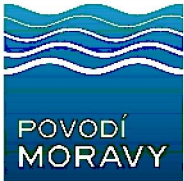


OBJEDNATEL:		
POVODÍ MORAVY, s.p. DŘEVAŘSKÁ 11 601 75 BRNO	RAZÍTKO	

ZHOTOVITEL:			
AQUATIS a.s. Botanická 834/56, 602 00 Brno HLAVNÍ INŽENÝR PROJEKTU: ING. TOMÁŠ ROTH	RAZÍTKO		AQUATIS a.s. Botanická 834/56 602 00 Brno Tel: +420 541 554 111 Fax: +420 541 211 205
		Č. ZAKÁZKY	3A14286.32.T01

VEDOUcí PROJEKTANT	ING. TOMÁŠ ROTH		
ZODPOVĚDNÝ PROJEKTANT	ING. TOMÁŠ STUDNIČKA Ph.D.		
VYPRACOVAL	ING. TOMÁŠ STUDNIČKA Ph.D.		
KONTROLOVAL	ING. TOMÁŠ ROTH		
NÁZEV OBJEKTU	PŘÍRODĚ BLÍZKÁ POP A REVITALIZACE ÚDOLNÍ NIVY HLAVNÍCH BRNĚNSKÝCH TOKŮ 3.část	DATUM	ZÁŘÍ 2015
		FORMÁT	–
		MĚŘÍTKO	–
		ÚČEL	STUDIE
		ČÍS. ZAKÁZKY	3A14286.32.T01
		ARCHIVNÍ ČÍS.	
NÁZEV PŘÍLOHY	3D MODEL RYBÍHO PŘECHODU A VODÁCKÉ PROPUSTI NA JEZU OBŘANY	ČÍS. SOUPRAVY	ČÍS. PŘÍLOHY K.4.

1 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU

1.1 Použitý software – FLOW-3D

Pro modelování proudění byl zvolen komerční softwarový balík FLOW-3D. Jedná se o CFD (Computational Fluid Dynamics) nástroj využívající matematické modelování k simulacím chování systémů, které zahrnují proudění tekutin, šíření tepla a jiné doplňující procesy. Program umožňuje třídímní (3D) řešení složitých fyzikálních problémů, které řeší metodou konečných objemů za použití RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) rovnic v definované výpočtové oblasti se specifikovanými okrajovými, respektive počátečními podmínkami.

Software FLOW-3D obsahuje řadu dalších volitelných modelů, které doplňují či modifikují Navier-Stokesovy rovnice. Při řešení hydraulických úloh se často používají modely turbulence, přenosu tepla, provzdušnění proudu, kavitace, eroze a depozice sedimentů, pohybu pevných těles či proudění v porézním prostředí.

Základem numerického modelu je vytvoření výpočetní mřížky, která se skládá z jednotlivých vzájemně propojených výpočetních buněk. Tyto buňky rozdělují celkový objem na dílčí výpočtové objemy. Výpočetní mřížka je výpočetním prostorem, který parametrizuje reálný fyzikální prostor. Program umožňuje podrobné zadávání fyzikálních podmínek modelu. Díky tomu je možné zohlednit v modelu pohyb sedimentu, přítomnost pohyblivých objektů, zdroje odběru nebo dotace v řešené oblasti, turbulentní proudění, fyzikální vlastnosti tekutin a další.

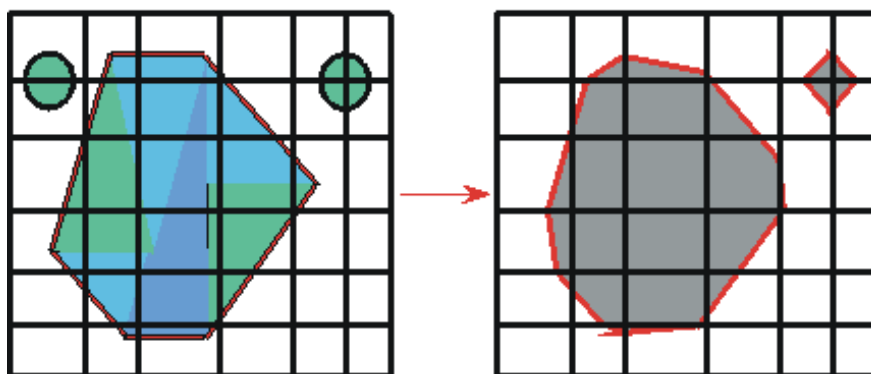
Silnou stránkou softwaru FLOW-3D je řešení úloh s prouděním o volné hladině. Při řešení tohoto typu úloh pro ustálené i neustálené proudění lze mít definovanu pouze jednu tekutinu (např. vodu), není nutné simulovat tekutiny dvě (např. voda + vzduch) jako v ostatních CFD softwarech. Pro modelování volné hladiny lze kromě metody VOF (Volume Of Fluid) použít metodu nazvanou TruVOF®. Tato metoda byla vyvinuta s cílem zmírnit nedostatky spojené se standardní metodou VOF, jako je nadměrné plnění či prázdnění výpočetní buňky v případě významného objemového toku ve všech třech směrech současně je časový krok blízký lokální hodnotě Courantova kritéria stability. V metodě TruVOF® je použit smíšený Lagrange-Eulerův přístup pro získání hodnot objemové frakce ve výpočetních buňkách v blízkosti volné hladiny. Další výhodou této metody je, že nevyžaduje tolik výpočetních buněk v blízkosti volné hladiny jako jiné metody řešení volné hladiny, což snižuje výpočetní čas v porovnání s ostatními metodami řešení volné hladiny.

V softwaru FLOW-3D lze použít pouze strukturovanou (rovnoměrnou či nerovnoměrnou) výpočetní mřížku (v kartézských nebo cylindrických souřadnicích). Pro modelování geometrie objektů je použita metoda FAVOR™ (Fractional Area-Volume Obstacle Representation). Tato metoda je založena na konceptu plošných a objemových frakcí na pravoúhlé strukturované výpočetní mřížce. Vliv plošných a objemových frakcí je implementován do rovnic proudění tekutin. Hodnoty plošných a objemových frakcí jsou závislé na hustotě použité výpočetní mřížky. Při preprocesingu jsou generovány plošné frakce pro každou stěnu výpočetní buňky. Nejprve se zjišťuje, které z rohů stěn výpočetních buněk leží uvnitř geometrie objektu. Pokud všechny čtyři rohy stěny výpočetní buňky leží uvnitř geometrie, je celá stěna ve výpočtu jako geometrie objektu. Podobně pokud všechny čtyři rohy stěny výpočetní buňky leží vně geometrie objektu, pak se předpokládá, že celá plocha stěny výpočetní buňky je mimo geometrii objektu a tedy touto stěnou může proudit řešená tekutina. Jsou-li některé rohy stěny buňky uvnitř geometrie a některé vně geometrie objektu, jsou zjišťovány průsečíky geometrie s hranami stěn buněk. Hodnota plošných frakcí je pak počítána z těchto průsečíků za předpokladu lineárních spojení mezi průsečíky ve stěně buňky. Pokud je hranice geometrie objektu uvnitř výpočetní zakřivena, vypočítaná hodnota plošné frakce bude zatížena chybou kvůli předpokladu lineárních spojení průsečíků. Vypočítané hodnoty plošných frakcí jsou tím přesnější čím je použitá velikost výpočetní buňky menší. Důsledkem použití metody FAVOR™ je, že geometrie objektu, která přesahuje stěnu výpočetní buňky, ale neobsahuje roh stěny výpočetní buňky, není rozpoznána (viz. Obr. 1). K výhodám metody FAVOR™ patří možnost měnit výpočetní mřížku a geometrii objektu nezávisle na sobě a tato metoda též umožňuje v programu FLOW-3D modelovat pohybující se pevné objekty s až šesti stupni volnosti.

Pro simulace byla použita verze softwaru FLOW-3D v.11.0.4.

Definovaná geometrie objektu

Interpretace objektu metodou FAVOR™



Obr. 1. Metoda FAVOR™

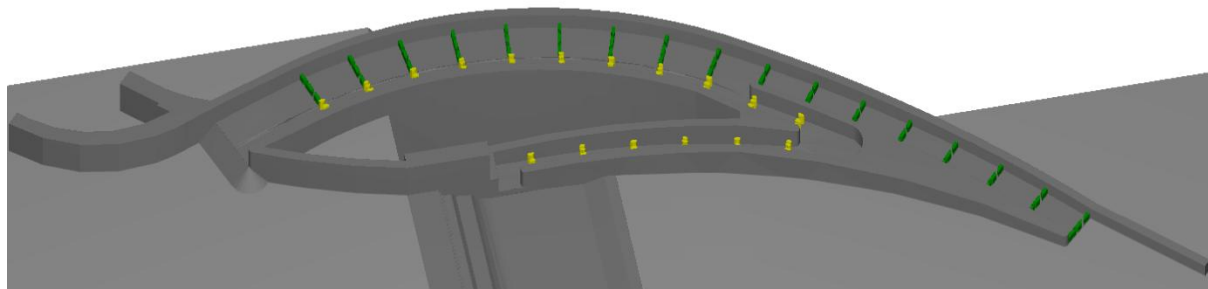
1.2 Zjednodušující předpoklady

Při simulaci proudění v rybím přechodu byly přijaty následující zjednodušující předpoklady:

- Simulace byla provedena za předpokladu ustáleného proudění v rybím přechodu.
- V simulacích byla jako tekutina uvažována čistá voda bez sedimentů a nerozpuštěných látek.
- Nebylo uvažováno s vlivem provzdušnění vody proudící v rybím přechodu.
- V okolí vstupů i výstupu z rybího přechodu nebylo uvažováno s prouděním v řece Svitavě.

1.3 Digitální 3D model geometrie rybího přechodu

Na základě projektové dokumentace byla v softwaru AutoCAD 2012 nakreslena 3D geometrie rybího přechodu. 3D geometrie byla exportována do formátu STL, se kterým pracuje výpočetní software FLOW-3D a slouží tak jako náhradní oblast pro modelování proudění v rybím přechodu.

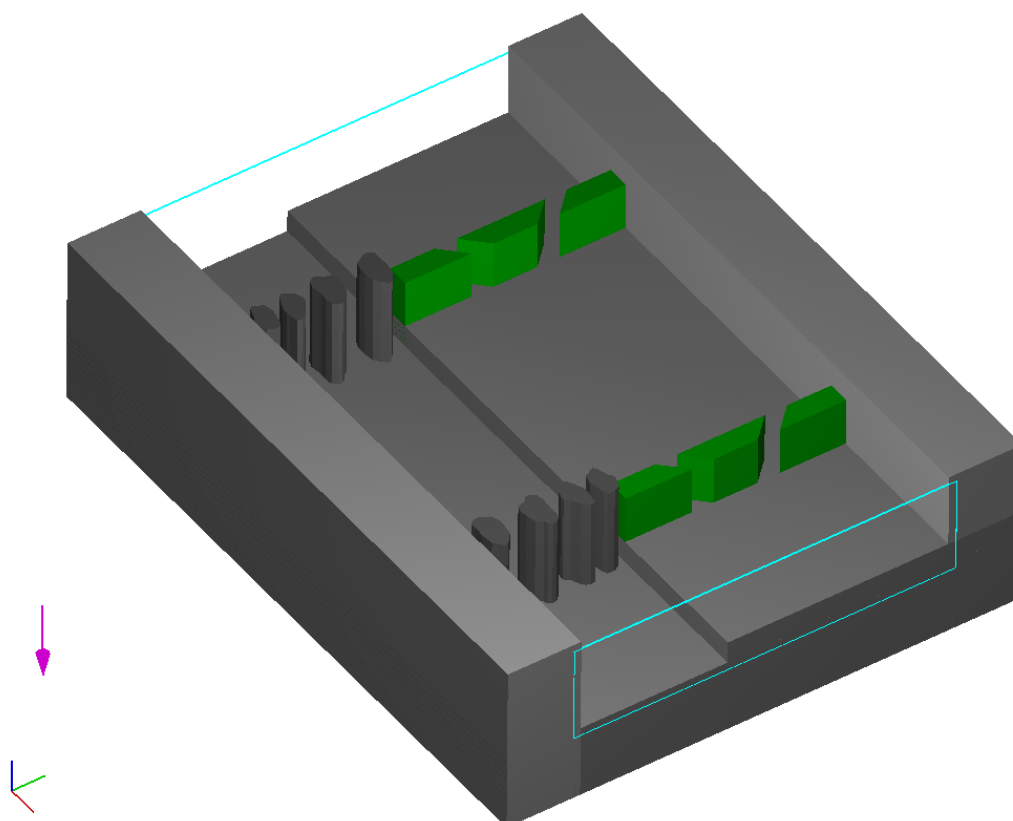


Obr. 2. Vytvořený digitální 3D model geometrie celého rybího přechodu u jezu Obrany

1.4 Použité modely rybího přechodu

V rámci modelování proudění v rybím přechodu byly zhotoveny 2 modely:

- **Model celého rybího přechodu** zahrnuje rybí přechod v celém rozsahu (hlavní i vedlejší rameno) a část toku v okolí vstupů a výstupu z rybího přechodu. Kombinace velikosti přepážek, tvaru a celkových rozměrů rybího přechodu a výkonu dostupné výpočetní techniky byla poněkud omezující co se týče prostorové diskretizace výpočetní oblasti modelu celého rybího přechodu. Proto bylo přistoupeno k vytvoření části rybího přechodu.
- **Model části rybího přechodu** – byl použit jako pomocný model a zahrnoval krátký úsek hlavního ramene s kamennými i kartáčovými přepážkami. Vzhledem k menšímu rozsahu modelu bylo možné použít mnohem hustší výpočetní mřížku a tím i lépe zachytit proudové a rychlostní poměry v části rybího přechodu s kamennými a kartáčovými přepážkami. Modelován byl úsek délky 8,80 m, který obsahoval 2 sady přepážek a na hranicích modelu byly použity periodické okrajové podmínky („periodic“).



Obr. 3. Rozsah pomocného modelu části rybího přechodu

1.5 Nastavení softwaru FLOW-3D

Modelování proudění v rybím přechodu u jezu Obřany bylo provedeno v softwaru FLOW-3D. Nastavení některých parametrů simulací je uvedeno níže.

1.5.1 Vlastnosti simulované tekutiny

Vlastní modelování bylo provedeno za těchto předpokladů:

- 3D (trojrozměrný) model proudění;
- isotermické proudění;
- nestlačitelná tekutina;
- viskozita $\eta = 0,001 \text{ Pa.s}$;
- hustota $\rho = 1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$.

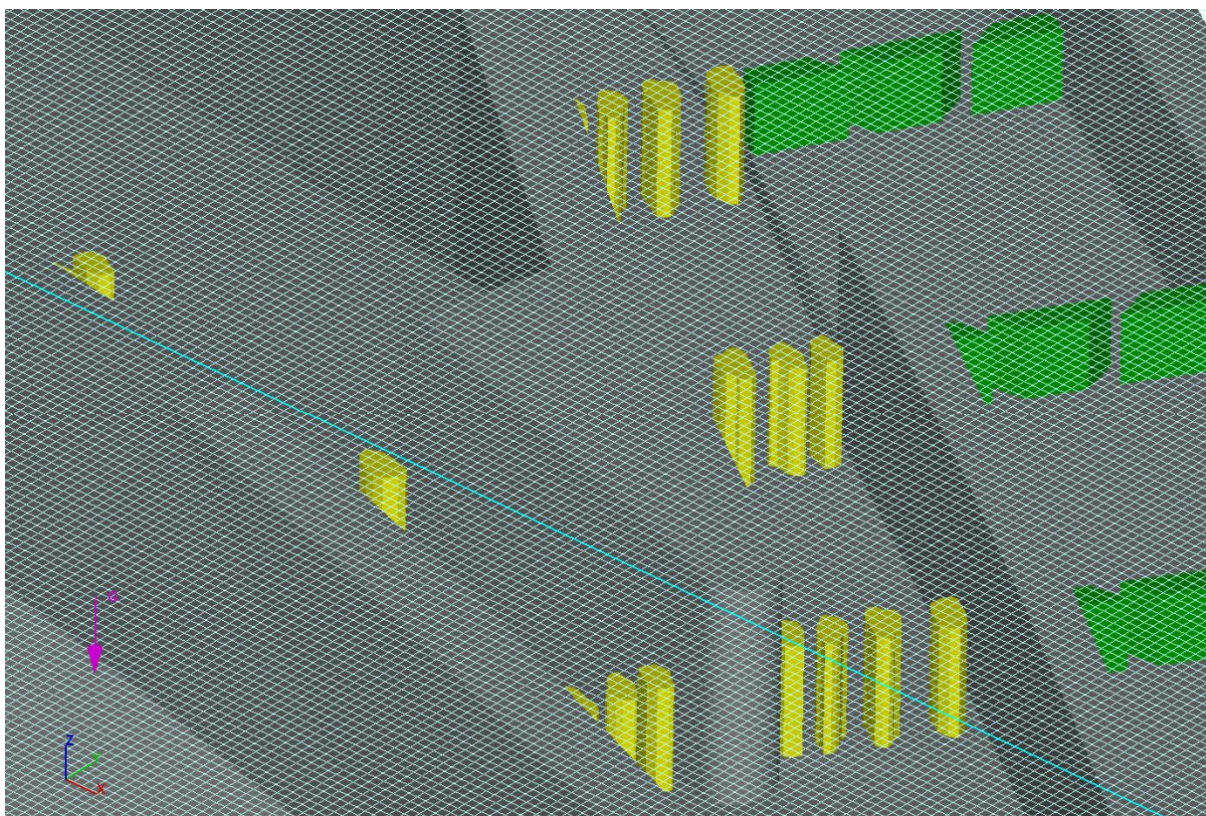
1.5.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky modelu celého rybího přechodu byly zadány následovně:

- poloha hladiny u výstupu z rybího přechodu (212,57 m n.m.),
- poloha hladiny u vstupu (hlavního i odkloněného ramene) do rybího přechodu (209,51 m n.m.).

1.5.3 Numerické nastavení

- RNG k- ϵ model turbulence;
- u vody uvažován součinitel stlačitelnosti $\gamma = 4,55 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$.



Obr. 4. Výpočetní mřížka

1.5.4 Fyzikální vlastnosti materiálů

Drsnosti materiálů v modelu rybího přechodu byly zadány následovně:

- drsnost stěn rybího přechodu: $n = 0,015$;
- drsnost dna rybího přechodu: $n = 0,030$;
- drsnost kamenných přepážek: $n = 0,050$;
- drsnost kartáčů: $n = 0,010$.

Kartáčové elementy v rybím přechodu tvoří umělohmotná vlákna o průměru přibližně 5 mm. Modelování jednotlivých vláken není z důvodů enormních nároků na výpočetní výkon reálné. Kartáče byly v modelu definovány jako tělesa se zadanou pórovitostí a ztrátovým (odporovým) součinitelem – byl použit model porézního prostředí. Pro výpočet ztráty (odporu) při průtoku přes kartáčové elementy byla použita Forchheimerova rovnice pro nasycené prostředí.

Forchheimerova rovnice popisuje ztráty v porézním prostředí pomocí viskózního (lineárního) a tvarového (kvadratického) ztrátového součinitele [3]:

$$F_d \mathbf{u}_{\text{mikro}} = -\frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\mu}{\rho} \frac{1-\phi}{\phi} \left[A \frac{1-\phi}{\phi} + B \frac{Re_p}{d_p} \right] \mathbf{u}_{\text{mikro}}$$

$$Re_p = \frac{\rho |\mathbf{u}_{\text{mikro}}| d_p}{\mu}$$

kde F_d je součinitel odporu, $\mathbf{u}_{\text{mikro}}$ je rychlost proudění v pórech, ρ je hustota tekutiny, μ je viskozita tekutiny, ϕ je pórovitost prostředí, d_p je průměrná velikost (diameter) pórů v porézním prostředí, Re_p je hodnota Reynoldsova kritéria definovaná v porézním prostředí, A je lineární součinitel ztráty, B je kvadratický součinitel ztráty.

Lineární součinitel ztráty byl odhadnut podle vztahu $A = 180/d^2$, kde d je průměr vlákna v kartáčovém elementu. Kvadratický součinitel ztráty byl odhadnut podle rovnice $B = 1,8/d$, kde d je průměr vlákna v kartáčovém elementu.

Pórovitost kartáčového elementu byla odhadnuta s využitím vzorové výpočetní pomůcky [4], kde ve výpočetním postupu je uveden rozměr kartáčového elementu i počet umělohmotných vláken v jednom kartáčovém elementu. Pórovitost byla stanovena jako:

$$\phi = \frac{1 - \sum_{i=1}^n \pi d^2 / 4}{S_{elementu}}$$

kde n je počet umělohmotných vláken v jednom kartáčovém elementu, d je průměr vlákna v kartáčovém elementu a $S_{elementu}$ značí půdorysnou plochu kartáčového elementu. V simulacích bylo uvažováno s pórovitostí o hodnotě 0,85.

Hodnoty ztrátových součinitelů A , B i pórovitosti ϕ byly stanoveny pouze orientačně. Zhotovitel neměl k dispozici data z fyzikálního měření, která by umožnila kalibraci parametrů pro definici kartáčových elementů v numerickém modelu.

2 VÝSLEDKY

Výsledky provedených simulací jsou prezentovány pomocí obrázků, na kterých jsou vybrané veličiny vyobrazeny pomocí barevné škály. Ve zprávě jsou prezentovány následující parametry:

- rychlost proudění (jednotky m/s).

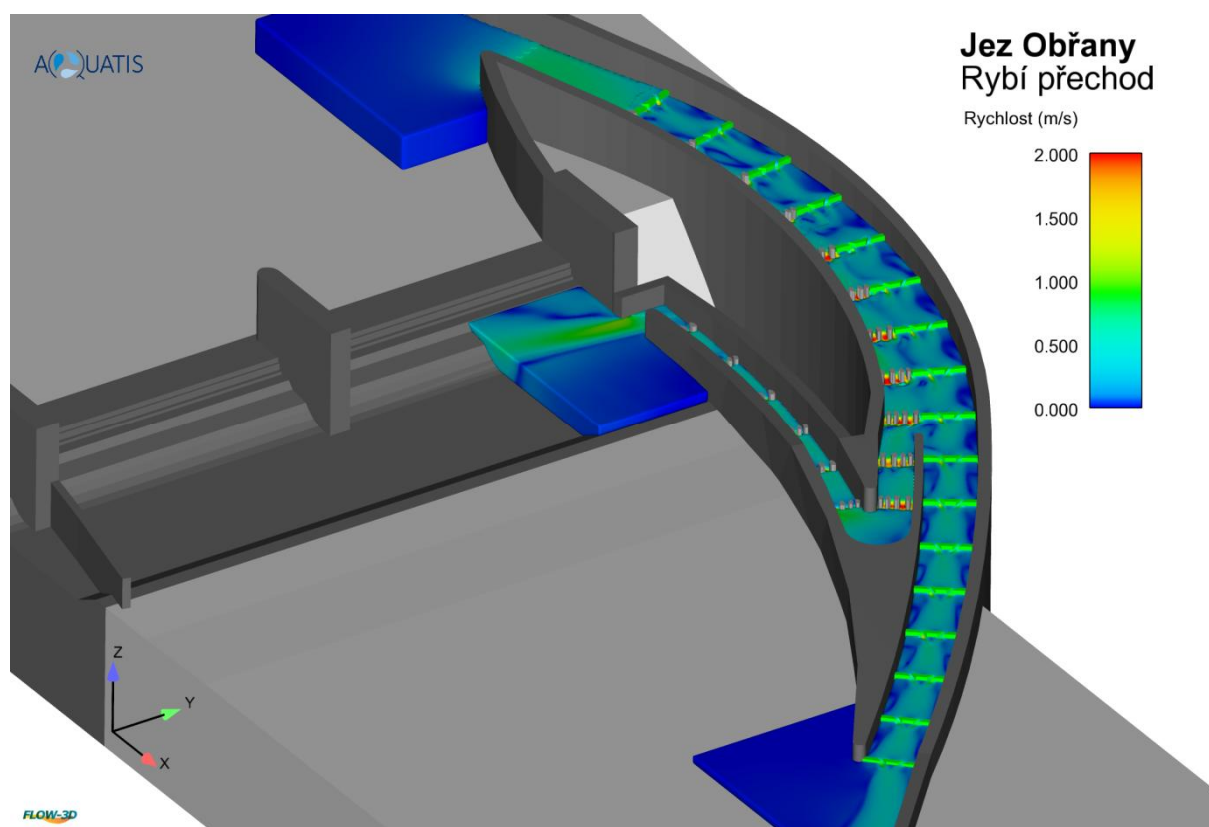
Rozsah barevné škály u rychlostí je v rozmezí 0,00 – 2,00 m/s .

Příčné a podélné řezy rybím přechodem jsou v převýšeném měřítku.

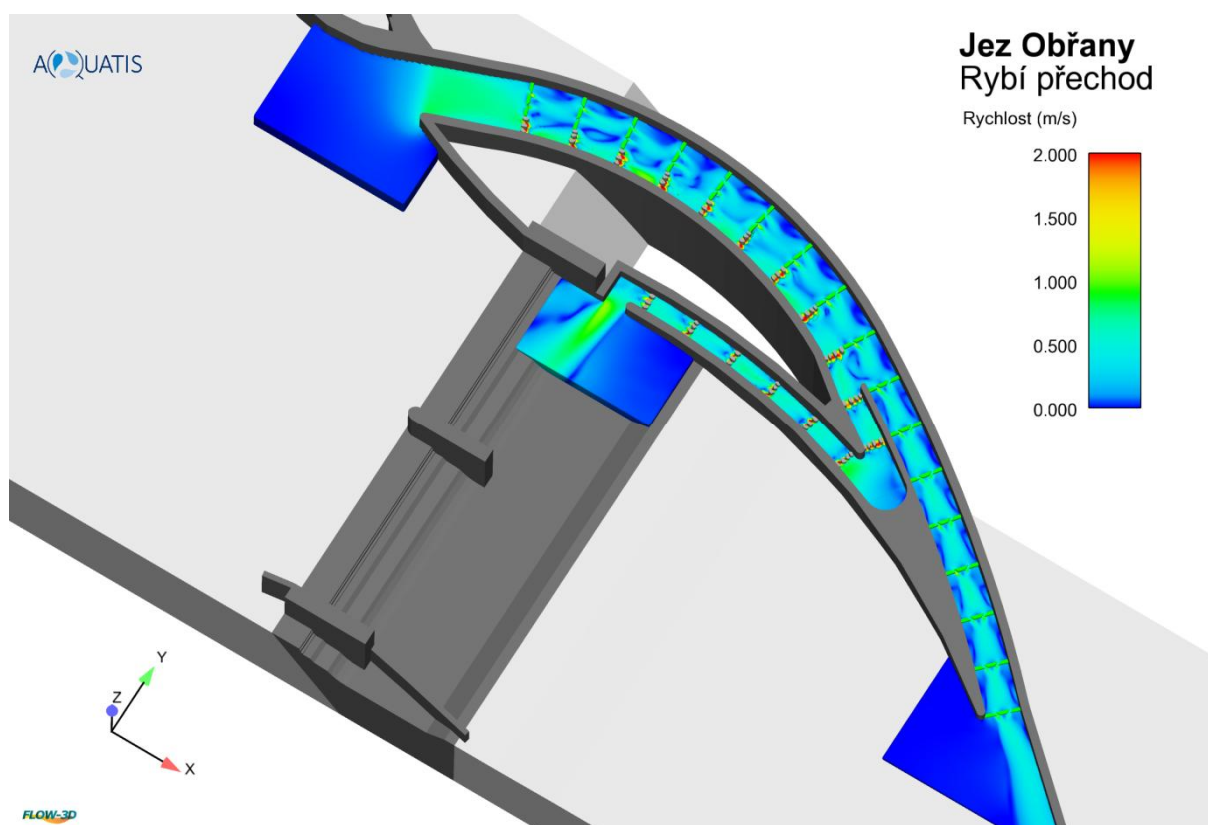
2.1 Model celého rybího přechodu

Ze simulací provedených na modelu celého rybího přechodu vyplynulo následující:

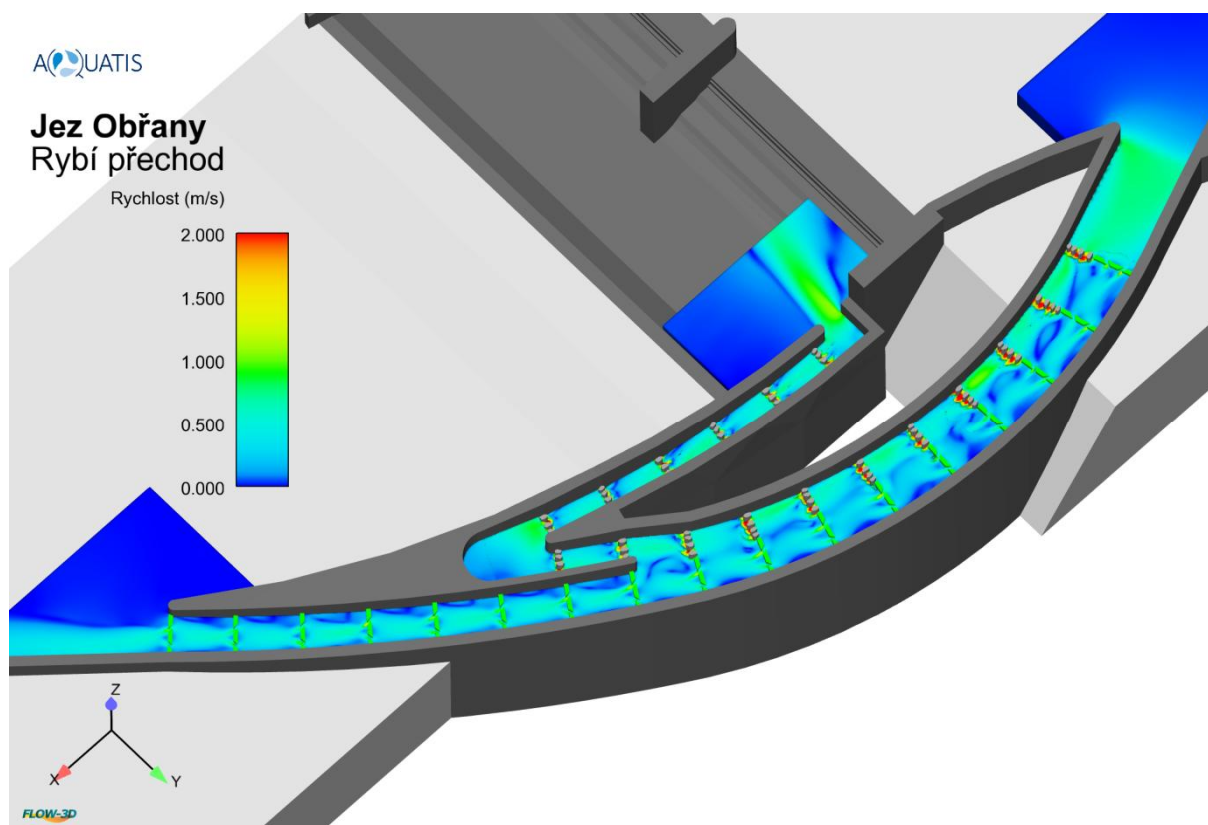
- průtok rybím přechodem: $Q = 1,810 \text{ m}^3/s$;
- z toho průtok vodáckou propustí: $Q = 0,610 \text{ m}^3/s$.



Obr. 5. Model celého rybího přechodu – rychlosti proudění na hladině



Obr. 6. Model celého rybího přechodu – rychlosti proudění na hladině

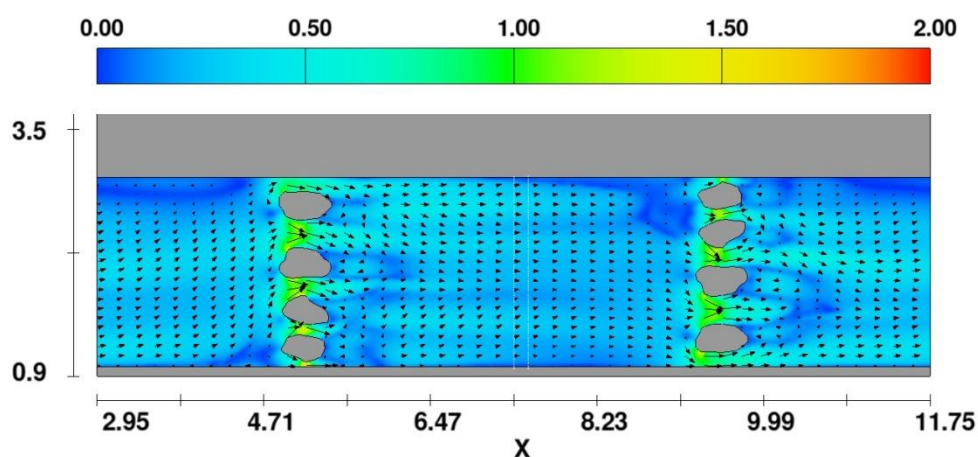


Obr. 7. Model celého rybího přechodu – rychlosti proudění na hladině

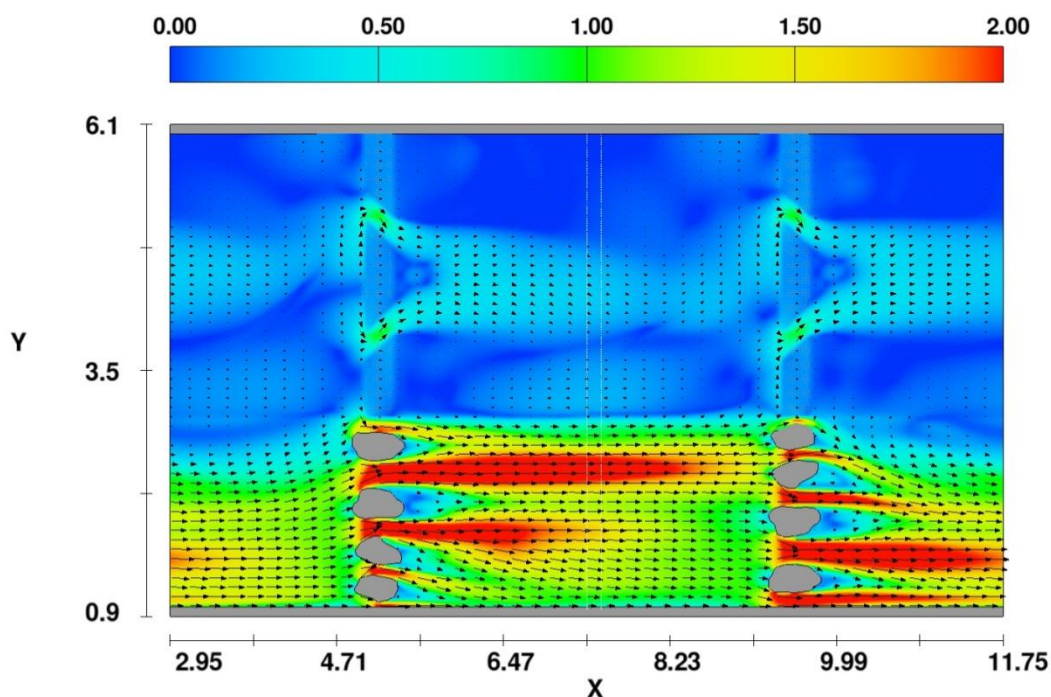
2.2 Model části rybího přechodu

Ze simulací provedených na modelu části rybího přechodu vyplynulo následující:

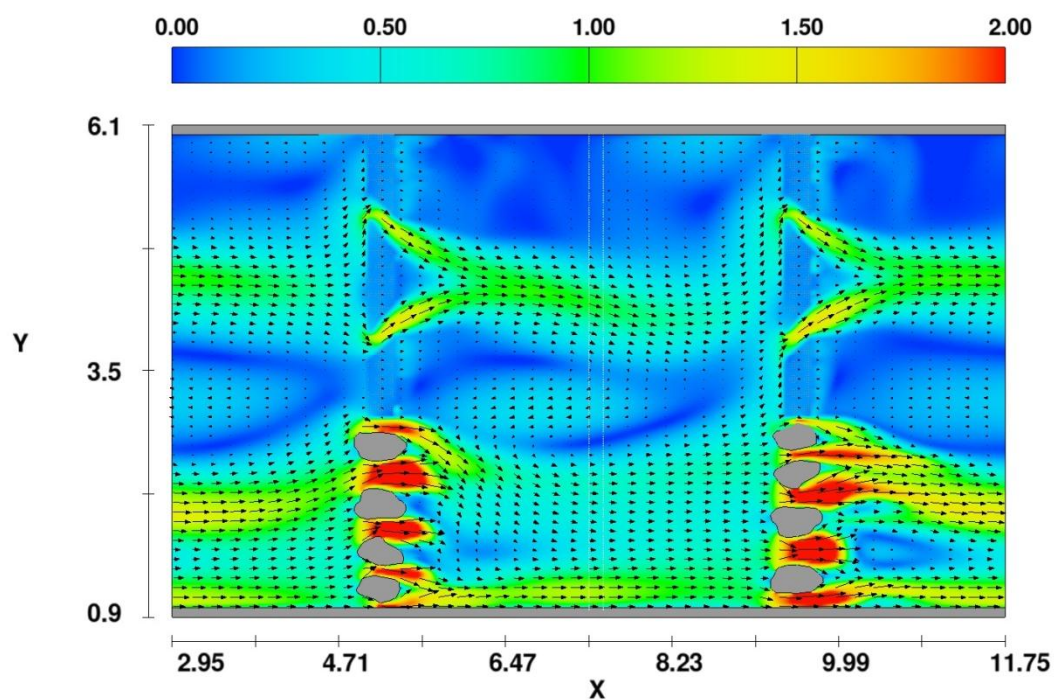
- Průtok rybím přechodem je rozdělen nerovnoměrně:
 - cca 2/3 protékají částí s kamennými přepážkami;
 - cca 1/3 protéká částí s kartáčovými elementy (vodáckou propustí).
- Rozdíl hladin mezi jednotlivými tůněmi se pohybuje v rozmezí 0,15 – 0,20 m.



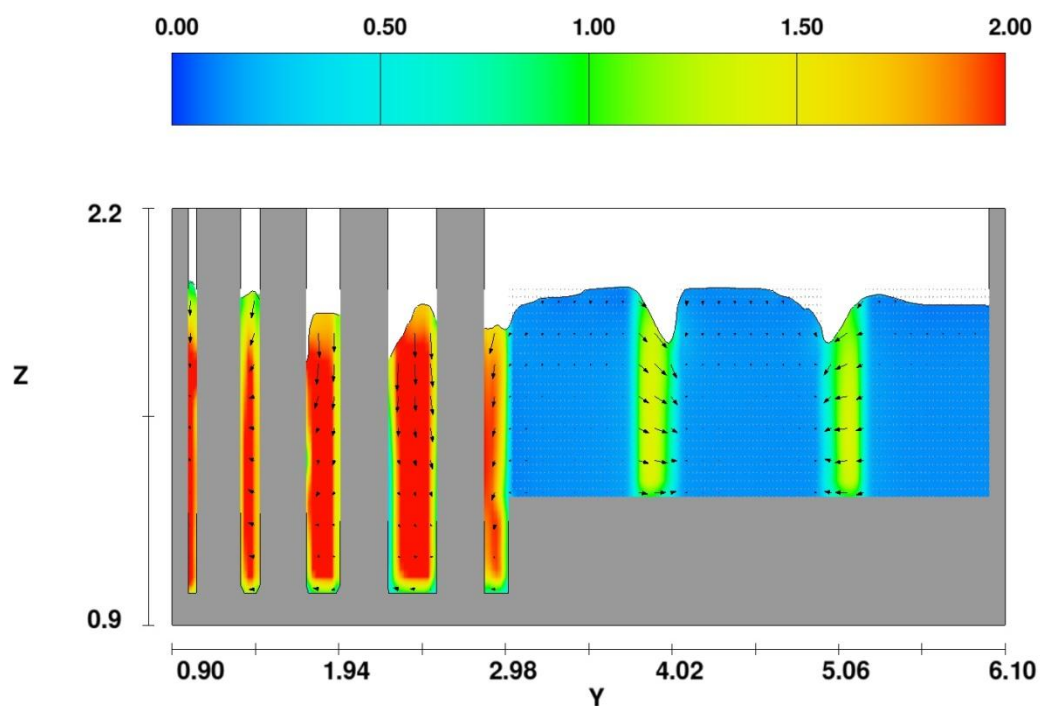
Obr. 8. Půdorysný řez – 12,50 mm nade dnem rybího přechodu



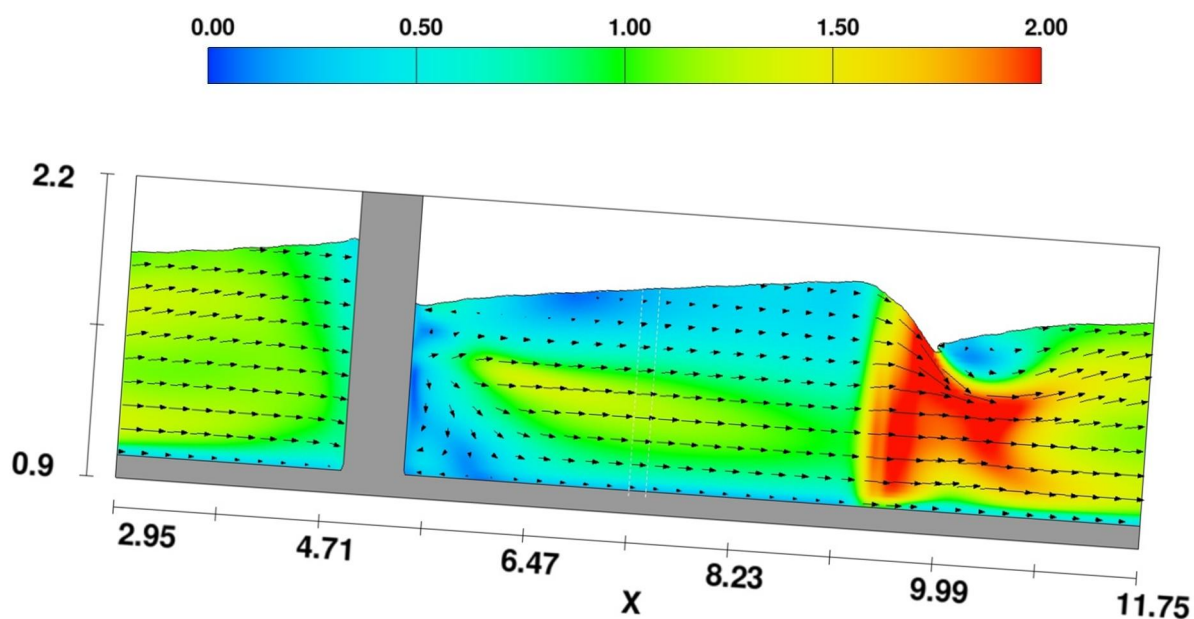
Obr. 9. Půdorysný řez – 312,50 mm nade dnem rybího přechodu



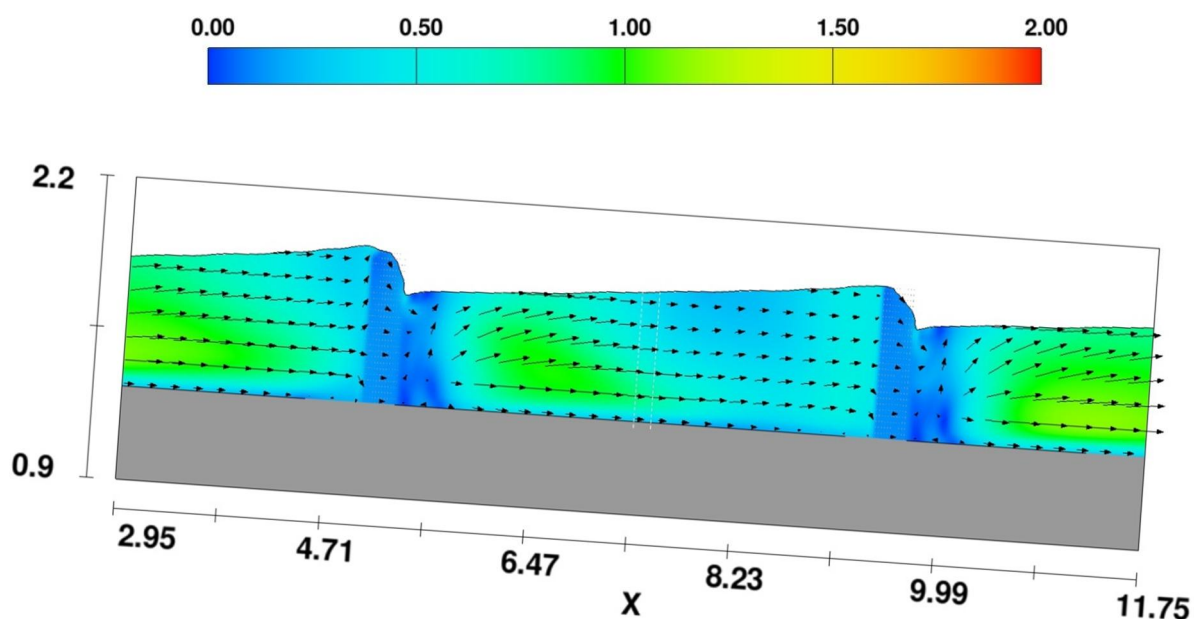
Obr. 10. Půdorysný řez – 612,50 mm nade dnem rybiho přechodu



Obr. 11. Příčný řez přepážkou



Obr. 12. Podélný řez kamennými přepážkami



Obr. 13. Podélný řez kartáčovými elementy

3 ZÁVĚR

Navrhovaný rybí přechod u jezu Obřany na toku Svitava byl posouzen pomocí 3D matematického modelu. Z výsledků provedených simulací vyplynula funkčnost navrhovaného rybího přechodu. Průtok rybím přechodem je rozdělen nerovnoměrně – cca 2/3 protékají částí s kamennými přepážkami a cca 1/3 protéká částí s kartáčovými elementy (vodáckou propustí). Rozdíl hladin mezi jednotlivými tůňmi se pohybuje v rozmezí 0,15 – 0,20 m.

V Brně dne 30.9.2015

Ing. Tomáš Studnička, Ph.D.



BIBLIOGRAFIE

- [1] Barkhudarov, M.: Lagrangian VOF advection Method for FLOW-3D. Flow Science Inc. Technical Note, FSI-03-TN63R, 2004.
- [2] Isfahani, A.G.H., Brethour, J.M.: 2004. On the Implementation of Two-equation Turulence Models in FLOW-3D. Flow Science Inc. Technical Note, FSI-09-TN86, 2009.
- [3] FLOW-3D v.11.0.4 Manual. Santa Fe: Flow Science, 2014.
- [4] http://www.uni-kassel.de/fb14/vpuw/Download/FKP/_vti_cnf/Bemessungssheet.xls