

Využití nových softwarových prostředků pro navrhování čistíren odpadních vod

Ing. Petr Chmátal

Anotace

Příspěvek popisuje možnosti hledání energetických úspor na čistírnách odpadních vod pomocí nových softwarových prostředků. Přínosem je případová studie s vypracovaným a ověřeným postupem na zefektivnění navrhování staveb. Studie pracovala s projektem čistírny v Praze, kde byla variantně navržena dešťová nádrž. Případné úspory elektřiny při variantním řešení dosahují až 327 GWh ročně.

Klíčová slova

informační model budov (BIM); matematické modelování proudění (CFD); vodní hospodářství; optimalizace

Abstrakt

Implementace nových pracovních postupů ve stavebnictví do výroby je vždy složitý a dlouhý proces. Obor má svoji setrvačnost a především řadu technických a administrativních povinností. Před využitím nových postupů je třeba vypracovat technické povinnosti návrhů a nejlépe i případové studie, které jsou následně převedeny do nových norem a zákonů. Projekt má za cíl zhodnotit aktuální situaci informačních modelů budov (BIM) a matematického modelování proudění (CFD). Vypracovat případovou studii na využití propojení informačního modelu s modelováním proudění a stanovit podmínky propojení těchto modelů. Navržený pracovní postup má potenciál na využití v budoucích normách o navrhování čistíren odpadních vod (ČOV). CFD optimalizuje proudění kapalin uvnitř objektů. Na ČOV optimalizace proudění znamená buď energetickou úsporu vlivem menších hydraulických ztrát, nebo zvýšení účinnosti čištění odpadních vod vlivem lepšího využití prostoru čistírny. Projekt případové studie popisuje možnosti hledání energetických úspor na čistírnách odpadních vod pomocí propojení BIM a CFD. Přínosem je vypracovaný a ověřený postup, který zefektivňuje navrhování a optimalizaci staveb. Studie se zabývá Novou vodní linkou Ústřední čistírny odpadních vod v Praze, kde by případné úspory mohly být 327 GWh elektrické energie ročně. Ekvivalentem roční úspory je přibližně 300 000 tun hnědého uhlí spáleného v tepelné elektrárně.

Annotation

Paper describes the possibility of finding energy savings in wastewater treatment plants using new software tools. The benefit is a case study in which is drawn and tested procedure to streamline the design of buildings. The study focus on a plant in Prague, where was variously designed rainwater reservoir. Potential savings of electricity in variant solution reaches up to 327 GWh per year.

Key words

Building information model (BIM); computational fluid dynamics (CFD); water structures; optimization

Abstract

Implementation of new workflows in constructions design and production is always a difficult and long process. Building branches have their inertia and lot of number of technical and administrative duties. Before implementing the new procedures should be developed technical proposals obligations and some case studies should be shown. Proposals are then transferred to the new standards and laws. The project aims to evaluate the current situation of building information modeling (BIM) and mathematical modeling – computational fluid dynamics (CFD). Case study on the use of interconnection of information model with modeling of flow is shown at the central waste water treatment plant in Prague. Conditions for interconnection of these models are established in project. Designed workflow has the potential to be used in future standards for the design of wastewater treatment plants (WWTP). CFD optimizes the flow of liquids inside plant. Flow optimization at the waste water treatment plant means either the energy savings due to the smaller hydraulic losses, or increases the efficiency of wastewater due to better space usage of plant. The case study in this project describes how search for energy savings in wastewater treatment plants by linking BIM and CFDs. The benefit of the project is drafted and vivificated process that streamlines the design and optimization of structures. The study shows potential electricity savage of 327 GWh per year at WWTP at Prague. Equivalent to annual savings is approximately 300,000 tons of brown coal burned in thermal power plant.

Úvod

BIM

Modelování budov ve 3D a možnost využívání informací obsažených v modelu není úplná novinka. Teprve během posledních několika let je ovšem o tento přístup k navrhování zvýšený zájem. Důvodem jsou nejen zlepšující se softwarové nástroje, které modelování usnadňují a výstupy zkvalitňují, ale také rozšiřující se povědomí o výhodách BIM. Investoři proto začínají BIM postupně vyžadovat. Jedním z největších investorů je státní správa. V řadě evropských zemí je informační model budov pro veřejné zakázky určitého odvětví a rozsahu vyžadován. [1]

Pro sjednocení zadávání veřejných zakázek v evropských zemích vydala Evropská unie Směrnicí Evropského parlamentu a rady 2014/24/EU. Ve směrnici není přímo dáno, že by měl být informační model vyžadován. Ovšem závazné podmínky ze směrnice, jako je elektronizace, efektivita nebo transparentnost, se s informačním modelem přímo shodují. Ve směrnici jsou dány i termíny povinného zavedení nových podmínek veřejných zakázek. V České republice zatím směrnice

implementována není a je otázkou, jestli po implementaci bude BIM vyžadován. Z odborných rozprav vyplývá, že BIM vyžadován bude, ovšem ne ihned po implementaci směrnice. [2] [3]

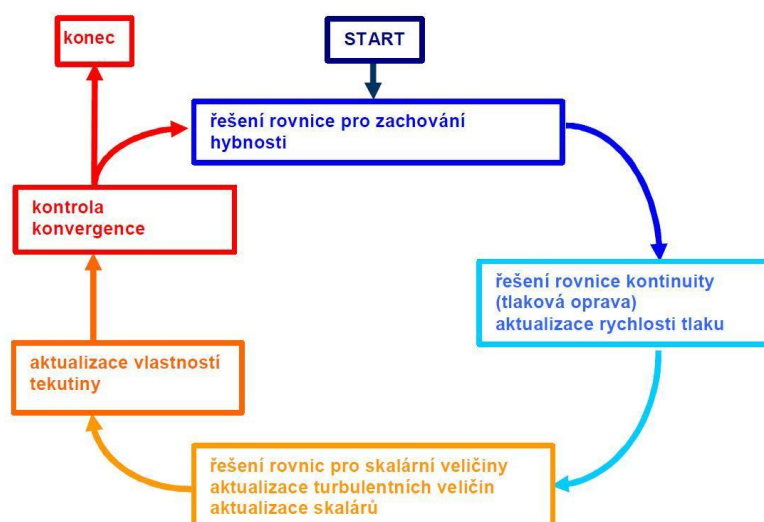
Ve vodním hospodářství je absolutní většina staveb veřejnou zakázkou nebo jsou to stavby dotované ze státních nebo evropských fondů. Je tedy zřejmé, že po implementaci evropské směrnice bude muset být většina vodohospodářských staveb zpracována v informačním modelu.

Informační model ve vodním hospodářství podle odborné veřejnosti není příliš velkým přínosem pro klasické stavební části. Betonové konstrukce a zemní práce jsou sice ve velkých objemech, ale většinou poměrně jednoduše definované. Velkým přínosem pro vodohospodářské stavby jsou ovšem všechny technologické části a jejich umístění v konstrukci. Technologie jsou prostorově i funkčně velice složité a musí být správně navrženy i usazeny. Další významný přínos je poté spojení BIM a simulačních prostředků pro optimalizaci technologie i stavební části. [4]

Pro optimalizaci je výhoda informačního modelu v umístění v procesu a snadnější implementaci výsledků do návrhu stavby. Celý proces optimalizace se zrychluje a zkvalitňuje. Lépe se odhalí případné nedostatky a kolize. Návrh stavby je tedy možné měnit ve fázích, kdy je možná podstatná změna. Celkový návrh je pak komplexnější s ohledem nejen na stavbu, ale i na její životní cyklus. [5]

CFD

Program Fluent je založen na principu metody konečných objemů. Okrajové podmínky lze zadat buď tlakovou, rychlostní, objemovou, stěnovou nebo symetrii. Data jsou uloženy ve středu jednotlivých buněk výpočetní sítě a výpočet probíhá vždy se všemi sousedními buňkami v třídimenzionálním křivočarém souřadném systému.



Obrázek 1 Diagram algoritmu řešení Fleuntem

Výpočet parciálních diferenciálních rovnic probíhá diferenční metodou. Ta spočívá v nahrazení derivací diferenčními podíly použitím Taylerova rozvoje, odvozením diferenčních rovnic a jejich řešením. Postup řešení rovnic je znázorněn na Obr. 1.

Jednotlivé kroky řešení jsou popsány:

- 1) Pohybové rovnice pro neznámé složky rychlosti jsou řešeny s užitím hodnot tlaků tak, aby se aktualizovalo rychlostní pole
- 2) Rychlosti určené v předchozím bodě nemohou splňovat rovnici kontinuity, proto se určují tzv. tlakové korekce i rychlostního pole
- 3) Pomocí nových hodnot rychlostí se řeší rovnice pro turbulentní energii k a disipaci ϵ
- 4) Řeší se další rovnice pro určení skalárních veličin
- 5) Aktualizují se fyzikální vlastnosti kapaliny (např. viskozita)
- 6) Kontrola konvergence

Fluent ukládá složky rychlosti a skalární veličiny v geometrických středech konečných objemů definovaných výpočetní sítí. Pro výpočet jsou potřebné tyto hodnoty na stěnách buněk, které jsou získávány interpolací:

- Mocninovou interpolací
- Kvadratickou interpolací ze stěn okolních buněk (QUICK)
- Interpolací druhého řádu (centrální diferencí)

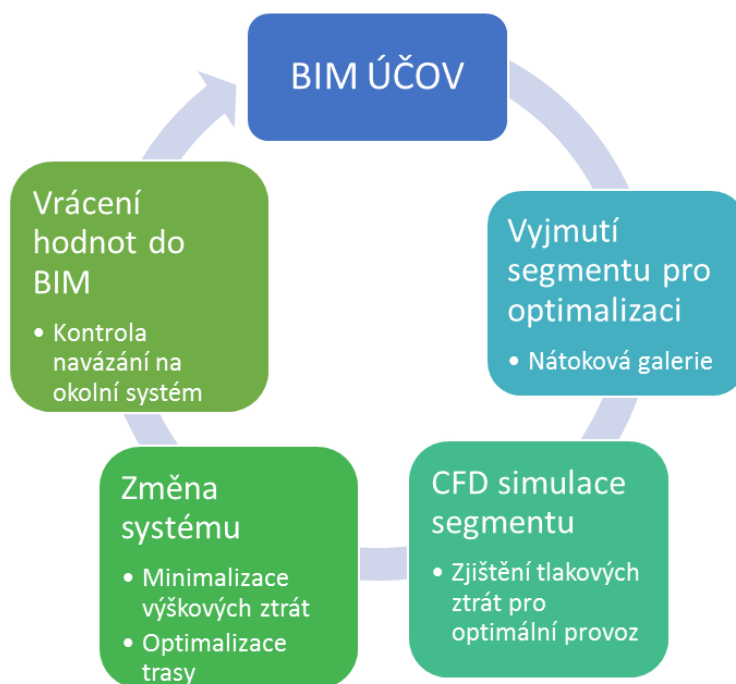
Výběr interpolace závisí na požadované přesnosti. Zde jsou seřazeny od nižšího řádu po nejvyšší. Ve složitějších úlohách je vhodné začít s nižším řádem a po čase ho zvýšit.

Pro modelování turbulence proudění lze použít mnoho přímou numerickou simulaci, modelování velkých vírů nebo klasické RANS modely s nejpoužívanějším k - ϵ modelem, což je dvourovnicový model založený na transportních rovnicích turbulentní kinematické energie k a její disipační hodnoty ϵ .

Pro modelování více fází ve Fluentu lze použít modely:

- Volume of Fluid – určený pro modelování dvou a více fází, které tvoří jasné rozhraní, fáze se nemohou míchat
- Mixture – model řeší proudění dvou a více fází, které se mohou vzájemně mísit, hybnost je řešena pouze jedna pro celek
- Eulerian - model řeší proudění dvou a více fází, které se mohou vzájemně mísit, hybnost je řešena pro každou fázi zvlášť

Případová studie a její cíle



Obrázek 2 Schématický postup prací

Hlavním cílem studie je vypracovat postup pro předávání dat a vyzkoušet ho na reálném projektu. Projektanti a hydraulici simulující proudění v matematických modelech mají nové možnosti na zjednodušení a zrychlení práce díky využití propojení BIM a CFD. Postup na výměnu dat je důležitým krokem pro definování úkolů a zodpovědnosti při spolupráci.

Případová studie se věnuje variantní optimalizaci nátokové galerie na usazovací nádrže DENSEDEG za mechanickým předčištěním na česlích. Optimalizovaná varianta obsahuje dešťovou nádrž, kde je akumulována voda při zvýšeném průtoku. Díky akumulaci je možné snížit návrhový průtok na čerpání a mechanickou část čištění. Snížený průtok na mechanické čištění se poté rovná i průtoku na biologické čištění. Průtok v biologické části zůstává stejný. Vypouštěná voda při zvýšeném průtoku je tedy čistší, protože celý objem vody projde přes biologické čištění. Varianta s akumulací počítá s ucpáním zavzdušnění potrubí za čerpací stanici a protipovodňovou úpravou čerpací stanice. Tím je docílena úspora energie na čerpání při zachování ochrany proti povodním.

Tabulka 1 Maximální průtokové stavy navrhovaného a variantního řešení

	Max. průtok mechanická část (m ³ /s)	Max. průtok biologická část (m ³ /s)
Navrhovaný stav	7,1	6,0
Variantní řešení s akumulací	6,0	6,0

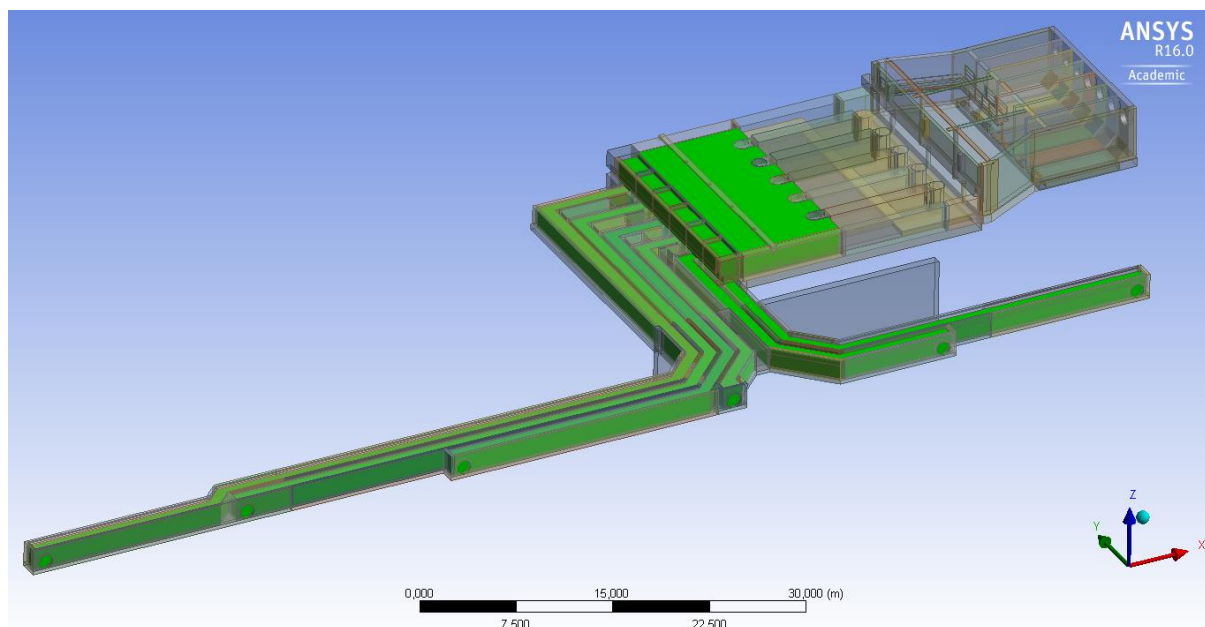
Podklady pro optimalizaci z informačního modelu

Projektová dokumentace pro Novou vodní linku Ústřední čistírny odpadních vod v Praze je zpracovávána projekční firmou SWECO Hydroprojekt. Dokumentace je v „klasické“ dnešní podobě, tedy elektronicky ve 2D. Pro velké množství změn v projektu během jeho navrhování začali projektanti zpracovávat projekt i v BIM modelu. Pro tento krok se rozhodli dobrovolně bez naléhání ze strany investora či stavebníka. Informační model pomáhá projektantům lépe se srovnat se změnami a také si od něj slibují technologický náskok do budoucna.

Předání dat od projektanta pro optimalizaci musí být jednoznačné. Při přenosu nesmí dojít ke ztrátě ani ke změně informací. Přenos je možné provést pomocí elektronické pošty, online úschovny nebo pomocí přenosných disků. Data pro simulace musí obsahovat:

1. Soubor ifc obsahující informační model objektu
2. Jeden ze souborů sat nebo igs nebo stp obsahující 3D geometrii objektu
3. Technickou zprávu

Předáním dat ve formátu ifc a jedním z formátů pro 3D geometrii se zamezí ztrátě dat, která může vzniknout při exportování z BIM. ifc model je většinou přehlednější pro prohlížení. Formáty 3D geometrie lze jednoduše nainportovat do simulačních programů. V technické zprávě jsou popsány všechny provozní stavy, kterým musí optimalizovaná geometrie vyhovět.

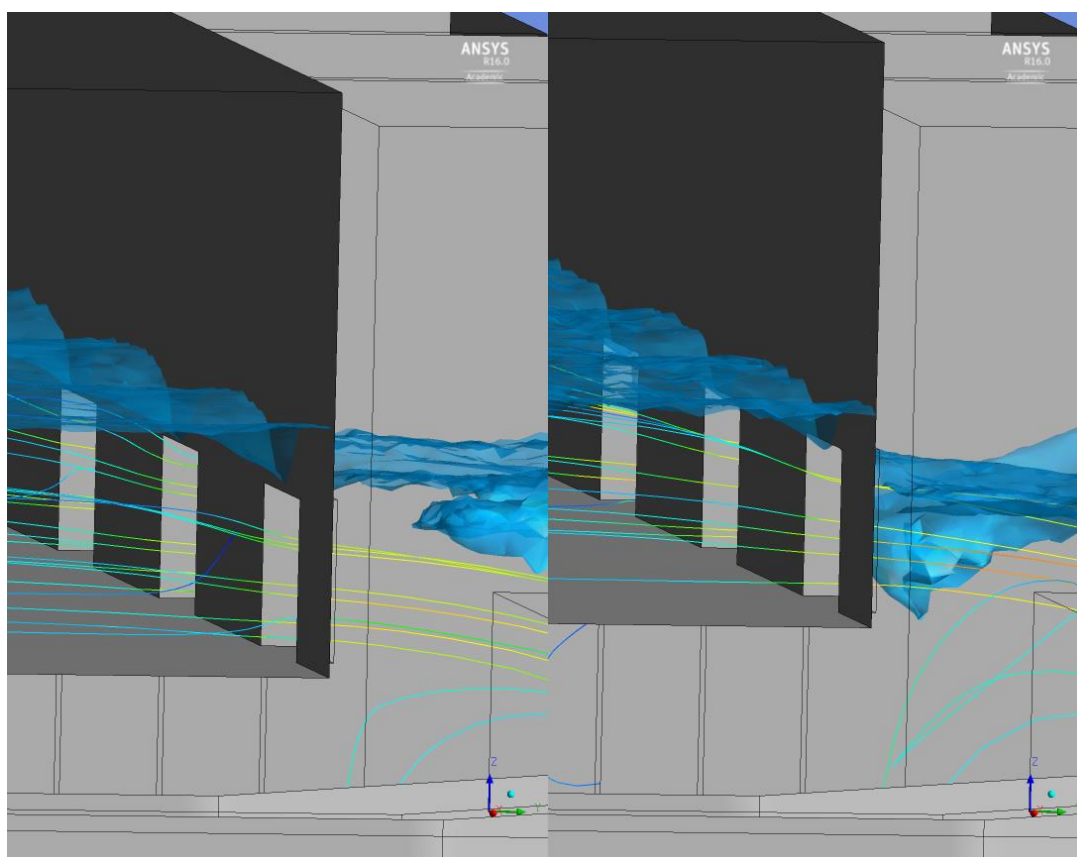


Obrázek 3 Předaný model části objektu se zeleně zvýrazněnou částí určenou pro simulaci proudění

Pro optimalizace části velké stavby se nemusí předávat celá stavba. Stačí předat objekt nebo pouze jeho část. Předávaný model ovšem musí být vždy s návazností na prostor před a za ním. Předaný model se pro simulaci musí ještě upravit. Simulace probíhá v objemu mezi stěnami, proto jsou stěny odstraněny. Model se může mimo zájmové oblasti proudění zmenšit, tím se zkrátí výpočetní čas simulací.

V naší případové studii je předávána pouze část jednoho objektu. Konkrétně se jedná o nátokovou galerii na usazovací nádrže. Model začíná potrubím vedoucím z čerpací stanice a nátokem do usazovacích nádrží. Je zde tedy návaznost a informace před i za modelem. Před modelem je čerpací stanice o specifikovaném výkonu a za modelem je otevřená nádrž s definovanou volnou hladinou. V technické zprávě jsou popsány všechny provozní stavy. Model byl před simulací upraven. Z modelu byly odstraněny všechny stěny a model byl zkrácený o výtok z čerpadel a o prostor česlí, protože tyto prostory nebyl předmětem optimalizace a nemají přímý vliv na optimalizovaný prostor.

Optimalizace



Obrázek 4 Zatopený přepad vlevo, neovlivněný přepad vpravo

Optimalizovaný prostor v případové studii obsahuje prostor za česlemi, rozdělovací objekt a spojovací kanály. Hydraulika v této části je rozdělena na dvě části. První část je od česlí (čerpací stanice) k rozdělovacímu objektu, druhá od rozdělovacího objektu k výtoku do usazovacích nádrží. Přechod

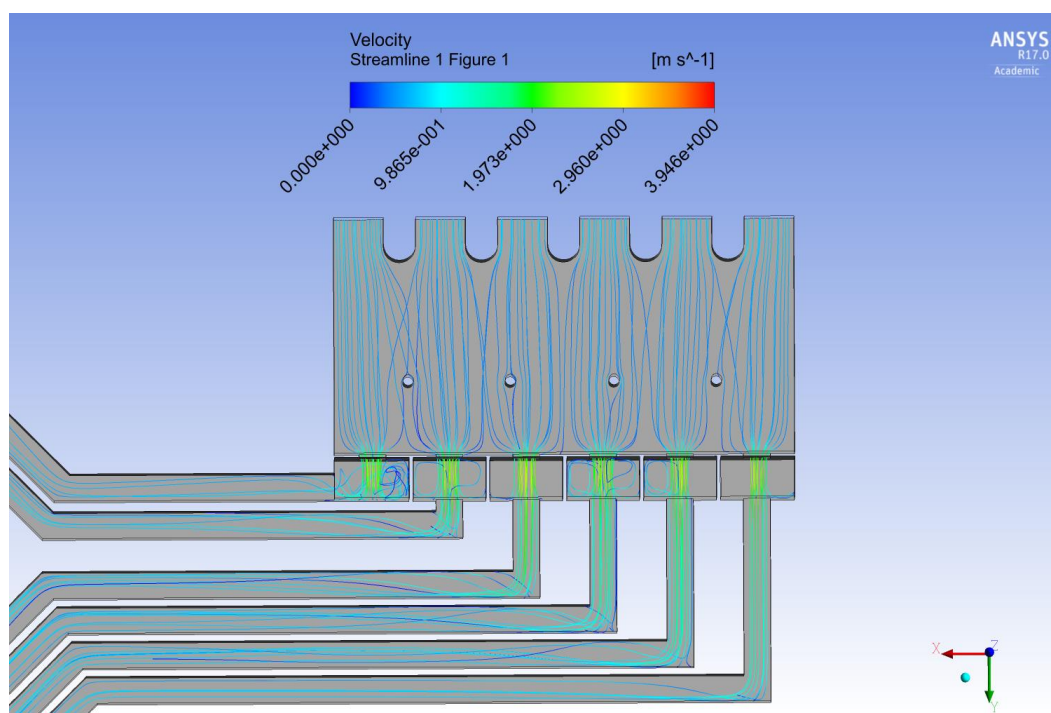
mezi těmito částmi je v rozdělovacím objektu, kde dochází k dokonalému přepadu neovlivněnému spodní hladinou. Spodní hladina je dána hladinou v usazovacích nádržích a hydraulickými ztrátami ve spojovacích kanálech. Horní hladina v rozdělovacím objektu je dána přepadem.

Optimalizace hledá nejmenší rozdíl hladin, aby přepad byl stále neovlivněný spodní hladinou a do každého spojovacího kanálu (dosazovací nádrže) teklo stejné množství vody. Rovnoměrným rozdělením průtoku jsou maximálně využity možnosti čištění vody. Snížením rozdílu hladin se minimalizují nároky na čerpání vody a dochází tak k úspoře energií.

Pro optimalizaci byl použit software ANSYS Fluent, který simuluje proudění podle základních fyzikálních rovnic pro pohyb tekutin. Parciální diferenciální rovnice jsou řešeny metodou konečných objemů. Proudění bylo simulováno jako dvojfázové proudění vody a vzduchu. Model režimu proudění byl zvolen turbulentní model $k-\varepsilon$, který je pro podobné úlohy dostatečně popsán a vyzkoušený. [9]

Obtížnost nastavení výpočtů v simulaci rozdělovací galerie byla ve správném určení okrajových podmínek. Za rozdělením průtoku pomocí přepadu je přechod z netlakového proudění do tlakového. Přechod do tlakového proudění je těsně za vodním skokem, proud je provzdušněný a vzduch může být strháván do tlakového spojovacího kanálu. Po správném nastavení počátečních a okrajových podmínek již výpočet probíhal bez komplikací.

Výsledky optimalizace

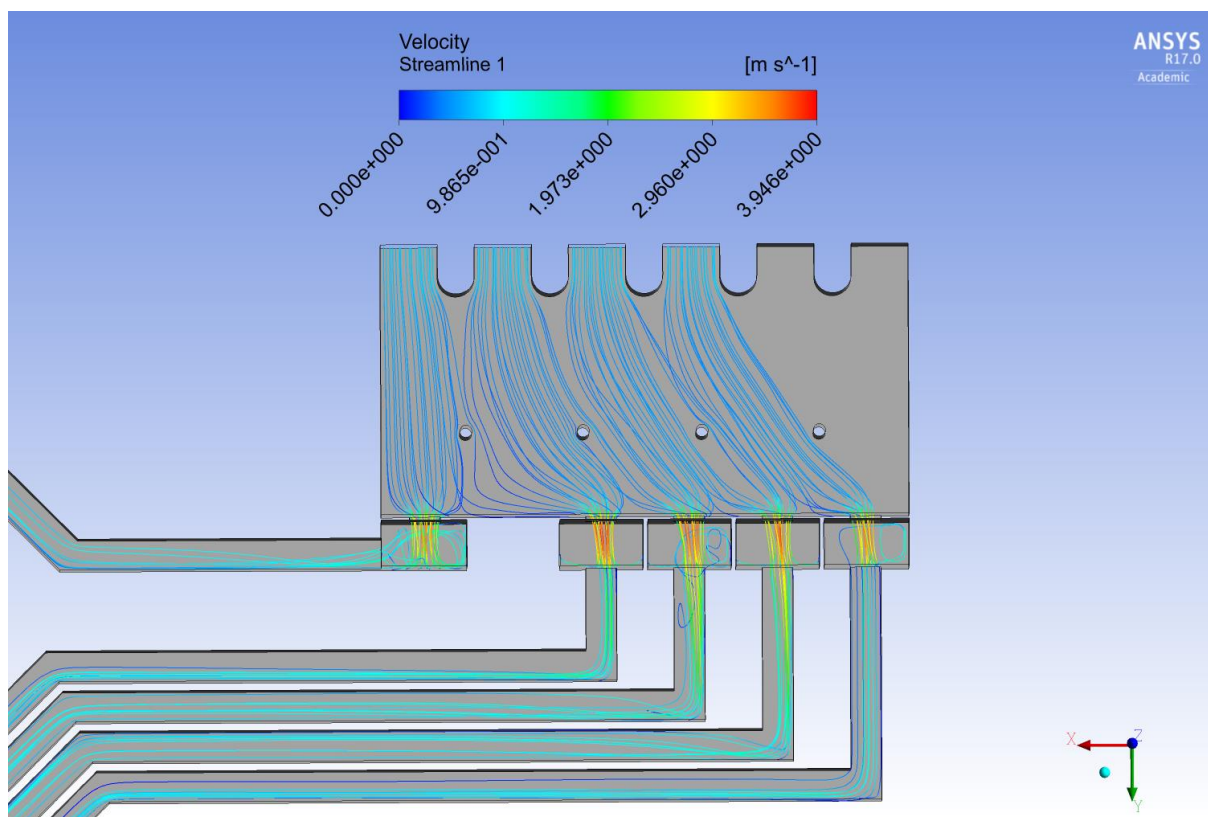


Obrázek 5 Proudnice v rozdělovací galerii obarvené podle rychlosti pro provozní stav se všemi nádržemi v provozu

Výsledkem každé ze simulací byl průtok do jednotlivých usazovacích nádrží. Pro nalezení optimální varianty byla podmínka rovnoměrného rozdělení průtoků při všech provozních stavech. Výsledná varianta optimalizace byla ta, která měla nejnižší rozdíl hladin na vstupu a na výstupu z modelu.

Rozdíl hladin se snížil o 25 cm oproti variantě bez dešťové nádrže. Dosažení rozdílu hladin je podmíněno snížením dna o 10 cm v nátokové galerii a oblasti česlí. Varianta s dešťovou nádrží je navržena pro stavbu. Dodatečná stavba dešťové nádrže by znamenala úsporu pouze 15 cm, jelikož snižování dna by pro značnou náročnost prací bylo nereálné.

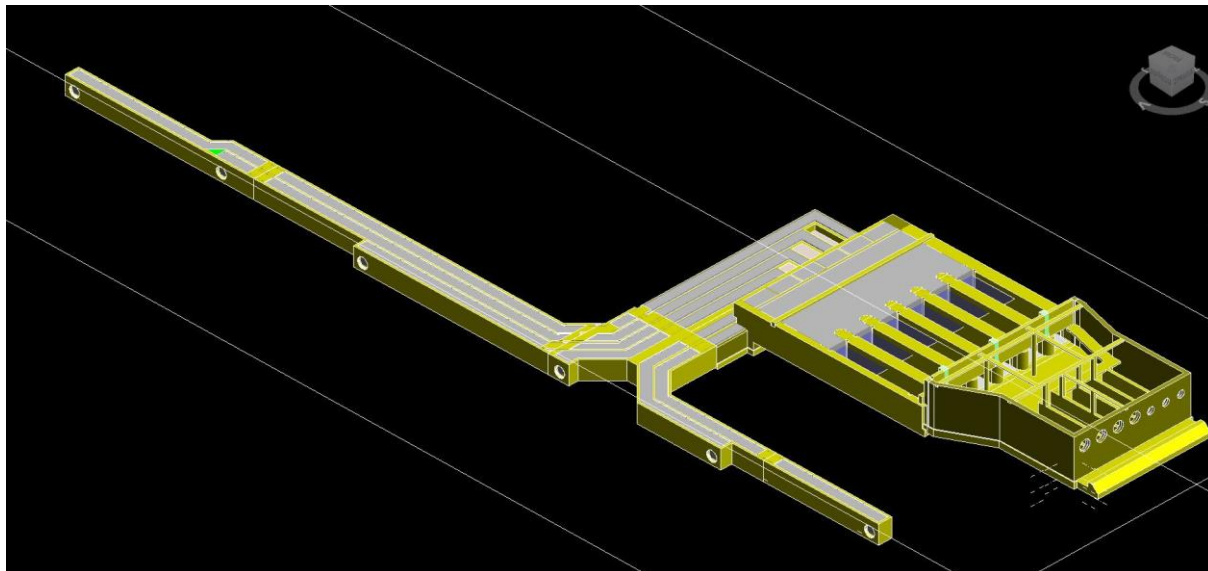
Pro různé provozní stavy byla také upravena poloha stavítek, které zajišťují průtočné velikosti otvorů do jednotlivých nádrží. Regulace stavítkami je provozně důležité opatření, jelikož se jimi reguluje i hladina nad rozdělovacím objektem a tím i rychlosti v tomto prostoru. Jedině správnou regulací je zajištěno dokonalé rozdělení průtoků a minimální potřeba energie na čerpání při každém provozním stavu.



Obrázek 6 Proudnic v rozdělovací galerii obarvené podle rychlosti pro provozní stav se dvěma odstavenými česlovými poli a jednou odstavenou usazovací nádrží

Vrácení optimalizované části do informačního modelu

Po simulacích je optimalizovaná geometrie pouze 3D objekt bez dalších informací. V informačním modelu tedy není vhodné nahradit stávající objekt s informacemi objektem bez informací. Výsledky optimalizace je vhodné implementovat do informačního modelu úpravou.



Obrázek 7 Náhled na provádění změn v BIM, informační model (žlutá) je upravován podle geometrie vzešlé z optimalizace (šedivá)

Úprava modelu je jednoduše proveditelná nahráním geometrie z optimalizace, která znázorňuje prostor, kde proudí voda. Stavební konstrukce pak obalují na tuto geometrii.

Data pro vrácení do informačního modelu musí obsahovat:

1. Soubor dwg obsahující optimalizovanou 3D geometrii objektu
2. Specifikace jednoho bodu společného bodu geometrie před a po optimalizaci pro prostorové ukotvení geometrie
3. Slovní popis změn

Ekonomické zhodnocení varianty s dešťovou nádrží

Varianta s dešťovou nádrží znamená zmenšení rozdílu hladin před a za rozdělovacím objektem o 30 cm. To při průměrném ročním průtoku 120 000 000 m³ znamená roční úsporu 327 000 MWh.

Vzorec na výpočet spotřeby energie:

$$E = P * t = \frac{\rho * g * h * Q * t}{\eta}$$

kde:

E je celková roční dodaná energie ve Wh

P	je příkon čerpadla
t	je čas v hodinách
ρ	je měrná hmotnost kapaliny
g	je gravitační zrychlení
h	je výtlačná výška v metrech
Q	je průtok v metrech krychlových za sekundu
η	je účinnost čerpadla

Při ceně elektrické energie 3 000 Kč za MWh činí roční úspora 981 000 Kč.

Potřebná velikost dešťové nádrže je spočtena ze sníženého průtoku pro jednu hodinu trvání maximálního možného průtoku. Velikost nádrže je tedy 3960 m³. Potřebné náklady na stavbu nádrže jsou stanoveny podle ukazatelů pro rok 2016 [10]. Ukazatele uvádí cenu na 1 m³ obestavěného prostoru. Pro dešťovou nádrž je cena stanovena 6 020 Kč v monolitickém betonovém provedení. Cena nezohledňuje místní podmínky, proto je následné finanční hodnocení pouze orientační.

Cena na výstavbu dešťové nádrže je 23 840 000 Kč.

Pro výpočet návratnosti investice je počítáno s diskontním parametrem ve výši 3 %. 3 % je také předpokládaná výše růstu cen elektrické energie. Proto se tedy diskontovaná doba návratnosti rovná čisté době návratnosti.

Doba návratnosti výstavby dešťové nádrže je 25 let při její realizaci během stavby Nové vodní linky. Při dostavbě dešťové nádrže k již hotové čistírně je doba návratnosti 42 let.

Závěr

Nově navrhované stavby ve vodním hospodářství s velkou pravděpodobností budou v budoucnosti zpracovávány v informačních modelech (BIM). Návrh v informačním modelu mimo jiné umožní i jednodušší práci na optimalizaci návrhu z hlediska hydrauliky. Díky propojení informačních modelů a simulačních programů (CFD) může být návrh zpracován kvalitněji. Pro otestování propojení modelů byla zpracována případová studie, v které se řešila varianta výstavby dešťové nádrže.

Studie ukázala na možné úspory při čerpání vod na Nové vodní lince Ústřední čistírny odpadních vod v Praze. Úspory jsou více zajímavé z energetického hlediska než z finančního. Roční úspora elektrické energie by byla 327 GWh, doba návratnosti 25 let.

Hlavním cílem studie ovšem bylo propojení modelů. Studie ukázala, že celý proces je citlivý na komunikaci mezi projektantem a výpočtářem. Důležitá je specifikace okrajových podmínek a prostoru pro změny. Pro přenos od projektanta k výpočtářovi na simulaci je nejvhodnější formát ifc a sat. Pro eliminaci chyb způsobených přenosem je vhodné model předat v obou formátech. Pro přenos optimalizované geometrie zpět projektantovi je nejvhodnější formát dwg.

Propojení návrhu se simulačními prostředky bylo úspěšně otestováno a ukazuje se jako velice výhodné pro další stavby.

Poděkování

Publikované výsledky byly dosaženy s podporou Studentské grantové soutěže SGS16/205/OHK1/3T/11 - Chytré řešení čistíren odpadních vod a TAČR TE02000077 Smart Regions – Buildings and Settlements Information Modelling, Technology and Infrastructure for sustainable Development

Access to computing and storage facilities owned by parties and projects contributing to the National Grid Infrastructure MetaCentrum, provided under the programme "Projects of Large Infrastructure for Research, Development, and Innovations" (LM2010005), is greatly appreciated.

Reference

- [1] ČERNÝ M. et al., BIM Příručka, Odborná rada pro BIM, 2013
- [2] ODBORNÁ RADA PRO BIM, Návaznost informačního modelování budov (BIM) na směrnici Evropského parlamentu a rady 2014/24/EU, Odborná rada pro BIM, 2014
- [3] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2014/24/EU
- [4] BALLANTYNE B., BIM is key to water industry aim of assembly not construction. Infrastructure Intelligence [online], 2014. Dostupné z: <http://www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2014/bim-key-water-industry-aim-assembly-not-construction>
- [5] NISBET, N., DINESEN B., THOMPSON, J. Thinking about BIM: Thinking about BIM executive guide to building information modelling. Great Britain: British Standards Institute, 2010
- [6] Milada Kozubková, Modelování proudění tekutin Fluent, CFX, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008
- [7] K. W. Morton, D. F. Mayers, Numerical Solution of Partial Differential Equations, Cambridge, 2005
- [8] Maršík F., Numerické metody mechaniky kontinua, ÚT AV ČR, 1990
- [9] CHANSON, H. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Elsevier Publishing, ISBN 0 7506 5978 5, 2004
- [10] ČESKÉ STAVEBNÍ STANDARDY, cenové ukazatele ve stavebnictví [online], 2016. Dostupné z: http://www.stavebnistandardy.cz/doc/ceny/thu_2016.html