kapitola 3

Technická proveditelnost

Tato kapitola se v informativním měřítku věnuje technologii a způsobu výstavby technických rybích přechodů. Norem, které by se při návrhu a stavbě mělo dodržovat je hned celá řada, ale zde je spíše pozornost věnována normám ČSN 73 1208 a ČSN EN 1992-1-1:2006. První obecně popisuje návrh betonových konstrukcí vodohospodářských objektů a druhá navrhování betonových konstrukcí obecně.

Využití betonových kvádrů jako překážek v rybím přechodu, přináší oproti přírodním kamenům řadu výhod. Nejenže lze díky nim zajistit relativně přesné a očekávatelné hydraulické podmínky, které i při kolísavých průtocích jsou relativně konstantní, ale také samotná výstavba a doprava materiálu je jednodušší a levnější.

Při stavbě z přírodních kamenů může být problém i obstarání vhodných přírodních kamenů v potřebném množství. Balvanité linie totiž tvoří vždy několik balvanů o velikosti až 1-1,5m, přičemž jejich hmotnosti se mohou pohybovat v řádu několika tun.

U betonových přepážek lze využít standardní betonové směsi. U masivních vodních staveb se zpravidla snažíme využívat nižší pevnostní třídy, aby vlivem hydratačního tepla nevznikaly přílišné trhliny.

Prostředí v rybím přechodu může být velmi nestálé. Střídají se zde mokré a suché stavy a je proto vhodné uvažovat při vlivu karbonatace (XC4) a působení mrazu¹ (XF3) s betony pevnostní třídy alespoň C25/30.

Na šterkonosných tocích je nutné uvažovat s mechanickým zatížením (obrusem). To řadíme do stupně XM, které se dále dělí na podtřídy 1-3. Zde je při nižších rychlostech splavenin požadovaná pevnost alespoň C30/37 (pro XM2), resp. C35/45 u vysokých rychlostí (XM3).

Další podmínky, jako chemická agresivita a obsah chloridů, je nutné posoudit již samostatně na konkrétním vodním toku.

¹Pozn. Při úvaze celoročního provozu RP.

Minimální tloušťka betonových bloků se odvíjí hlavně od krycí vrstvy použité výztuže, která je stanovena jako větší z hodnot

$$c_{min} = \max \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

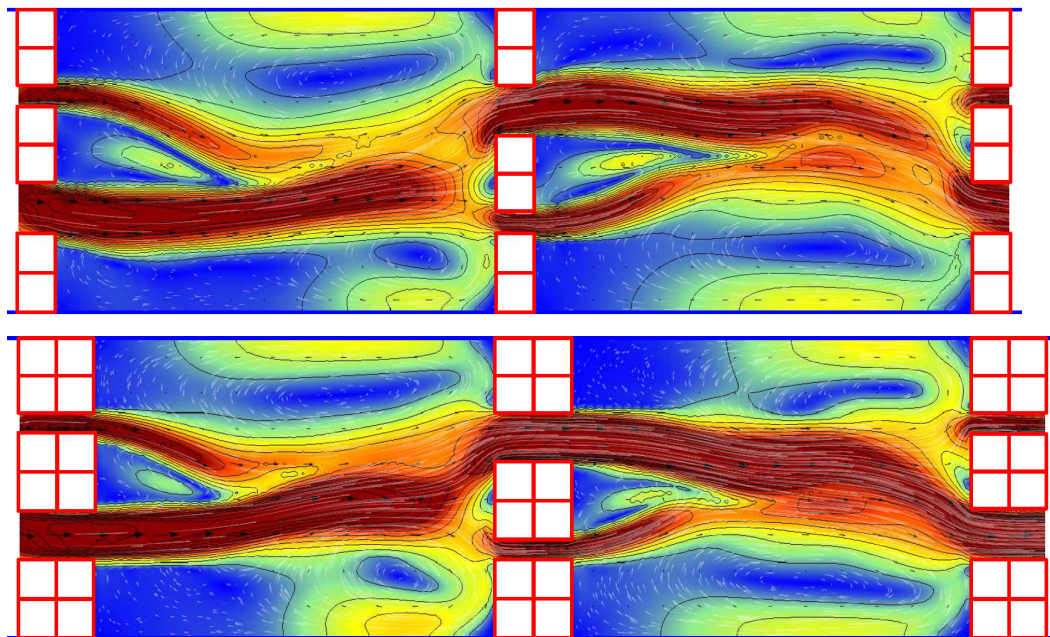
kde c_{min}	je minimální betonová krycí vrstva	
$c_{min,b}$	minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti	10÷20 mm,
$c_{min,dur}$	minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí	10÷40 mm,
$\Delta c_{dur,\gamma}$	přídavná bezpečnostní složka	0 mm,
$\Delta c_{dur,st}$	redukce min. krycí vrstvy při použití nerezové oceli	0 mm,
$\Delta c_{dur,add}$	redukce min. krycí vrstvy při použití přídavné ochrany	0 mm.

obecně pro RP tedy lze uvažovat

$$c_{min} = \max \{20; 40 + 0 - 0 - 0; 10 \text{ mm}\} = 40 \text{ mm}$$

Z tohoto důvodu, mohla oproti původnímu předpokladu rozměrů kamenů 30x30 (pro skutečnost), být upravena tloušťka balvanů na polovinu. Tato úprava přinesla řadu výhod, počínaje rozměry modelových prefabrikátů, které jak bylo zmíněno již v předchozí kapitole, mají v měřítku 1:1,5 typizovaný rozměr 10x10. Tento rozměr řádově zrychlil a zjednodušil přípravu fyzikálního modelu. Z pohledu migrace znamenají tenčí stěny pro ryby menší (kratší) migrační překážku, protože se kritický profil s vysokými rychlostmi zkrátil na polovinu a prostor pro tůň se tím v bazénu prodloužil.

Na Obr. 3.1 je znázorněna simulace ovlivnění tloušťky stěn na proudění kapaliny. Z obrázku je patrné, že větší kameny mají částečný vliv na směr proudění těsně za překážkou, jinak je proudění téměř totožné. Ovlivnění balvanů tedy lze zanedbat.



Obrázek 3.1: Porovnání vlivu velikosti balvanů na proudění

Kapitola 4

Optimalizace technického rybího přechodu

Každá z předchozích kapitol měla po částech představit jednotlivé útržky, které při sestavení slouží jako základní balík informací potřebných pro optimalizaci technického rybího přechodu. Počínaje důvodem migrace ryb a jejich schopností, na které navazovaly důvody zprůchodnění a jejich možnosti. Předchozí kapitoly popsaly způsob a principy, jakými se bude rybí přechod optimalizovat, a jestli jednotlivé parametry vůbec lze technicky provést.

Pro přehled jsou další odstavce věnovány shrnutí kritérií, ze kterých optimalizace vychází.

Důležité pro překonání větších spádů je v případě balvanitého RP vytvoření kaskády bazénů, které jsou způsobeny mezerami mezi liniovým rozmístěním balvanů. Tyto překážky vytvářejí menší spády, které již ryby snadněji překonají. Prvním sledovaným kritériem je tak rozdíl hladin mezi jednotlivými bazény - obecně u RP platí maximálně 20 cm, ovšem dle TNV 75 2321 je u tohoto typu maximální hodnota 15 cm.

Dalším parametrem jsou hloubky v bazénech, které zajišťují, aby měla ryba okolo sebe dostatek prostoru a pobyt v rybím přechodu pro ni nebyl příliš stresující. Je dobré rozlišovat hloubky v bazénech a v peřejnatých částech, tedy mezi jednotlivými štěrbinami - zde jsou minimální hodnoty stanoveny na 30 cm a v bazénové části je optimum 80 cm, přičemž minimální hodnota je alespoň 50 cm.

Mezi hodnotící kritéria patří také rychlosti proudění. V předchozích kapitolách byly zmíněny různé druhy ryb, které mají také různé schopnosti plavání. V tuzemských podmínkách je obecný předpoklad, že průměrné širší spektrum ryb zvládne překonat rychlost proudění 1,2 m/s (až 1,4 pro pstruhové pásmo). Nicméně z již dříve řečených důvodů, je doporučovaná hodnota mezi 0,8 - 1,0 m/s.

V této práci je snaha o vytvoření podmínek pro širší spektrum živočichů, proto jako návrhová rychlost proudění je zvolena hodnota 1 m/s a jako mezní pak 1,2 m/s. Pro bezpečný a snadnější přesun i slabších jedinců a drobných vodních živočichů je na dně modelu zvýšena drsnost pomocí lomového kamene frakce 63 až 125 mm.

Posledním kritériem, které se při výsledcích hodnotí je disipace energie. Maximální disipace je doporučována 125 - 135 W/m³, která ohraničuje výkonnost širšího druhového spektra ryb. Pro výpočet disipace energie využíváme následující vzorec

$$P = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{V}$$

kde P je měrný disipovaný výkon v bazénu [W/m³], ρ_w je měrná hmotnost vody [kg/m³], g gravitační zrychlení [N/kg], Q je průtok [m³/s], Δh je rozdíl hladin mezi bazény [m] a V objem vody v bazénu [m³].

Pro konkrétní geometrii použitou v této práci vypadá vzorec následovně

$$P = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{V} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,15 \cdot \Delta h}{1,9 \cdot 1,2 \cdot h}$$

Geometrie modelu je stanovena na minimální hodnoty, aby byl podpořen jeden z cílů, kterým je snížení investičních nákladů. V tab. 4.1 je pro přehled výpis základních veličin a jejich přepočty s využitím Froudova zákona mechanické podobnosti.

Tabulka 4.1: Souhrnný přehled základních veličin a jejich přepočty pro měřítko 1:1,5

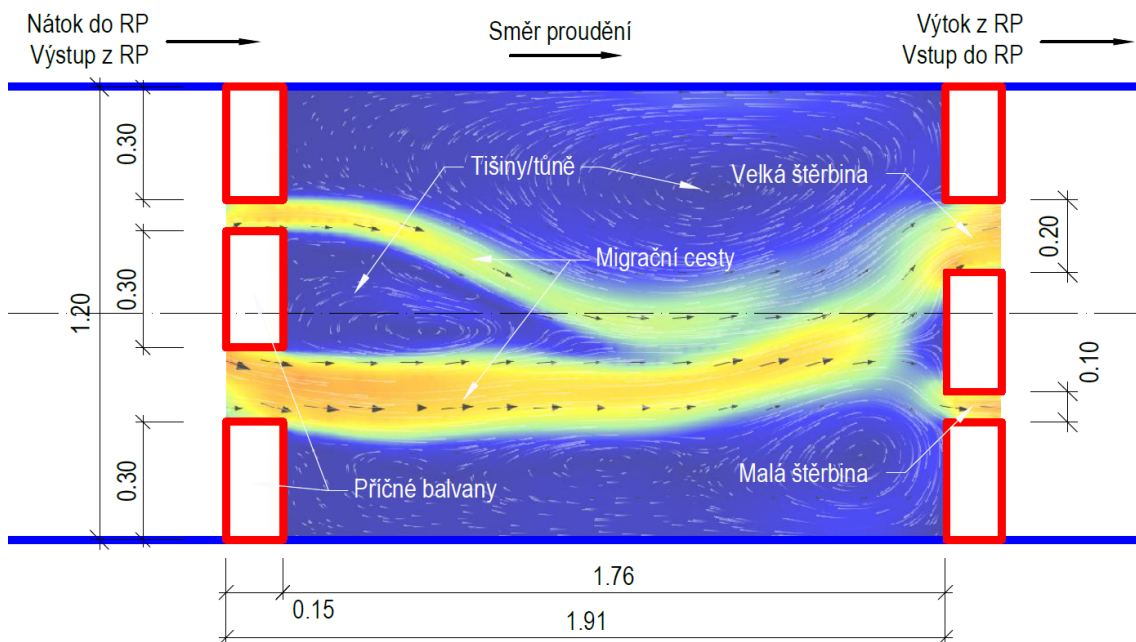
Parametr	Kritérium	Skutečnost	Model 1:1,5	Jednotky
Rozdíl hladin	max	0,15	0,10	m
Hloubka vody				
- peřej	min	0,3	0,2	m
- bazén	min (opt)	0,5 (0,8)	0,33 (0,53)	m
Rychlost vody	opt (max)	0,8 ÷ 1,0 (1,2)	0,65 ÷ 0,82 (1,0)	m/s
Průtok	-	150	55	l/s
Disipace energie				
- kaprové vody	max	90 - 135	-	W/m ³
- lososové vody		100 - 125		W/m ³
Délka bazénu	-	1,9	1,27	m
Šířka bazénu	-	1,2	0,80	m
Šířka štěrbin	-	0,1 a 0,2	0,067 a 0,133	m

Kvůli časové náročnosti verifikací a přestavbě fyzikálního modelu, jsou pro účely diplomové práce nadcházející varianty navrženy pouze pomocí matematického modelování. Ze závěrů kap. 2.3 Verifikace modelu na str. 25 lze uvažovat, že zvolený matematický přístup je pro optimalizační úlohu vhodný. Tyto varianty budou v budoucnu v rámci paralelně probíhajícího výzkumu ověřeny na fyzikálním modelu. Pro optimalizaci je také uzpůsobena geometrie, která proto vychází ve všech variantách ze stejného rozměru technického žlabu, a hledá nejlépe rozmístěné jednotlivé překážky.

Optimalizace bude dále spočívat ve vyhodnocení navržených variant pro sklony 1:15, 1:20 a 1:25. Tyto sklony byly zvoleny na základě konzultací se zástupci Povodí Vltavy, s.p. (jakožto provozovatel a zhotovitel staveb) a zástupci Komise pro rybí

přechody při AOPK ČR, jakožto odborníci řešené problematiky. Sklony jsou dle doporučení již hraniční, které norma TNV 75 2321 dovoluje, nicméně lze u těchto sklonů předpokládat nižší investiční náklady. Na těchto maximech je také nejvíce patrné vliv úprav na hodnotící parametry. U mírnějších sklonů lze uvažovat s více přívětivými podmínkami pro ryby.

Na Obr. 4.1 je znázorněno schéma se základními veličinami a názvoslovím v bazénu rybního přechodu.



Obrázek 4.1: Ilustrační schéma

Pro rozšíření povědomí o tématu rybních přechodů je ve zbytku této práce představeno a navrženo celkem 8 variant, z čehož část vznikla z jednání mezi zástupci PVL, s.p., Komise pro rybní přechody při AOPK ČR a řešiteli výzkumu (katedra hydrotechniky Fakulty stavební ČVUT v Praze). Tento širší záběr variant bude sloužit pro ověření obecných hypotéz o vlivu rozmístění překážek na hydrauliku proudění.

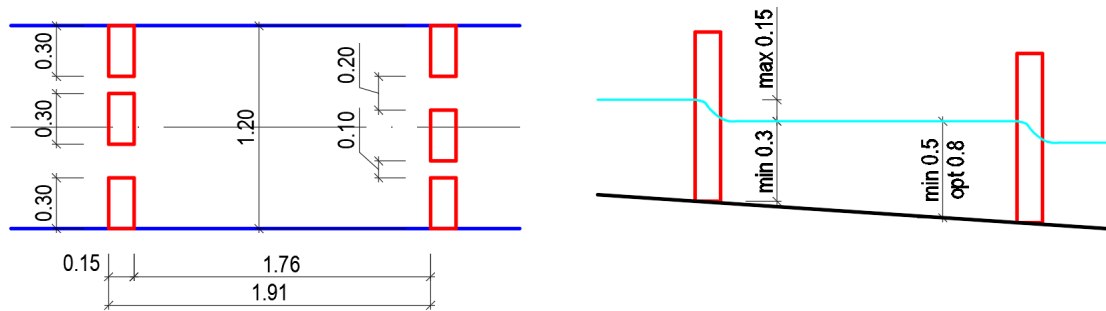
Z důvodu nutnosti veškeré návrhy ověřit na fyzikálním modelu, jsou tomu přizpůsobeny i matematické modely, které jsou proto v měřítku 1:1,5.

Vzhledem k velkému počtu simulací a počtu výstupů jsou graficky představeny varianty pouze pro sklon 1:15, neboť na něm lze lépe vyhodnotit výsledné parametry. Pro mírnější sklony se pak zpravidla mění jen kritické hodnoty, ale charakter proudění zůstává stejný a jsou proto vyhodnoceny pouze tabulárně.

Varianta 0

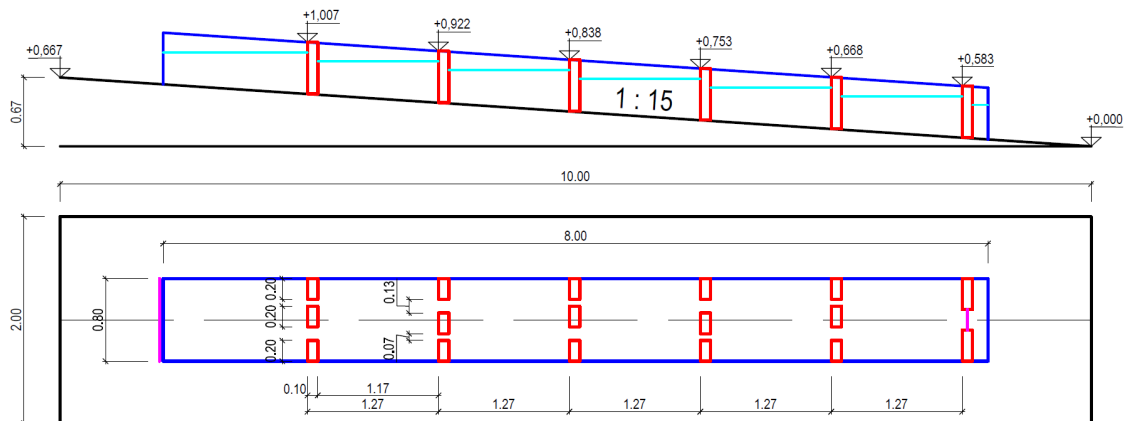
Pilotní varianta (Varianta 0) představuje referenční stav, který slouží pro porovnání dále navržených variant. Parametry jsou převzaty z normy TNV 75 2321. Tato varianta byla také využita k verifikaci matematického modelu s fyzikálním a k pochopení základních principů proudění v jednotlivých bazénech.

Na Obr. 4.2 je v měřítku 1:1 znázorněno základní schéma s navrženými rozměry a kritériálními hodnotami, a na Obr. 4.3 je geometrický model v měřítku 1:1,5 pro sklon 1:15.



Obrázek 4.2: Schéma: Varianta 0 - M1:1 - 1:15

Horní okrajová podmínka je nastavena na průtok 55 l/s (resp. 150 l/s ve skutečnosti). Pro ustálení hladin byla iteračním způsobem nakalibrována dolní okrajová podmínka, která ustálila hloubku vody v jednotlivých bazénech na 24 cm na modelu. Referenčním bodem je zde cca 3/4 bazénu v ose žlabu, kde je hladina již ustálena po deformaci od horní balvanité linie, ale ještě není ovlivněna strhávajícím proudem od navazujících překážek.



Obrázek 4.3: Schéma modelu: Varianta 0 - M1:1,5 - 1:15

Po provedených simulacích byly výsledky pro jednotlivé sklony vyhodnoceny tabulárně, viz. tab. 4.2 a pro sklon 1:15 i graficky (Obr. 4.4).

V tabulce níže jsou v závorce uvedeny modelové výsledky a přepočteny pro skutečnost. U rychlosti proudění jsou ve sloupci vyhodnoceny rychlosti jak pro malou štěrbinu (vlevo), tak pro velkou štěrbinu (vpravo). Vyhodnocovací profilové linie jsou vždy vedeny v ose velké (resp. malé) štěrbinu a pro porovnání hladin i v ose žlabu.

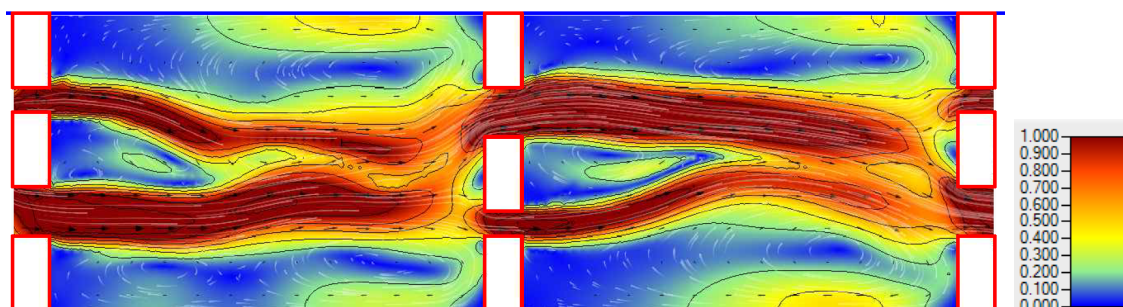
Tabulka 4.2: Výsledky Varianty 0 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,36 (0,24)	1,69 (1,4) ÷ 1,82 (1,5)	215
1:20	0,09 (0,06)	0,44 (0,29)	1,41 (1,2) ÷ 1,47 (1,2)	134
1:25	0,08 (0,05)	0,48 (0,32)	1,26 (1,0) ÷ 1,30 (1,1)	101

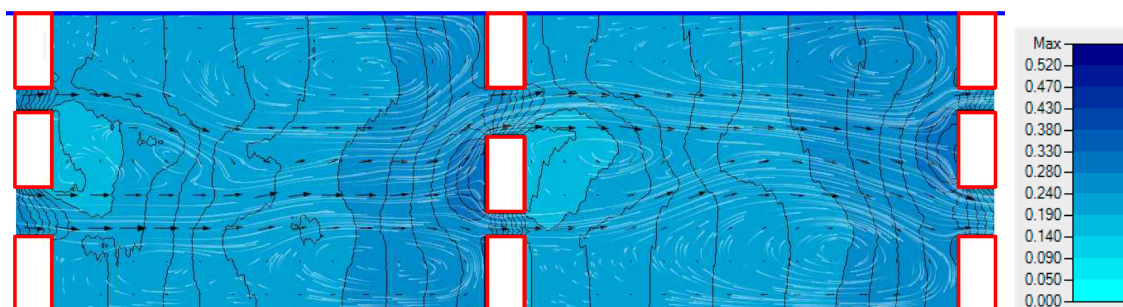
Jak výsledky naznačují je pilotní varianta při průtoku 150 l/s pro návrhové rychlosti a hloubky u takto strmých sklonů nevyhovující.

Předmětem optimalizace tedy bude modifikace této varianty tak, aby bylo možné rybí přechod využít i při strmějších sklonech a podpořili tak zkrácení potřebné délky a vyšší nákladů na realizaci.

Obrázek 4.4: Průběh rychlostí: Varianta 0 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$

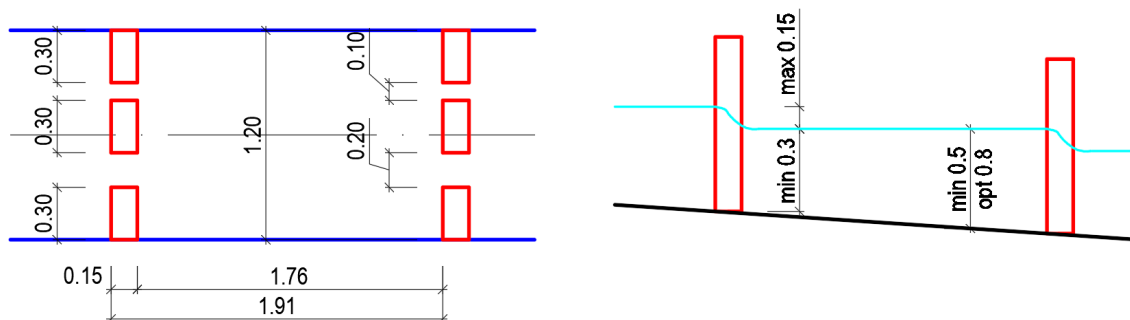


Obrázek 4.5: Průběh hloubek: Varianta 0 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



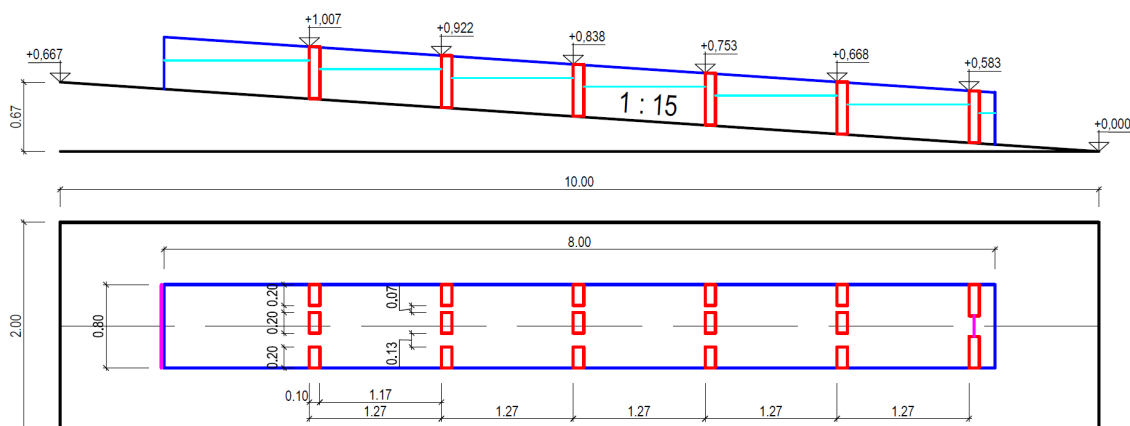
Varianta 1

První varianta má za cíl prověřit možnosti selektivní migrace pro pstruhovité a lososovité ryby, které vyžadují efektivní překonání příčné překážky. Jsou zde zvoleny dvě migrační cesty pro dvě výkonnostní skupiny, přičemž je navržena varianta s průběžnými mezerami mezi betonovými bloky. Mezery jsou dimenzovány dle normy TNV 75 2321, kdy menší má šířku 10 cm (tj. 6,7 cm na modelu) širší 20 cm (tj. 13,3 cm na modelu).



Obrázek 4.6: Schéma: Varianta 1 - M1:1 - 1:15

Pro simulaci byly stejně jako u předchozí varianty sestrojeny modely pro jednotlivé návrhové sklony a zkalibrovány pomocí dolní okrajové podmínky.



Obrázek 4.7: Schéma modelu: Varianta 1 - M1:1,5 - 1:15

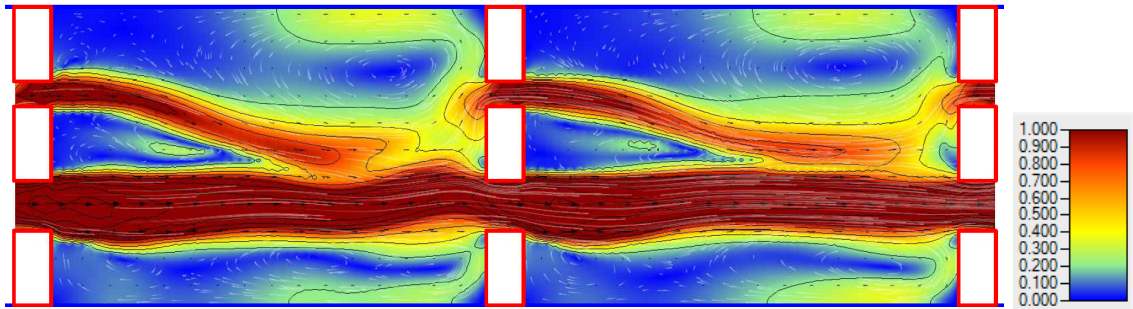
V následující tabulce 4.3 jsou znázorněny výsledky. Rychlosti jsou oproti pilotní variantě až o téměř 25 % větší. Vysoké rychlosti zapříčinily snížení hloubek, které tak zůstaly pod kritickou návrhovou hodnotu.

Kritické hodnoty rychlosti proudění se podobně jako u předchozí varianty vyskytují po celé délce bazénu. Překážka z pohledu migrace se tak pro ryby stává nejen při překonání přeřinaté části ve štěrbině, ale způsobuje problém po celé délce trati rybiho přechodu.

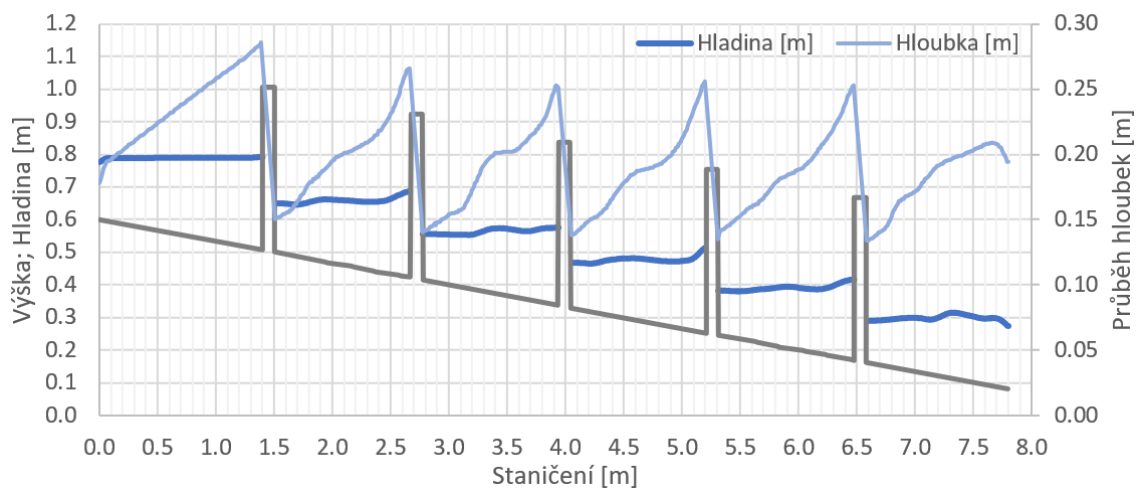
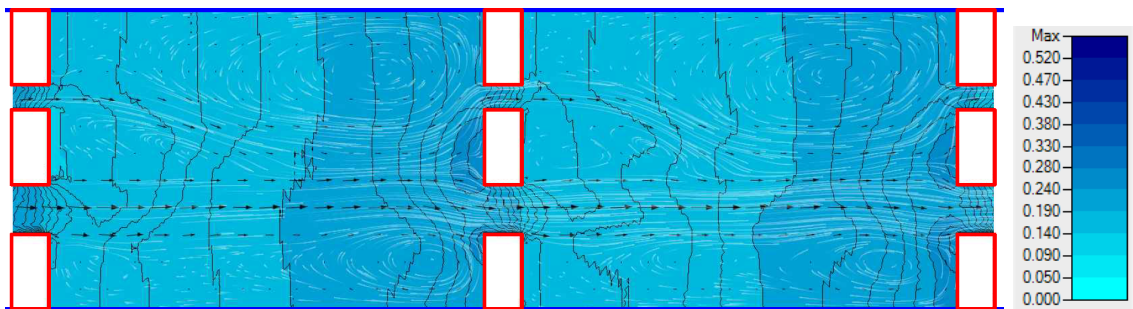
Tabulka 4.3: Výsledky Varianty 1 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,30 (0,20)	1,53 (1,3) ÷ 2,27 (1,9)	258
1:20	0,09 (0,06)	0,36 (0,24)	1,29 (1,1) ÷ 1,95 (1,6)	161
1:25	0,08 (0,05)	0,39 (0,26)	1,19 (1,0) ÷ 1,78 (1,5)	124

Průběh rychlostí: Varianta 1 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$

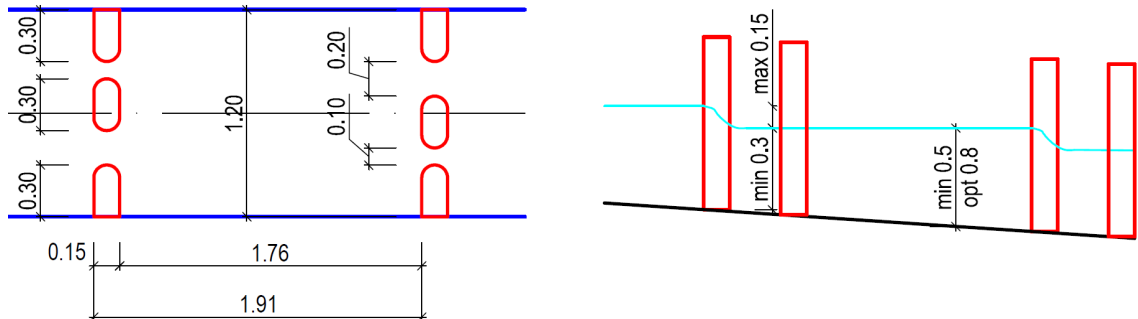


Průběh hladin a hloubek: Varianta 1 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



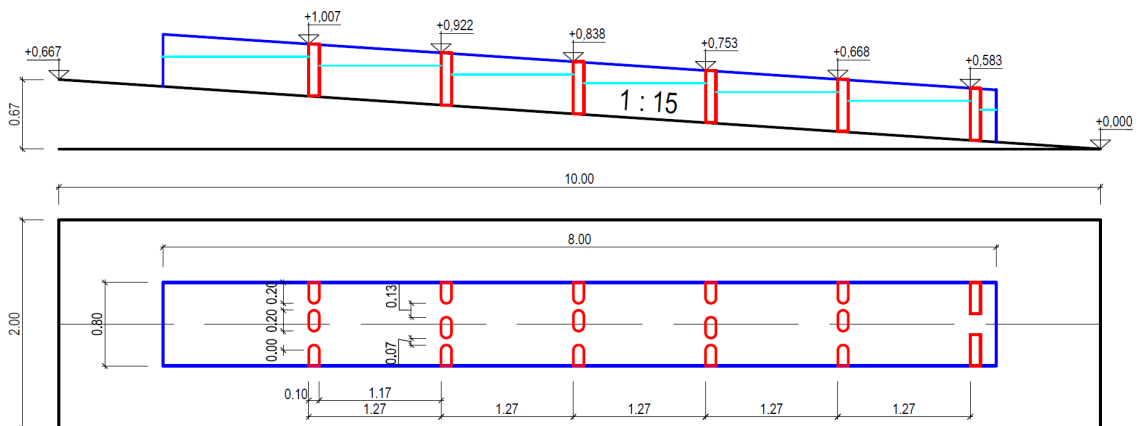
Varianta 2

Varianta 2 prověřuje zlepšení „náběhových“ tras z tůní do štěrbin pomocí výrazného zaoblení hran příčných kamenů. Tento tvar z pohledu hydrauliky vykazuje menší nátokové ztráty a lze předpokládat plynulejší proudění a tedy vyšší rychlosti.



Obrázek 4.8: Schéma: Varianta 2 - M1:1 - 1:15

Pro dostatečně podrobné segmenty tvarující modelovanou překážku do plynulé křivky, byl raster vygenerován v rozlišení desetiny milimetru. Geometrie je zobrazena na Obr. 4.9 níže.



Obrázek 4.9: Schéma modelu: Varianta 2 - M1:1,5 - 1:15

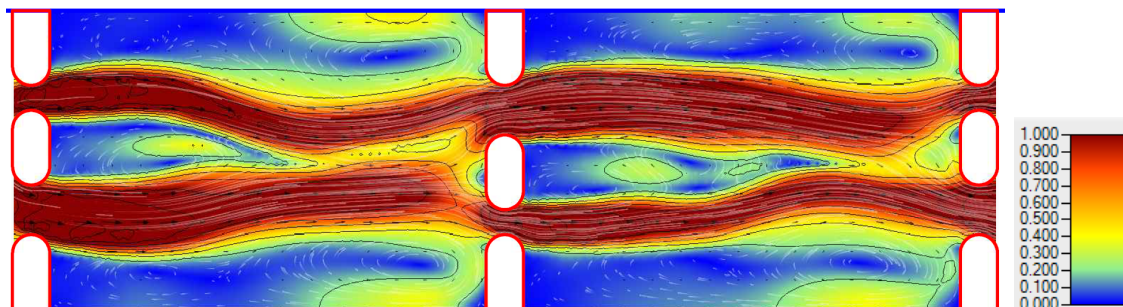
Výsledky potvrdily předpoklad vyšších rychlostí, které ve všech třech případech vycházejí nad doporučenými i mezními rychlostmi. S vyššími rychlostmi se vážou také menší hloubky, které také v žádném případě nesplňují minimální hodnoty v bazénu.

Tabulka 4.4: Výsledky Varianty 2 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)

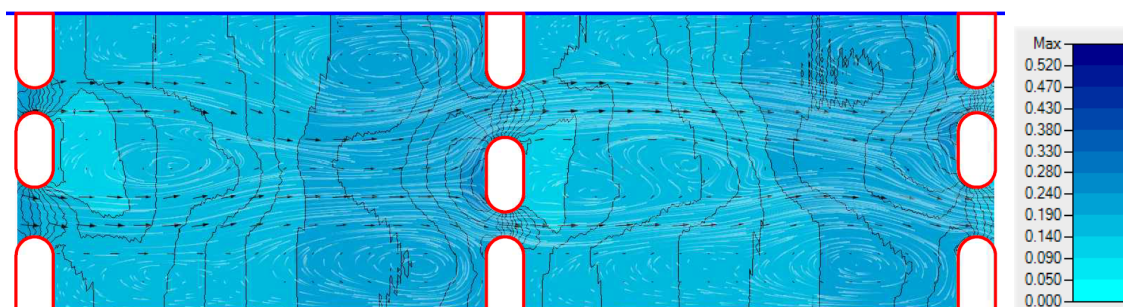
Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,32 (0,21)	1,91 (1,6) ÷ 1,86 (1,5)	246
1:20	0,09 (0,06)	0,35 (0,23)	1,69 (1,4) ÷ 1,58 (1,3)	168
1:25	0,08 (0,05)	0,39 (0,26)	1,53 (1,3) ÷ 1,42 (1,2)	124

Hlavní proudění, stejně jako u předchozí varianty, probíhá středem bazénu a tůně jsou tak vytvářeny při stěně žlabu RP. To při vysokých rychlostech vede k neúčinnosti po celé délce migrační trasy.

Průběh rychlostí: Varianta 2 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



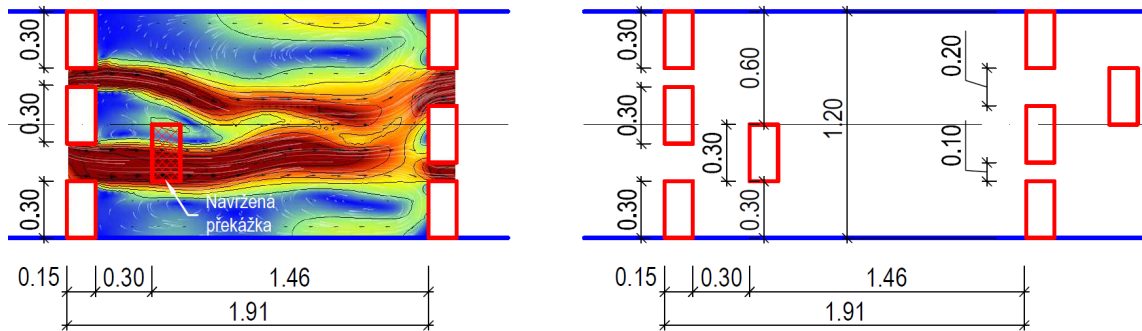
Průběh hladin a hloubek: Varianta 2 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



Varianta 3

Tato varianta doplňuje pilotní variantu, přičemž má za cíl rozdělit proud vody procházející velkou štěrbinou. Využívá k tomu přepážku ve vzdálenosti 30 cm (resp. 20 cm na modelu), aby se i více rozměrné ryby dokázaly dostatečně rozeplout a zároveň vyhnout této překážce. Šířky štěrbin v linii balvanů a další rozměry zůstaly zachované.

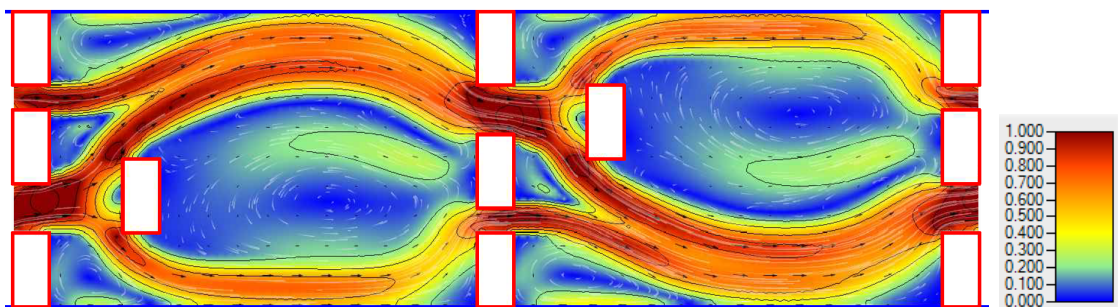
Na Obr. 4.10 vlevo je naznačeno rychlostní pole z varianty 0, pomocí něhož byla umístěna navržená překážka.



Obrázek 4.10: Schéma: Varianta 3 - M1:1 - 1:15

Překážka je umístěna více do středu žlabu, neboť prvotní simulace s kamenem na ose štěrbinu směřoval proud více do bazénu a koncentroval proud silně do migrační cesty malé štěrbinu. Proto po sérii úprav byl umístěn tak, že jedna hrana lícuje s hranou krajního kamene a druhá hrana s osou žlabu. Tato úprava vedla k přívětivějšímu rozptýlení hlavního proudu a snížení rychlosti proudění.

Průběh rychlostí: Varianta 3 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



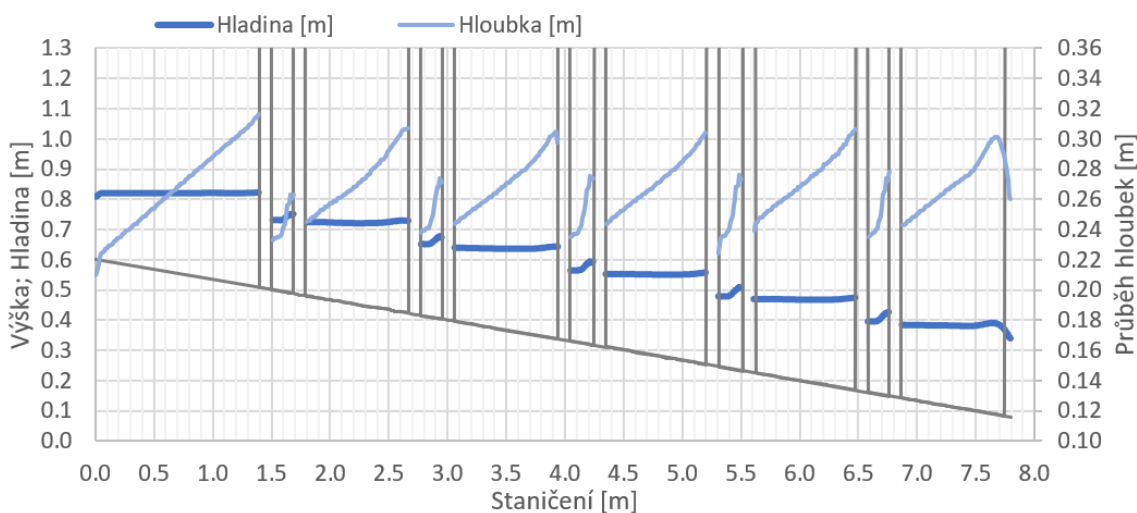
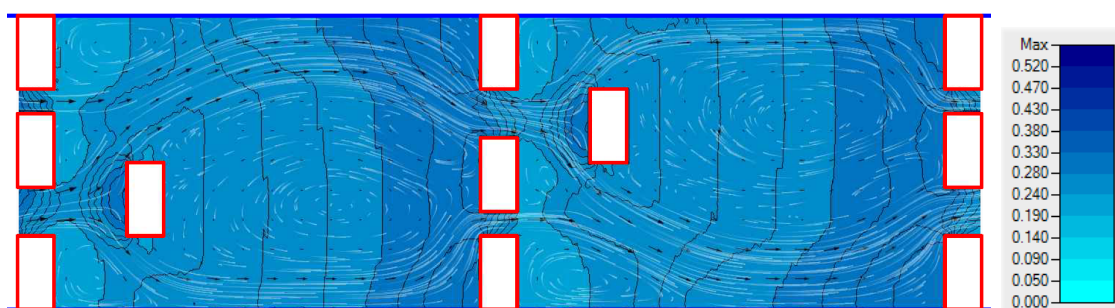
Na rozdíl od předchozích variant je migrační překážka v podobě kritických rychlostí více soustředěna do okolí štěrbinu a nikoli po celou délku bazénu. Proto i přes stále vysoké rychlosti proudění ($1,4 \div 1,6 \text{ m/s}$), lze uvažovat o tom, že rybí přechod se sklonem 1:15 může být např. v pstruhovém pásmu, kde se nacházejí silné druhy ryb, migračně průchodný. Z toho důvodu lze také opomenout nižší hloubku, která u pstruhového pásma nemusí být z pohledu diadromní migrace tak vysoká.

Tabulka 4.5: Výsledky Varianty 3 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,42 (0,28)	1,41 (1,2) ÷ 1,59 (1,3)	184
1:20	0,09 (0,06)	0,50 (0,33)	1,20 (1,0) ÷ 1,36 (1,1)	117
1:25	0,08 (0,05)	0,54 (0,36)	1,13 (0,9) ÷ 1,25 (1,0)	90

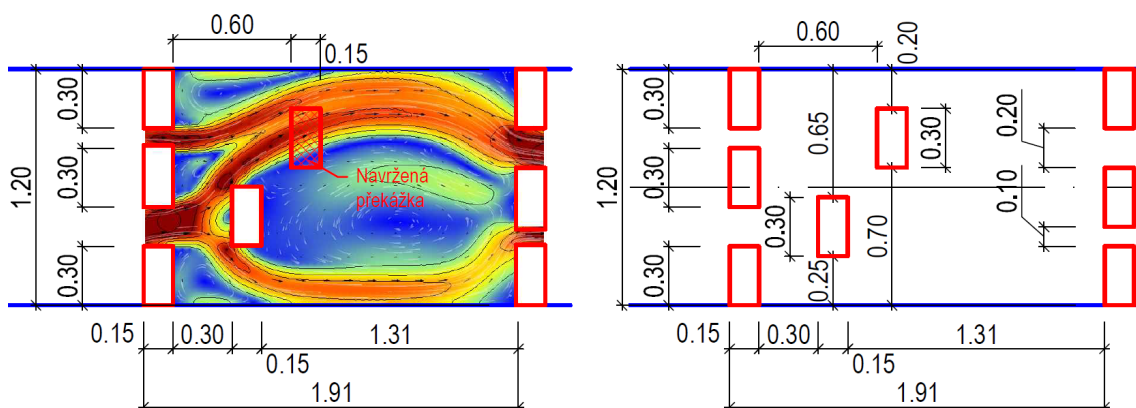
Výsledky u mírnějších sklonů jsou již přívětivější. Stále se však jedná o mezní hodnoty pro širší druhové spektrum. I přes to proudění vykazuje pozitivní průběh, kdy hlavní migrační trasy vedou u stěn, které ve skutečnosti částečně svou drsností tlumí energii vody. Uprostřed a za balvany vytváří tišiny a tůně, jenž ryby využívají po překonání přejezdných úseků k odpočinku.

Průběh hladin a hloubek: Varianta 3 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



Varianta 4

Čtvrtá varianta svou geometrií navazuje na předchozí variantu, která potvrdila předpoklad rozdělení hlavního proudu a utlumení síly pomocí přidaného deflektoru. Proto je zde navržena druhá překážka, která se snaží dále roztržít hlavní proud a snížit tak jeho energii.



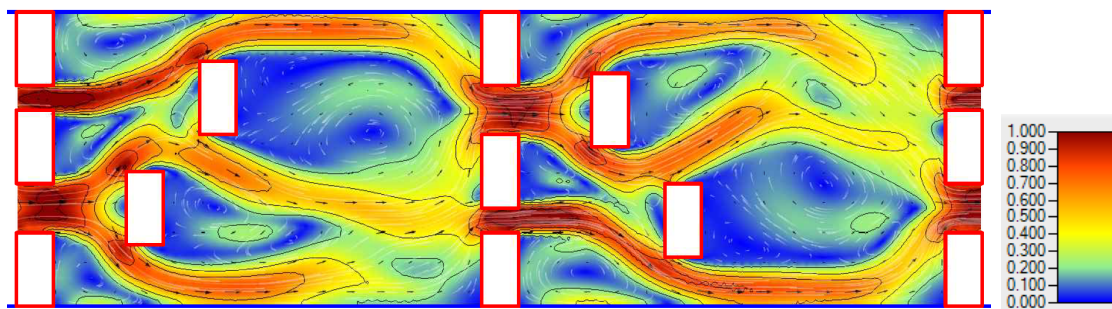
Obrázek 4.11: Schéma: Varianta 4 - M1:1 - 1:15

První balvan je na rozdíl od předchozí varianty umístěn do osy větší štěrbině ve vzdálenosti 30 cm (ve skutečnosti). Bylo tím docíleno poměrově lepšího rozdělení proudu pro nově navrženou překážku.

Simulace předpoklady potvrdila a jednotlivé proudy dále rozdělila, došlo tak k efektivnímu uklidnění proudové rychlosti, která se ve skutečnosti dále tlumí o stěny žlabu a po délce bazénu se hodnoty rychlosti sníží o více než 50 %. Tím je dosaženo zkrácení migračně kritického úseku pouze na přilehlé okolí štěrbině.

Vysoké rychlosti ve štěrbinách zde tedy vznikají pouze zúžením průtočného profilu, nikoliv proudem z výše položeného bazénu.

Průběh rychlostí: Varianta 4 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



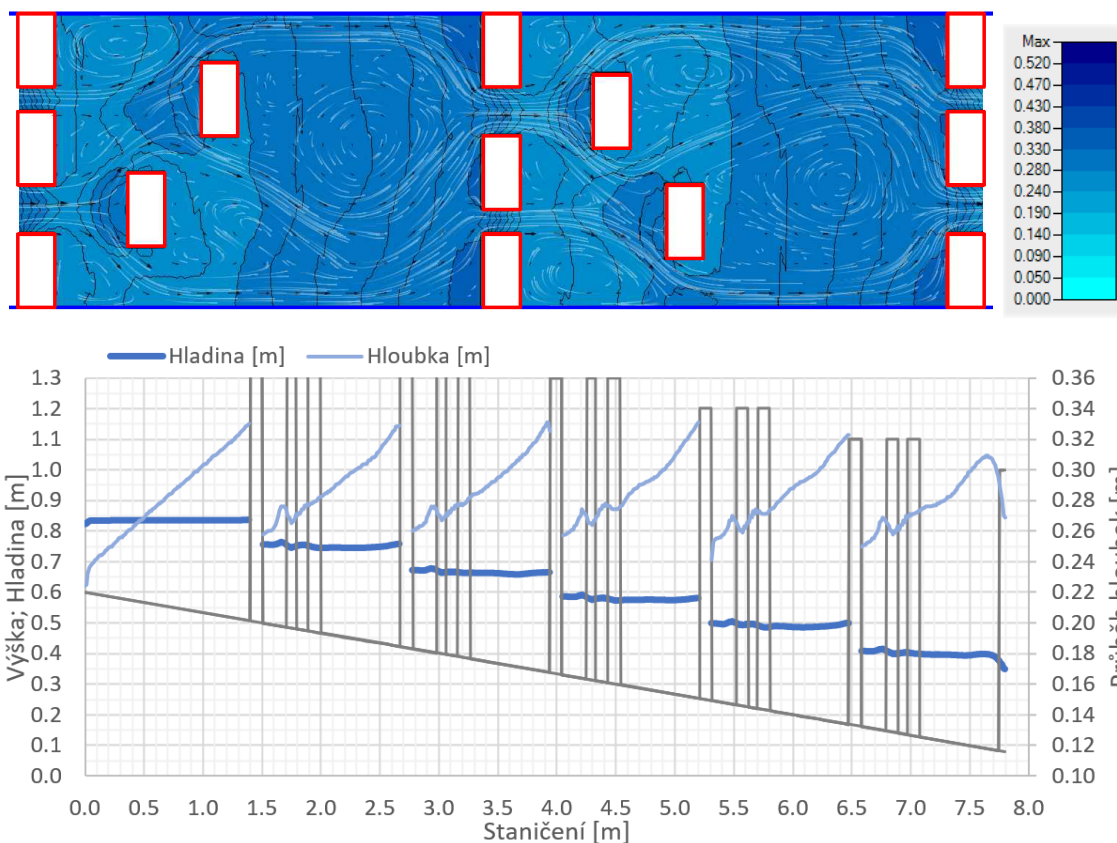
Níže jsou znázorněny tabulární výsledky s průběhem hladin a hloubek v rybím přechodu. Stejně jako u předchozí varianty, jsou rychlosti proudění u sklonu 1:15 nad mezní hodnotou.

Tabulka 4.6: Výsledky Varianty 4 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,48 (0,32)	1,47 (1,2) ÷ 1,24 (1,0)	161
1:20	0,09 (0,06)	0,53 (0,35)	1,21 (1,0) ÷ 1,14 (0,9)	111
1:25	0,08 (0,05)	0,59 (0,39)	1,11 (0,9) ÷ 1,00 (0,8)	83

Pro mírnější sklony je již tato varianta vyhovující pro všechny sledované veličiny.

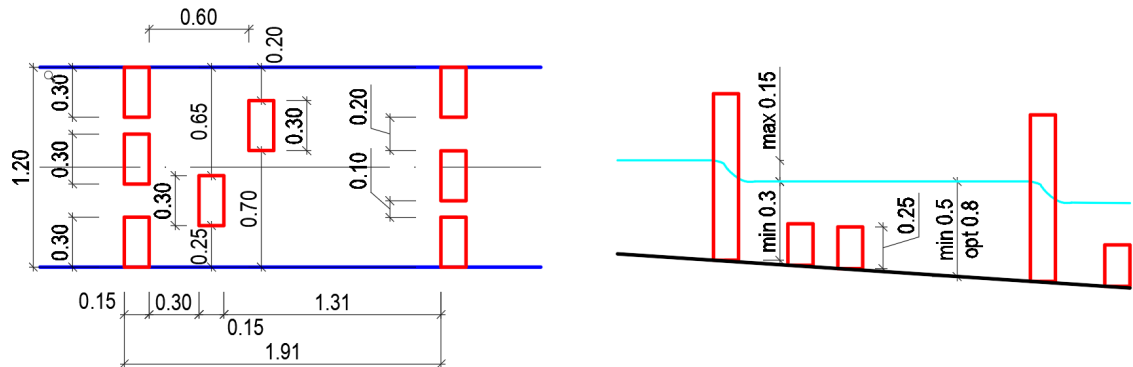
Obrázek 4.12: Průběh hladin a hloubek: Varianta 4 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



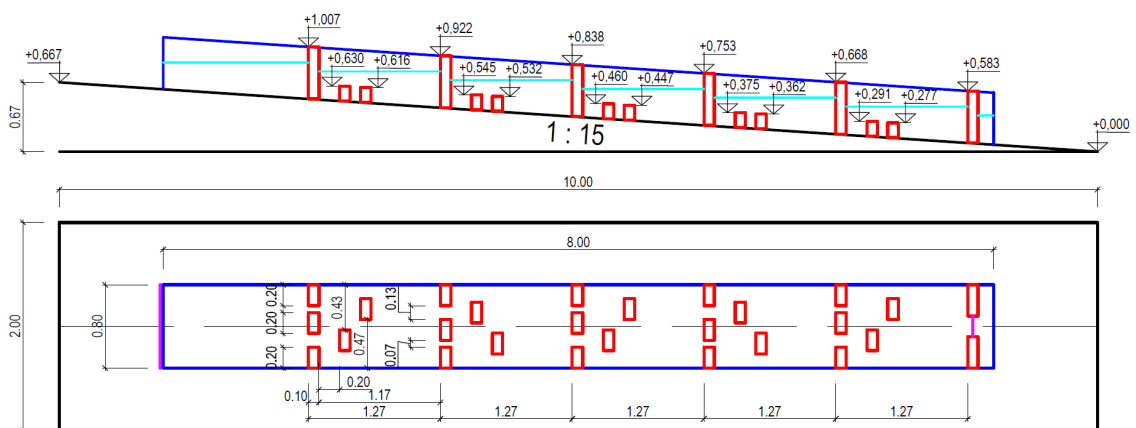
Na Obr. 4.12 lze pomocí „particle tracing“ sledovat celou řadu tišin, které podporují migrační účinnost rybiho přechodu.

Varianta 5

Tato varianta vychází z předpokladu a snahy docílit snížení vysokých vertikálních rychlostí za štěrbinou, které byly zjištěny při verifikačním měření na fyzikálním modelu (viz. str. 26). Proto se kameny umístěné v bazénu snížily na polovinu požadované minimální hloubky (25 cm) a v modelu jim byla nastavena příslušná výška (Obr. 4.14).



Obrázek 4.13: Schéma: Varianta 5 - M1:1 - 1:15



Obrázek 4.14: Schéma geometrie: Varianta 5 - M1:1,5 - 1:15

Je důležité si uvědomit, že zvolený matematický model k tomuto výpočtu není uzpůsoben. Svým charakterem uměle navyšuje rychlosti nad sníženými balvany, neboť průměruje rychlosti na zmenšeném profilu a je zde tedy nutností, provést toto měření na fyzikálním modelu.

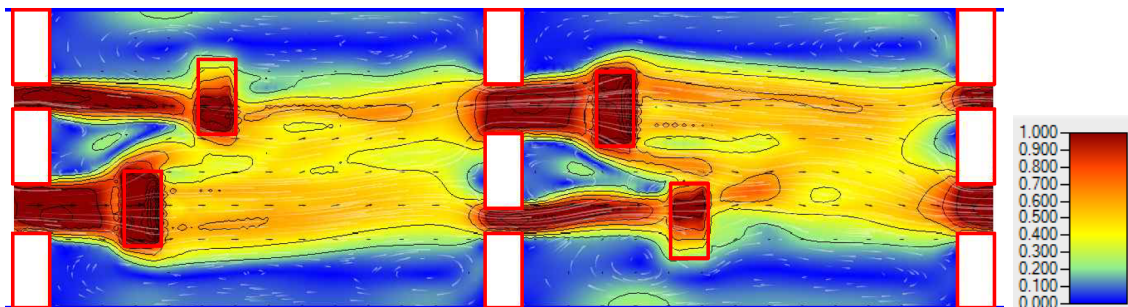
I přes to byla provedena simulace pro sklon 1:15, jejíž výstupy jsou znázorněny na následující straně.

U této varianty lze předpokládat podobné extrémní rychlosti jako u varianty 4, neboť dle verifikačních měření se za štěrbinou nachází výrazná vertikální složka rychlosti v_z , která by měla být ztlumena prvním kamenem. Průběhy rychlosti proudění v bazénu tak lze očekávat mírnější.

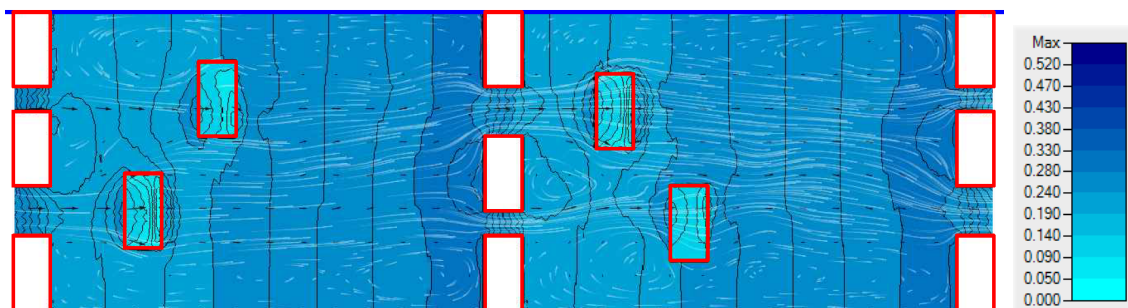
Tabulka 4.7: Výsledky Varianty 5 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,41 (0,27)	1,56 (1,3) ÷ 1,52 (1,2)	191

Průběh rychlostí: Varianta 5 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$

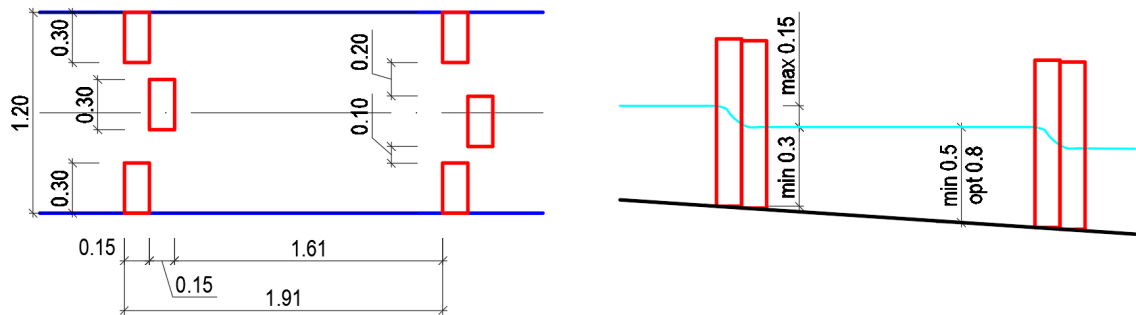


Průběh hladin a hloubek: Varianta 5 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



Varianta 6

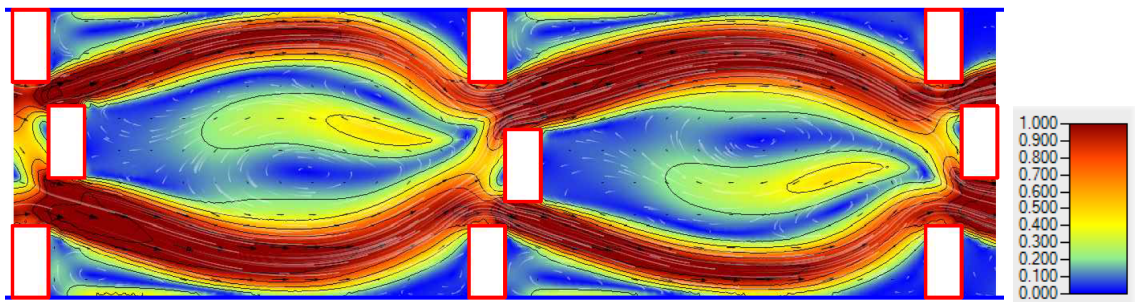
Cílem této varianty je vytvoření tůň hned za překážkou a rozvedení proudu více do stěn, kde je předpoklad jeho následného tlumení o stěny žlabu.



Obrázek 4.15: Schéma: Varianta 6 - M1:1 - 1:15

Střední balvan v linii byl odsazen o jeho tloušťku po směru proudění. Šířka balvanů i šterbin zůstala zachována.

Průběh rychlostí: Varianta 6 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



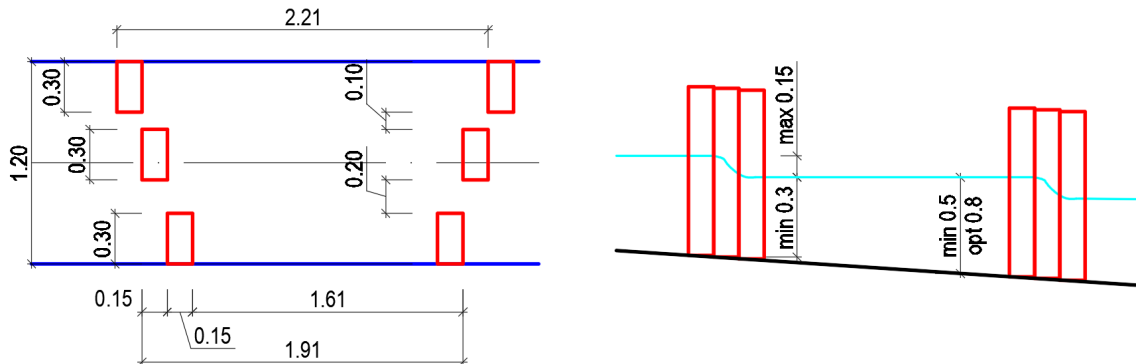
Výsledky potvrzují předpoklad rozptýlení proudu do přilehlých stěn, čímž vznikly dvě migrační cesty okolo rozsáhlé tůně uprostřed. Stejně jako u variant 0-2 vznikly migrační překážky v podobě silného proudu po celé délce bazénu. I přes vhodný tvar rozvedení proudění jsou u této varianty téměř veškeré veličiny nevyhovující i pro sklon 1:25. Lze tedy toto rozmístění využít podobně jako referenční varianty spíše u mírných sklonů.

Tabulka 4.8: Výsledky Varianty 6 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,32 (0,21)	1,81 (1,5) ÷ 1,58 (1,3)	246
1:20	0,09 (0,06)	0,39 (0,26)	1,51 (1,2) ÷ 1,37 (1,1)	149
1:25	0,08 (0,05)	0,42 (0,28)	1,43 (1,2) ÷ 1,25 (1,0)	115

Varianta 7

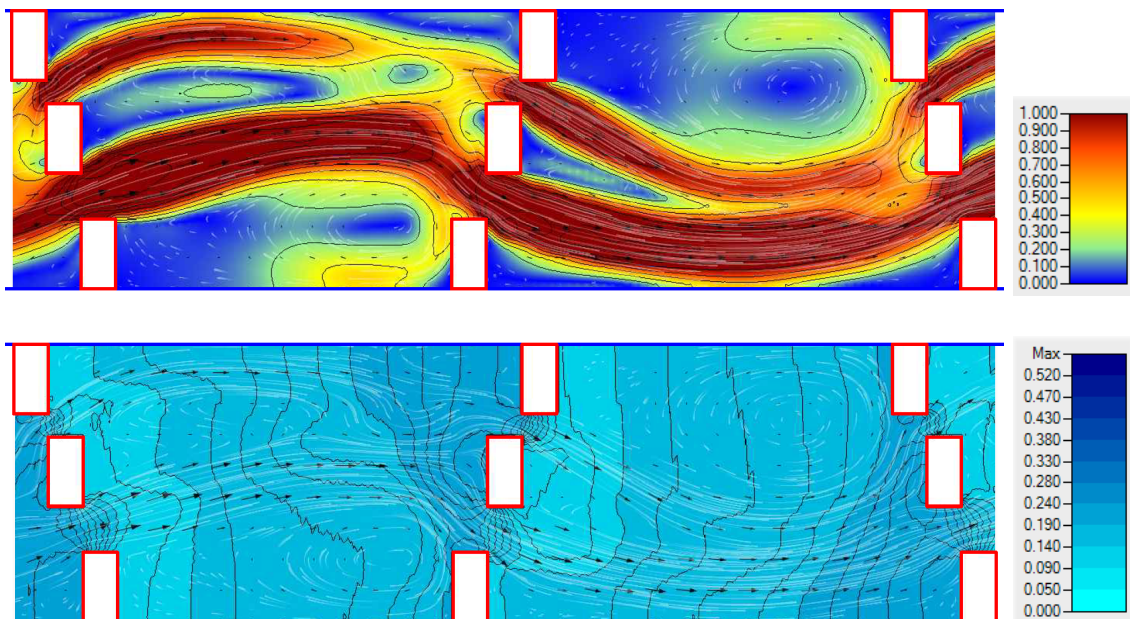
Předpoklad u varianty 7 je vedení dvou migračních cest, přičemž by u konkávního proudu byly rychlosti ztlumeny o stěny žlabu. Navržená geometrie by mohla působit jako zajímavý estetický prvek na vodním díle.



Obrázek 4.16: Schéma: Varianta 7 - M1:1 - 1:15

Balvany byly postupně odsazeny do šikmé linie, která s každým bazénem mění svůj směr. Je tím simulován meandrující charakter, který se v přirozeném toku běžně vyskytuje.

Průběh rychlostí: Varianta 7 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$

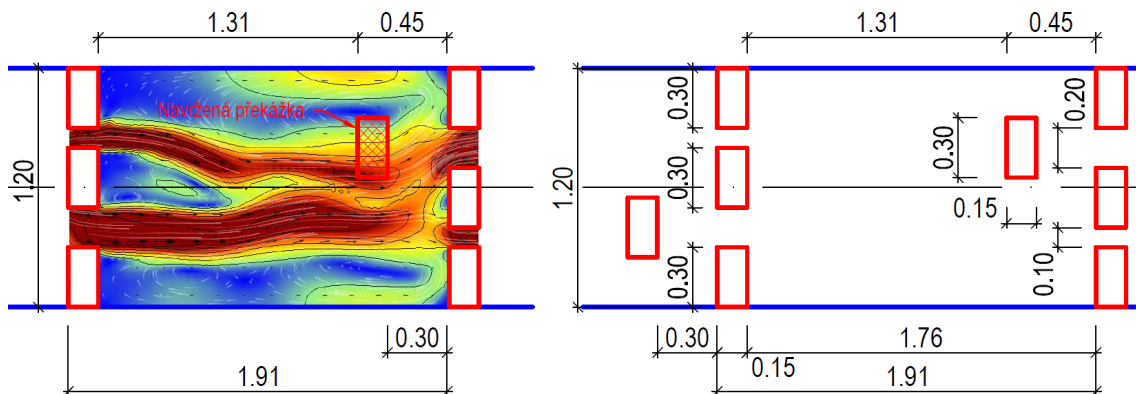


Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,27 (0,18)	1,92 (1,6) ÷ 2,12 (1,7)	287
1:20	0,09 (0,06)	0,30 (0,20)	1,42 (1,2) ÷ 1,86 (1,5)	194
1:25	0,08 (0,05)	0,33 (0,22)	1,31 (1,1) ÷ 1,76 (1,4)	147

Výsledky rychlostí, hloubek ani disipace energie výrazně nespĺňují mezní hodnoty.

Varianta 8

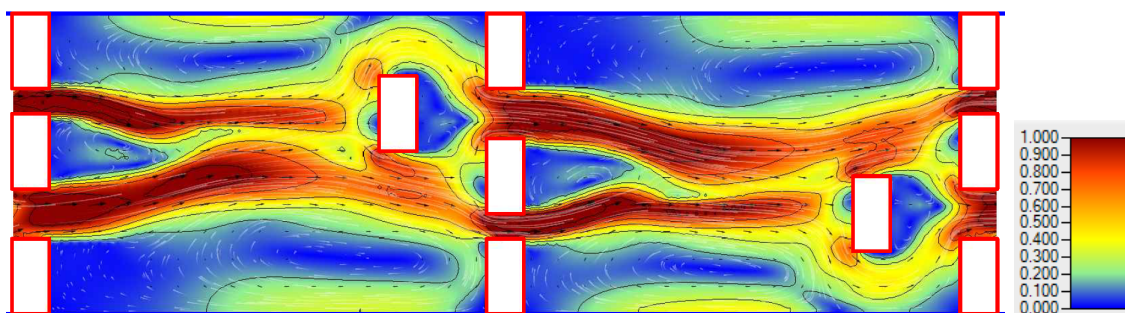
Poslední navrhovaná varianta vychází z principu ztlumení hlavních proudnic ještě před samotným nátokem do štěrbin. Rychlosti by tak vznikali pouze jako výsledek zúžení příčného profilu a nikoliv jako pokračování hlavního proudu proudící přes bazén.



Obrázek 4.17: Schéma: Varianta 8 - M1:1 - 1:15

Podobně jako u varianty 3 zde byla překážka předsazena ve vzdálenosti 30 cm (resp. 20 cm na modelu) na osu velké štěrbin.

Obrázek 4.18: Průběh rychlostí: Varianta 8 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55 \text{ l/s}$



Tabulka 4.9: Výsledky Varianty 8 při $Q_{skut} = 150 \text{ l/s}$ ($Q_{model} = 55 \text{ l/s}$)

Sklon	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
1:15	0,12 (0,08)	0,44 (0,29)	1,67 (1,4) ÷ 1,32 (1,1)	178
1:20	0,09 (0,06)	0,51 (0,34)	1,36 (1,1) ÷ 1,24 (1,0)	114
1:25	0,08 (0,05)	0,56 (0,37)	1,25 (1,0) ÷ 1,09 (0,9)	87

I přes vyšší hodnoty rychlostí, které vzešly z provedených simulací, lze tuto variantu hodnotit kladně. Utlumení hlavního proudu ještě před štěrbinou vede k propojení migračních cest do středu bazénu a vytvoření dvou velkých tůní po stranách bazénu, kde často hledají úkryt slabší jedinci. Další výhodou předsazeného kamene je vzniklý prostor v bazénu, který mohou ryby využít k delšímu rozplutí.

Shrnutí výsledků

Tato kapitola je věnována shrnutí výsledků, které vzešly z proběhlých simulací. V Tab. 4.10 jsou číselně znázorněny výsledné sledované hodnoty a jak je zde patrné, tak rozdíl hladin je vždy pro všechny bazény stejný. Důvodem je, že při správně nalkalibrovaném modelu se při stejných délkách bazénů a konstantním sklonu nemění spád a tento parametr tedy není pro účely dalšího porovnání již rozhodující.

Tabulka 4.10: Sumarizace výsledků - sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1

Sklon 1:15	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
Varianta 0	0,12	0,36	1,69 ÷ 1,81	215
Varianta 1	0,12	0,30	1,53 ÷ 2,27	258
Varianta 2	0,12	0,32	1,91 ÷ 1,86	246
Varianta 3	0,12	0,42	1,41 ÷ 1,59	184
Varianta 4	0,12	0,48	1,47 ÷ 1,24	161
Varianta 5	0,12	0,41	1,56 ÷ 1,52	191
Varianta 6	0,12	0,32	1,81 ÷ 1,58	246
Varianta 7	0,12	0,27	1,92 ÷ 2,12	287
Varianta 8	0,12	0,44	1,67 ÷ 1,32	178

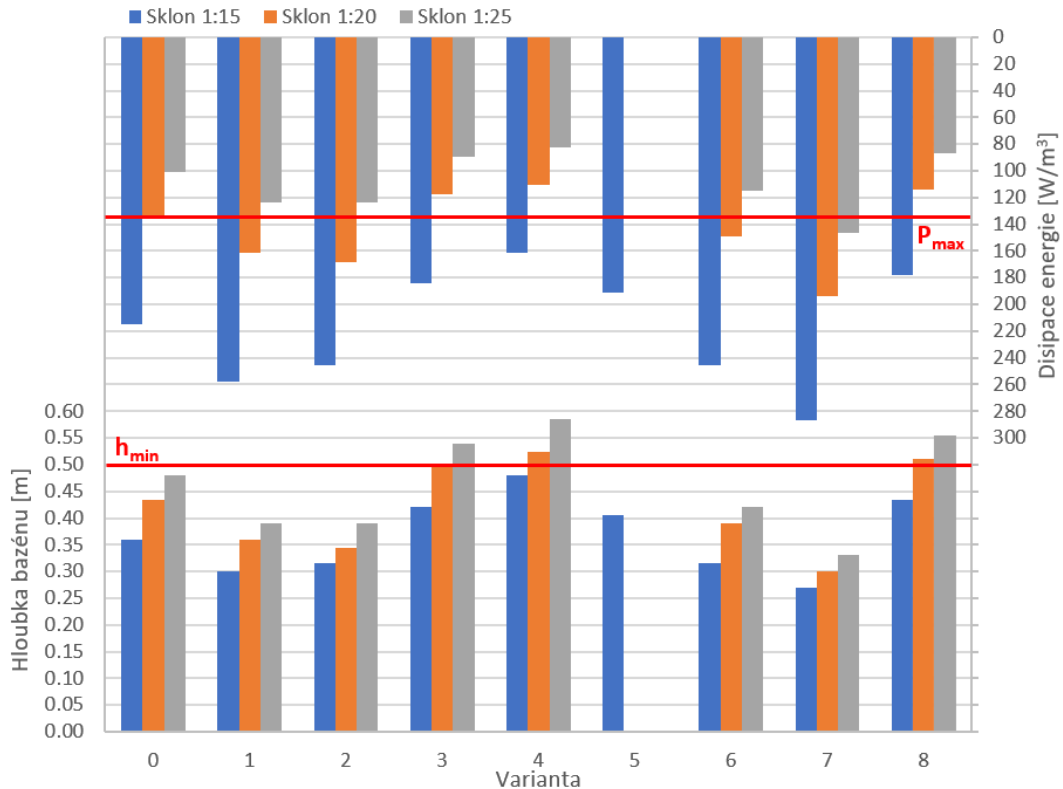
Sklon 1:20	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
Varianta 0	0,09	0,44	1,41 ÷ 1,47	134
Varianta 1	0,09	0,36	1,29 ÷ 1,95	161
Varianta 2	0,09	0,35	1,69 ÷ 1,58	168
Varianta 3	0,09	0,50	1,20 ÷ 1,36	117
Varianta 4	0,09	0,53	1,21 ÷ 1,14	111
Varianta 5	-	-	-	-
Varianta 6	0,09	0,39	1,51 ÷ 1,37	149
Varianta 7	0,09	0,30	1,42 ÷ 1,86	194
Varianta 8	0,09	0,51	1,36 ÷ 1,24	114

Sklon 1:25	Rozdíl hladin Δh [m]	Hloubka h [m]	Rychlost proudění v [m/s]	Disipace energie P [W/m^3]
Varianta 0	0,08	0,48	1,26 ÷ 1,30	101
Varianta 1	0,08	0,39	1,19 ÷ 1,78	124
Varianta 2	0,08	0,39	1,53 ÷ 1,42	124
Varianta 3	0,08	0,54	1,13 ÷ 1,25	90
Varianta 4	0,08	0,59	1,11 ÷ 1,00	83
Varianta 5	-	-	-	-
Varianta 6	0,08	0,42	1,43 ÷ 1,25	115
Varianta 7	0,08	0,33	1,31 ÷ 1,76	147
Varianta 8	0,08	0,56	1,25 ÷ 1,09	87

První veličinou, která je pro porovnání podstatná, je tedy až hloubka v jednotlivých bazénech. Vzhledem k tomu, že se hloubka po délce bazénu mění, musel být zvolen jeden referenční bod pro každý bazén, který byl následně vyhodnocován. Bod byl umístěn do osy žlabu v cca 3/4 délky bazénu. Zde je totiž hladina již ustálena od horní linie balvanů, ale ještě není strhávána od linie dolní.

Na Obr. 4.19 níže jsou pro jednotlivé varianty znázorněny parametry hloubky (dolní část) a disipace energie (horní část), která je na hloubku vázaná (viz. vzorec Disipace energie na str. 31).

Obrázek 4.19: Přehled hloubek pro sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1



Stejně jako z tabulky 4.10 na předchozí straně, je i zde patrné, že sklon 1:15 je již velmi strmý a u žádné z variant nebyla minimální hloubka dosažena. Nicméně i pro takto strmý sklon nejlépe vycházela varianta 4, která by byla vhodná k prověření na fyzikálním modelu.

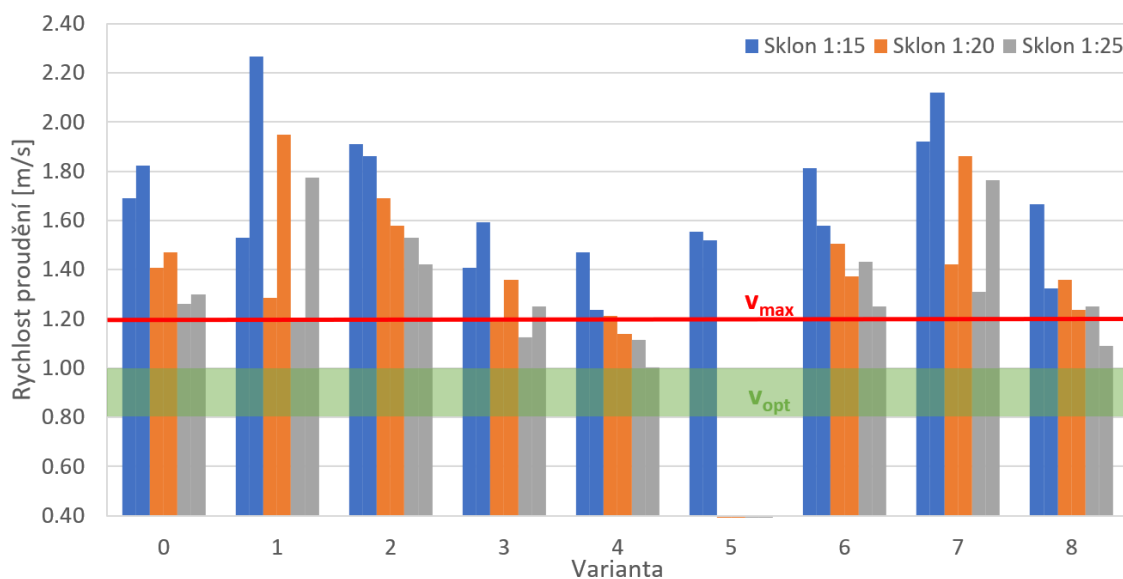
U zbylých sklonů je viditelný přínos přidání překážky před, nebo za balvanitou linii, neboť jediné varianty, které splňují mezní hodnoty jsou varianty 3, 4 a 8.

Dle normy TNV 75 2321 je doporučován sklon 1:20 a mírnější. Toto doporučení potvrzují i výsledky provedených simulací. Nicméně ani referenční varianta, která svou geometrií i rozměry z této normy přímo vychází, nesplňuje mezní hodnoty hladin ani pro sklon mírnější. Proto ač se varianty 3, 4 a 8 pohybují těsně nad mezní hodnotou, je zde oproti technickým doporučením výrazné zlepšení.

Téměř totožné výsledky jsou zobrazeny na Obr. 4.20 níže, který znázorňuje průběh rychlostí u jednotlivých variant a sklonů. Mezní rychlosti jsou u sklonu 1:15 překročeny ve všech variantách, vč. referenční.

Pro doporučený sklon nejlépe opět vycházejí varianty 3, 4 a 8, které koncentrovaný proud za štěrbinou rozdělí a zavzdújí hladinu v bazénu.

Obrázek 4.20: Přehled rychlostí pro sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1



I přes několik různých variant, mají všechny podobné, dva základní charaktery proudění. Jedna skupina soustřeďuje hlavní proud do středu bazénu a vytváří tak tůně po stranách, u stěn žlabu, kde se nejčastěji vyskytují drobnější ryby, protože zde pociťují větší pocit bezpečí. Hlavní proudy ve středu pak umožňují diadromním rybám, migrující stovky kilometrů, efektivněji a rychleji překonat migrační překážku.

Druhá skupina je charakterizována rozdělením proudění více do stěn žlabu a vytvoření tůní uprostřed bazénu. To vede k výraznému ztlumení maximálních rychlostí a napomáhá vzdout hladinu v bazénu. Tato skupina (var. 3, 4 a 8)¹ tak má předpoklad využití od širšího spektra ryb a vodních živočichů.

Doporučení

Dle výsledků se jako nejvhodnější k dalšímu prověření jeví varianty 3, 4 a 8, neboť dle numerických výsledků u mírnějších sklonů jako jediné splňují mezní hodnoty. Při dalším potenciálním výzkumu by bylo vhodné z těchto variant vycházet a zaměřit se více na optimalizaci umístění překážky.

Nicméně i přes nevyhovující výsledky, by bylo vhodné na fyzikálním modelu prověřit varianty 1 a 7. Ty totiž splňují jeden z možných požadavků na dvě migračně výkonnostní cesty. Jak bylo uvedeno v tab. 1.1 na straně 5, tak větší druhy ryb překonají i rychlosti přesahující 2 m/s. V tom případě by se u těchto variant jednalo již o selektivní rybí přechod.

¹Varianta 5 zde není uvedena, protože model nedokáže dostatečně popsat průběh proudění.

Závěr

Předmětem této diplomové práce byla optimalizace technického rybího přechodu. Motivace k tomuto tématu vzešla na základě podnětu státního podniku Povodí Vltavy. Ten se jako správce a zhotovitel těchto VD ve fázi přípravy stavby často setkává s negativními stanovisky vydané dotčenými orgány hájící zájmy životního prostředí. Je to zapříčiněno hlavně nedostatkem nebo nesjednocením informací, které o problematice rybích přechodů u nás máme.

Výstavba rybích přechodů je často spojena s rekonstrukcí vodních děl, které postupem času rozdělili celky vodních toků do malých, migračně neprostupných, fragmentů. Řešení této defragmentace se věnuje *Koncepce zprůchodnění říční sítě ČR* [14] vymezující migračně významné koridory.

Pro potřeby této diplomové práce proběhla rozsáhlá rešerše této koncepce shrnující VD, které jsou do budoucna potřebné migračně zprůchodnit, vč. zmapování jejich průtokových možností potřebných pro případný rybí přechod.

Na úvod práce byly představeny druhy migrací, které se u nás běžně vyskytují. Každá totiž přináší jiné požadavky na geometrii rybího přechodu, neboť diadromní druhy (např. pstruh obecný) budou vyžadovat efektivní překonání příčné překážky ve vodním toku. Naopak např. vranka obecná bude vyžadovat velké drsnosti u dna, kudy se může bezpečně pohybovat v rámci denních migrací.

Za účelem získání návrhových rychlostí proběhla rešerše tuzemské a zahraniční literatury, která se této problematice věnuje. Česká norma TNV 75 2321 představuje základní data o výkonosti specifických druhů ryb, které lze velmi dobře využít pro selektivní rybí přechody.

Tento výzkum ale má přinést poznatky pro druhově a velikostně neselektivní rybí společenstva. Proto proběhla jednání se zástupci státního podniku Povodí Vltavy a členy Komise pro rybí přechody při AOPK ČR, ze kterých vzešly obecné předpoklady na migrační výkonnost širšího druhové spektra ryb. Za optimální návrhové hodnoty tak byly převzaty rychlosti 0,8 - 1,0 m/s, přičemž lze předpokládat mezní rychlost proudění až 1,2 m/s.

Pro ověření a pochopení principů proudění v trati rybího přechodu byly pomocí volně dostupného softwaru HEC-RAS 2D provedeny matematické simulace. Geometrie byla postupně zpracovaná v programu AutoCAD Civil 3D a ArcMap.

Pro ověření matematických výsledků byl v hydrotechnické laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze sestaven fyzikální model.

Na základě proběhlé rešerše vodnatosti migrační koridorů a s ohlednutím na průtokové možnosti fyzikálního žlabu bylo pomocí Froudova zákona modelové podobnosti přiřazeno každému toku příslušné měřítko. Na základě toho pak byly jak fyzikální, tak matematické modely sestaveny v měřítku 1:1,5.

Verifikační měření proběhla s využitím velmi přesné ADV sondy, která v místech daných měřicí sítí změřila složky rychlosti ve všech třech směrech. Z výsledků byly výrazné vertikální složky rychlosti, které vznikají přímo za štěrbinou. Verifikace tak ověřila, že matematický 2D nelze využít pro samostatné modelování, ale lze ho velmi dobře využít pro operativní změnu geometrie, neboť velmi dobře popisuje směry hlavních proudění. Dále velmi dobře zachycuje extrémní rychlosti proudící ve štěrbině.

Při verifikaci proběhlo také ověření, zda má tloušťka balvanů výrazný vliv na proudění. Pro možnosti balvanů zkrátit z původního předpokládaného rozměru 30x30 cm proběhla krátká rešerše norem zabývající se betonovými konstrukcemi. Na základě této rešerše lze po technické stránce rozměry balvanu zkrátit na 30x15 cm. Tím se nejen prodlouží délka bazénu, kde se může proud lépe utlumit, ale vznikne tak i menší migrační překážka mezi balvanů.

K optimalizaci byly zvoleny sklony 1:15, 1:20 a 1:25, které vzešly ze zmíněných jednání. Jedná se o maximální sklony, které už bývají v praxi problematické. Na základě doporučení normy TNV 75 2321 byla sestavena referenční varianta. Ta po provedených simulacích nesplnila mezní kritéria pro širší druhého spektrum ryb. V návaznosti na tyto výsledky bylo navrženo a ověřeno celkem 8 variant.

První varianta měla prověřit možnosti dvou migračních cest pro selektivní pstruhové pásmo. Výsledné hodnoty sice nesplňují zadaná kritéria, nicméně ji lze k dalšímu výzkumu doporučit, neboť předmět jejího návrhu splnila.

Varianty 3, 4 a 8 doplňují referenční variantu o přidanou překážku, která velmi pozitivně ovlivnila rychlosti proudění a přispěla ke vzduť hladiny v bazénu. Tyto varianty přinesly nejlepší výsledky a je proto vhodné na ně v dalším výzkumu navázat.

Celkem bylo tedy ověřeno 9 variant, jejichž výsledky v zásadě přinesly dva základní charakteristiky proudění. První byl zmíněn u variant 3 a 4, které přidanou překážkou za štěrbinu rozdělí hlavní proudění, čímž přispějí k pozitivním výsledkům.

Druhý směr charakteru směřuje proud do středu bazénu a vytváří u stěn žlabu rozsáhlé tůně, které mohou ryby lépe využít k úkrytu a odpočinku.

I přes to, že se nepodařilo připravit variantu, která zajistí migrační účinnost i pro 1:15, přinesly některé varianty výrazné zlepšení oproti doporučovaným a běžně navrhovaným hodnotám.

Výsledky této práce budou sloužit jako základní podklad pro paralelně řešený výzkum zabývající se touto problematikou. Navržené varianty pomocí matematických simulací budou ověřeny a dále optimalizovány na fyzikálním modelu. Závěry tak pomohou rozvinout dosavadní znalosti o tématu rybích přechodů a přenést do praxe nové poznatky vedoucí k efektivnímu a levnějšímu řešení.

Seznam obrázků

1.1	Schéma vymezení prioritních koridorů (Zdroj: [14])	7
1.2	Schéma přírodě blízkého RP - Obtokové koryto (Zdroj: [20] a [16]) . .	8
1.3	Schéma dnové peřeje (vlevo) a migrační rampy (vpravo) (Zdroj: [16])	9
1.4	Schéma technického RP - Štěrbinový s jednou štěrbinou (vlevo) a dvo- jitou (vpravo) (Zdroj: [15] a [20])	10
1.5	Schéma technického RP - Žlabový s přepážkami z kamenů (Zdroj: [15]) a RPI na jezu Řevnice.	10
2.1	Schéma Lagrangeovy metody (vlevo) a Eulerovy metody (vpravo) . .	14
2.2	Schéma vertikálních veličin [Zdroj: [25]]	15
2.3	Porovnání výpočtu pomocí SWE (vlevo) a difuzní vlny (vpravo) . . .	16
2.4	Geometrie modelu rybího přechodu - AutoCAD Civil 3D	17
2.5	Geometrie modelu rybího přechodu - HEC-RAS	17
2.6	Sklopný žlab v hydrotechnické laboratoři ČVUT v Praze	21
2.7	Návrh modelu v měřítku 1:1,5	22
2.8	Fyzikální model v hydrotechnické laboratoři ČVUT v Praze	22
2.9	Nastavení horní okrajové podmínky (vlevo) a dolní okrajové pod- mínky (vpravo)	23
2.10	Schéma ADV sondy (vlevo) a schéma směru signálů (vlevo) (Zdroj: Nor- tek ADV Manual)	24
2.11	Měřicí síť	24
2.12	Výsledky měření na fyzikálním modelu 15 cm nade dnem (vlevo) a 5 cm nade dnem (vpravo)	25
2.13	Výsledky z matematického modelu	25
2.14	Rozložení rychlosti po svislici	26
2.15	Zavzdušnění proudu těsně za štěrbinou	26

3.1	Porovnání vlivu velikosti balvanů na proudění	29
4.1	Ilustrační schéma	32
4.2	Schéma: Varianta 0 - M1:1 - 1:15	33
4.3	Schéma modelu: Varianta 0 - M1:1,5 - 1:15	33
4.4	Průběh rychlostí: Varianta 0 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55$ l/s	34
4.5	Průběh hloubek: Varianta 0 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55$ l/s	34
4.6	Schéma: Varianta 1 - M1:1 - 1:15	35
4.7	Schéma modelu: Varianta 1 - M1:1,5 - 1:15	35
4.8	Schéma: Varianta 2 - M1:1 - 1:15	37
4.9	Schéma modelu: Varianta 2 - M1:1,5 - 1:15	37
4.10	Schéma: Varianta 3 - M1:1 - 1:15	39
4.11	Schéma: Varianta 4 - M1:1 - 1:15	41
4.12	Průběh hladin a hloubek: Varianta 4 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55$ l/s	42
4.13	Schéma: Varianta 5 - M1:1 - 1:15	43
4.14	Schéma geometrie: Varianta 5 - M1:1,5 - 1:15	43
4.15	Schéma: Varianta 6 - M1:1 - 1:15	45
4.16	Schéma: Varianta 7 - M1:1 - 1:15	46
4.17	Schéma: Varianta 8 - M1:1 - 1:15	47
4.18	Průběh rychlostí: Varianta 8 - M1:1,5 - $Q_{model} = 55$ l/s	47
4.19	Přehled hloubek pro sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1	49
4.20	Přehled rychlostí pro sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1	50

Seznam tabulek

1.1	Hodnoty migrační výkonosti některých druhů ryb (Zdroj: [15])	5
2.1	Rozměry pro variantu 0 a jejich přepoččet pro měřítko 1:1,5	17
2.2	Hodnoty minimálních průtoků v RP odvozené z Q_{355d} [15].	20
2.3	Vybrané vodní toky vymezené Konceptí zprůchodnění říční sítě	21
4.1	Souhrnný přehled základních veličin a jejich přepoččet pro měřítko 1:1,5	31
4.2	Výsledky Varianty 0 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	34
4.3	Výsledky Varianty 1 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	36
4.4	Výsledky Varianty 2 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	37
4.5	Výsledky Varianty 3 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	40
4.6	Výsledky Varianty 4 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	42
4.7	Výsledky Varianty 5 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	44
4.8	Výsledky Varianty 6 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	45
4.9	Výsledky Varianty 8 při $Q_{skut} = 150$ l/s ($Q_{model} = 55$ l/s)	47
4.10	Sumarizace výsledků - sklony 1:15, 1:20 a 1:25 - M1:1	48

Literatura

Tuzemská literatura

- [1] AOPK ČR. *Sborník semináře zprůchodnění migračních překážek vodních toků*. Praha: AOPK ČR, 2014.
- [2] ČÁBELKA, Jaroslav a Pavel GABRIEL. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice: Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti*. Praha: Československá akademie věd, 1987.
- [3] Sweco Hydroprojekt a.s. *ČSN 73 1208, Navrhování betonových konstrukcí vodohospodářských objektů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [4] Sweco Hydroprojekt a.s. *ČSN P 752323, Zajištění poproudových migrací ve vodních tocích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [5] FOŠUMPAUR, Pavel a kol. *Hydraulický model pro optimalizaci plavebních podmínek v okolí zdymadel na Labsko-ultavské vodní cestě - technická dokumentace*. Praha: ČVUT v Praze, 2022.
- [6] FOŠUMPAUR, Pavel. *Kombinace numerického a fyzikálního modelování ve výzkumu vodních staveb*. Praha: ČVUT v Praze, 2010. ISBN 978-80-01-04562-6.
- [7] GABRIEL, Pavel. *Jezy*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [8] HARTVICH, Petr. *Hlavní typy rybích přechodů a jejich biotechnické funkce*. Vodňany: Výzkumný ústav rybářský a hydrobiologický JU se sídlem ve Vodňanech, 1997. ISBN 80-85887-17-7
- [9] KOLÁŘ, Václav a kol. *Hydraulika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [10] MATOUŠEK, Václav. *Přednáška HY3V - Neustálené proudění v korytech*.
- [11] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: FAST VUT v Brně, 1997.

- [12] SLAVÍK, Ondřej a kol. *Metodický postup na zlepšení migrační průchodnosti příčných překážek ve vodních tocích ČR*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012. ISBN 978-80-7212-581-4.
- [13] SLAVÍK, Ondřej a kol. *Migrace ryb, rybí přechody a způsob jejich testování: Metodický postup pro návrh, realizaci a možnosti testování funkce rybích přechodů pro žadatele OPŽP*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012. ISBN 978-80-7212-580-7.
- [14] SLAVÍKOVÁ, Alena a kol. *Koncepce zprůchodnění říční sítě - aktualizace 2020*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2009.
- [15] HYDROPROJEKT CZ a.s. *TNV 752321 Zprůchodňování migračních bariér rybími přechody*. Praha: Sweco Hydroprojekt a.s., Centrum technické normalizace, 2011.
- [16] VRÁNA, Karel a kol. *Standardy péče o přírodu a krajinu - rybí přechody*. Praha: AOPK ČR, 2015.

Zahraniční literatura

- [17] CLAY, Charles. *Design of Fishways and Other Fish Facilities - second edition*. USA: CRS Press, INC., 1995. ISBN 1-56670-111-2.
- [18] CLOUGH, S. a kol. *Swimming Speeds in Fish: phase 1 - R&D Technical Report W2-026/TR1*. Bristol, Environment Agency, 2001. ISBN 1-85705-417-2.
- [19] CLOUGH, S. a kol. *Swimming Speeds in Fish: phase 2 - R&D Technical Report W2-049/TR1*. Bristol, Environment Agency, 2004. ISBN 1-85705-417-2.
- [20] FAO. *Fish passes - design, dimension and monitoring*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002. ISBN 92-5-104894-0.
- [21] HÄMMERLING, Mateusz. *The possibilities of using HEC-RAS software for modelling hydraulic conditions of water flow in the fish pass exemplified by the Pomilowo barrage on the Wieprza river*. Journal of Ecological Engineering, volume 17, pages 81-89, 2016. DOI 10.12911/22998993/62294.
- [22] KAMBOH, Shakeel Ahmed. *Simulation of 2D Saint-Venant equations in open channel by using MATLAB*. Journal of IT in Asia, volume 5, pages 15-22, 2015. DOI 10.33736/jita.47.2015.
- [23] LUCAS, C. Martyn. *Migration of Freshwater Fishes*. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001. ISBN 0-632-05754-8.
- [24] NOVAK, Pavel a kol. *Hydraulic structures fourth edition*. London and New York: Taylor & Francis, 2007. ISBN 0-203-96463-2.
- [25] WESSELING Pieter. *Principles of Computational Fluid Dynamics*. Heidelberg: Springer, 2001. ISBN 978-3-642-05146-3.