

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering**

Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

**Kombinace numerického a fyzikálního modelování ve
výzkumu vodních staveb**

**Combination of Numerical and Physical Modelling in
Hydraulic Engineering Research**

Summary

Factors such as extremely high cost intensity and irreproducible nature of hydraulic structures are the main incentives for the application of hydraulic research methods. Hydraulic research has therefore become a significant part of the pre-planning phase of every large water project. The research costs usually reach lower-order figures than the costs induced by any additional structural remodelling or higher operating expenses. Presently, a growth in the demand for hydraulic research has occurred in connection with the increased investments into implementing the anti-flood measures, making the watercourses navigable and utilizing the hydropower. Numerical and physical modelling methods rank among the most essential tools of the hydraulic research.

Mathematical models for the shape optimization tasks in hydraulic engineering are based on the numerical approximation of Navier-Stokes flow equations as well as the continuity equations. Practical applications frequently use some of the turbulence models such as $k-\epsilon$ to simulate the turbulent flow. An indispensable role in the research of hydraulic structures have physical models, which still maintain their value due to the existence of a wide range of hydrodynamic phenomena, simulation of which, if restricted only to numerical models, has not been solved with a satisfactory level of reliability. Such problems include 3D unsteady free surface water flow, suspended load regime, bed distortion in the surrounding of the hydraulic facilities as well as verification of navigable conditions by means of nautical experiments using realistic craft models.

Experience gained in numerous practical applications indicates that the combination of numerical and physical modelling represents a useful approach towards a significant efficiency enhancement of the hydraulic research, which manifests itself particularly in the decrease in number of options that need to be tested on a hydraulic model in the laboratory.

Souhrn

Základní motivací pro aplikaci metod hydraulického výzkumu je rozsah, finanční náročnost a individuální charakter vodních staveb. Hydraulický výzkum je významnou součástí předprojektové přípravy významných vodních staveb. Náklady na výzkum jsou zpravidla řádově nižší než dodatečné úpravy konstrukcí, popř. zvýšené provozní náklady. V současné době lze zaznamenat rostoucí poptávku po hydraulickém výzkumu v souvislosti se zvýšenou investiční činností v oblasti protipovodňové ochrany, splavňování vodních toků a využívání vodní energie. Mezi základní prostředky hydraulického výzkumu patří metody numerického a fyzikálního modelování.

Matematické modely využívají pro úlohy optimalizace tvarového řešení vodních děl numerickou aproximaci Navier-Stokesových pohybových rovnic a rovnice kontinuity. Pro simulaci turbulentního proudění je v praktických aplikacích často používán některý turbulentní model, např. k- ϵ . Nezastupitelnou roli při výzkumu vodních staveb mají fyzikální modely, jejichž význam ani v současnosti neklesá. To je dáno existencí řady hydrodynamických jevů, jejichž simulace prostřednictvím numerických modelů není dostatečně spolehlivě dořešena. Mezi takovéto problémy lze zařadit 3D neustálené proudění vody s volnou hladinou, splaveninový režim a deformace dna v okolí objektů vodních děl a ověření plavebních podmínek formou nautických experimentů s modely reálných plavidel.

Zkušenosti z řady praktických aplikací naznačují, že kombinace numerického a fyzikálního modelování představuje užitečný přístup ve smyslu výrazného zefektivnění výzkumu vodních staveb, které se projevuje zejména ve snížení počtu testovaných variant na hydraulickém modelu v laboratoři.

Klíčová slova

hydraulický výzkum, fyzikální model, numerický model, vodní stavby

Keywords

hydraulic research, physical model, numerical model, hydraulic structures

Obsah

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Klíčová slova	4
Keywords	4
Obsah.....	5
1. Úvod	6
2. Matematické modely	6
3. Fyzikální modely	10
4. Kombinace matematického a fyzikálního modelování	11
5. Závěry	22
Seznam použité literatury	23
Dr. Ing. Pavel Fošumpaur	24

1. Úvod

Vodní stavby a speciálně stavby hydrotechnické se vyznačují zejména svým velkým rozsahem, finanční náročností a individuálním charakterem. Vzhledem k těmto skutečnostem je vhodné věnovat jejich spolehlivému návrhu patřičnou pozornost již v počátečních fázích projektové přípravy, kdy je třeba hledat řešení, které zajistí naplnění jejich projektovaných účelů a současně minimalizuje možné provozní problémy a náklady. Zkušenosti dokazují, že podcenění předprojektové přípravy může vést k nevhodnému návrhu konstrukcí vodních děl, kdy projektované parametry nejsou naplněny a dodatečná úprava je zpravidla finančně velmi nákladná a řádově převyšuje finanční náročnost hydraulického výzkumu. Individuální charakter vodních staveb je dán skutečností, že v podstatě neexistují dvě stejná vodní díla se stejnými hydrologickými, technickými, morfologickými a dalšími podmínkami. Souhrn poznatků o funkci vodních děl v jedné lokalitě je proto obtížně přenositelný pro návrh dalších vodních děl stejného typu.

Významnou úlohu v rámci předprojektové přípravy vodních staveb představují metody hydraulického výzkumu, které umožňují optimalizovat jejich funkci v předstihu. Mezi základní prostředky patří metoda matematického a fyzikálního modelování. Předložený příspěvek diskutuje základní předpoklady a principy obou modelovacích technik v rámci optimálního návrhu vodních staveb a zaměřuje se na jejich kombinaci, která může přinést výrazné zefektivnění výzkumu.

2. Matematické modely

Teoretickým základem matematických modelů proudění vody v okolí vodních staveb je hydrodynamika, která se začala rozvíjet od poloviny 18. století zásluhou objevů D. Bernoulliho a L. Eulera. Pro úlohy optimalizace tvarového řešení vodních děl obtékaných vodním proudem tvoří teoretický základ řídicí rovnice pro 3D proudění dané rovnicí zachování hmoty (kontinuity) a rovnicí zachování hybnosti

(pohybové rovnice). Odvození rovnice kontinuity vychází z diferenciálního zápisu zákona zachování hmoty v bilancovaném objemu, podle kterého je hmotnostní výtok tekutiny z bilancovaného objemu je roven úbytku hmotnosti v tomto objemu za jednotku času. Základní tvar **rovnice kontinuity** je:

$$\frac{\partial \rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\mathbf{r}, t) \mathbf{u}(t)] = 0 \quad (1)$$

Pro nestlačitelnou tekutinu zavedeme předpoklad konstantní hustoty $\rho(\mathbf{r}, t) = \text{konst.}$ a rovnice kontinuity má po složkách tvar:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Pohybové rovnice skutečné kapaliny vycházejí ze zobecnění Eulerových rovnic pro ideální kapalinu zavedením sil vnitřního tření. Pohybové rovnice skutečné kapaliny uvažují vliv viskozity a nazývají se **Navier-Stokesovy rovnice**:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= a_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= a_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= a_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

kde μ [Pa.s] je dynamická viskozita. Navier-Stokesovy rovnice mají v kartézských souřadnicích tvar:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} u_j = a_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (4)$$

Aplikace rovnice Navier-Stokesovy na turbulentní proudění však není často prakticky uskutečnitelná, neboť naráží na výpočetní potíže

ve fázi aproximace soustavy parciálních diferenciálních rovnic numerickými metodami, které by musely popsat všechny (i ty nejmenší) víry a turbulence. Z uvedeného důvodu se pro popis turbulentního proudu zpravidla využívá statistického přístupu, který vychází z principu rozdělení rychlostí na střední časově vyhlazenou složku a pulzační složku.

Podle teorie turbulentního proudění se rychlost tekutiny, tlak a jiné veličiny nepravidelně mění v čase. Okamžitá rychlost turbulentního proudění v libovolném bodě se skládá ze střední (časově vyhlazené) rychlosti $\bar{u}_i$ a z flukтуаční (pulzační) rychlosti u_i' podle rovnice:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i', \quad (5)$$

Podobně pro tlak platí:

$$p = \bar{p} + p' \quad (6)$$

Po časovém vyhlazení Navier-Stokesovy rovnice ve tvaru (4) podle vztahů (5) a (6) vznikne **Reynoldsova rovnice** pro turbulentní proudění skutečné kapaliny:

$$\rho \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} - \mu \nabla \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} + \rho \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{p} + \nabla \left(\overline{\rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}'} \right) = \mathbf{F} \quad (7)$$

kde $\mathbf{F}$ je jednotková objemová síla. V našem případě $F_x = F_y = 0$
a $F_z = -g \cdot \rho$

Turbulentní složka je pak aproximována pomocí tzv. turbulentního napětí a jednotlivé turbulentní modely se vzájemně odlišují právě způsobem jejich popisu. V praktických aplikacích je často používán $k-\varepsilon$ turbulentní model, který patří v současnosti mezi nejoblíbenější, z důvodu relativní jednoduchosti a dostatečné spolehlivosti řešení pro většinu inženýrských úloh.

Turbulentní transport hybnosti v $k-\varepsilon$ modelu je dán vztahem:

$$\begin{aligned} \overline{(\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}')} &= -\nu_T (\nabla \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T) \\ \nu_T &= C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (8)$$

kde ν_T je turbulentní viskozita a C_μ je modelová konstanta (viz níže). Tento předpoklad vede na následující tvar pohybové rovnice a rovnice kontinuity:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) (\nabla \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T) \right] + \rho \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{p} &= \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Transportní rovnice turbulentní kinetické energie je dána rovnicí:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \rho \frac{C_\mu}{\sigma_k} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla k \right] + \rho \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla k = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla \bar{\mathbf{u}})^2 - \rho \varepsilon \quad (10)$$

a rovnice disipace turbulentní energie ε :

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \rho \frac{C_\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \varepsilon = \rho C_{\varepsilon 1} C_\mu k (\nabla \bar{\mathbf{u}})^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

K - ε model obsahuje tyto konstanty, které byly odvozeny experimentálním výzkumem:

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0,09	0,1256	1,92	1,0	1,3

K - ε model je aproximací turbulentního režimu podle Reynoldsových rovnic a je vhodný pro vysoké hodnoty Reynoldsova čísla. Model poskytuje zjednodušený přístup, neboť zavádí pouze dvě další proměnné pro popis turbulentního proudu. Z uvedeného důvodu

je velmi často aplikován na řadu inženýrských úloh, kde je nezbytný popis turbulentního režimu ve 2D a 3D schematizaci.

Systém rovnic popisujících 3D turbulentní proudění skutečné kapaliny podle rovnic (9) až (11) není prakticky řešitelný analytickými postupy a řešení proto zpravidla vychází z numerického popisu. Pro numerickou aproximaci rovnic se zpravidla využívá metoda konečných prvků, jejíž výhodnost zpravidla převažuje nad aplikací metody konečných diferencí. Při řešení je dále důležitá volba vhodných okrajových podmínek na hranicích oblasti proudění, které vyjadřují charakter interakce hranice s proudící kapalinou.

3. Fyzikální modely

Výzkum vodních staveb na fyzikálních modelech je nejčastěji realizován prostřednictvím tzv. hydraulických modelů, které vycházejí z mechanické podobnosti proudění vody na zmenšeném modelu v laboratoři a ve skutečnosti. Ostatní typy fyzikálních modelů využívají analogie výzkumu proudění vody s jinými médii, kterým může být např. vzduch – aerodynamické modely. Hydraulický výzkum vodních děl je u nás využíván od prvních desetiletí minulého století. Největší rozvoj zaznamenal v souvislosti s výstavbou významných vodních děl po druhé světové válce, kdy např. sloužil pro optimalizaci vodních děl na Vltavské kaskádě. Ani v současnosti význam hydraulického modelování neklesá, což je dáno existencí řady hydrodynamických jevů, jejichž simulace prostřednictvím matematických modelů není dostatečně spolehlivě dořešena. Mezi takovéto problémy lze zařadit 3D neustálené proudění vody s volnou hladinou, splaveninový režim a deformace dna v okolí objektů vodních děl a ověření plavebních podmínek formou nautických experimentů s modely reálných plavidel.

Obecné zákony mechanické podobnosti hydrodynamických jevů na zmenšeném modelu a ve skutečnosti lze odvodit z matematického popisu proudění (rovnice Navier-Stokesovy) nebo z rozměrové analýzy příslušného hydrodynamického jevu. Ve výzkumu vodních staveb se nejčastěji uplatní **Froudův zákon** mechanické podobnosti, u kterého

jsou podmínky mechanické podobnosti hydrodynamických jevů vyjádřeny za výhradního působení gravitačních sil.

$$Fr = \frac{v_s^2}{g \cdot l_s} = \frac{v_m^2}{g \cdot l_m} = \text{idem} \quad (12)$$

kde v je rychlost proudění vody a l je délkový rozměr ve skutečnosti, resp. na modelu.

Kromě gravitačních sil však mohou zkoumané proudění ovlivňovat i další síly – odpor třením viskózní kapaliny, síly kapilární, síly objemové pružnosti apod. Podle Froudova zákona podobnosti můžeme určitý hydrodynamický jev zkoumat tehdy, jestliže účinky těchto sil jsou zanedbatelné v porovnání s gravitačními silami. Mezní podmínky vymezují oblasti a měřítka, v nichž lze hydrodynamický jev modelovat. Kromě těchto podmínek je třeba dodržet na modelu stejný režim turbulentního proudění jako ve skutečnosti, kdy proudění musí být v kvadratické oblasti, kde ztráty třením již nejsou funkcí Reynoldsova čísla.

4. Kombinace matematického a fyzikálního modelování

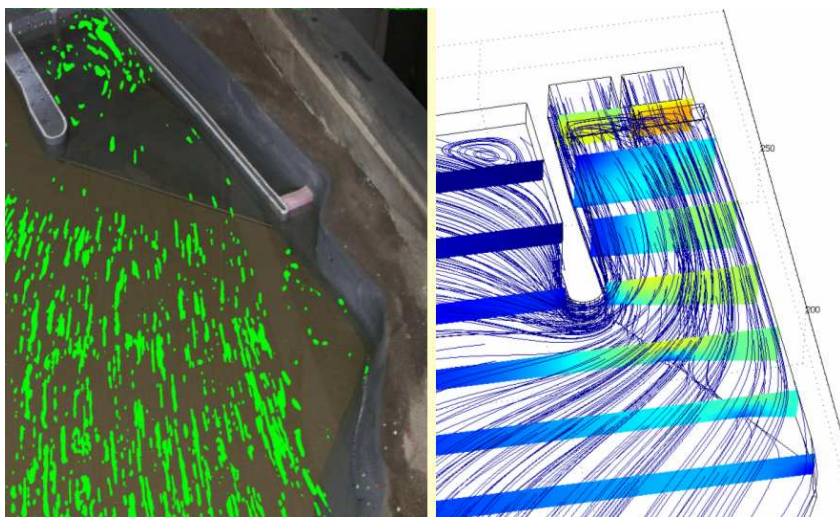
Kombinace numerického a fyzikálního modelování využívá výhody obou využitých přístupů výzkumu vodních staveb. Někdy se hovoří o tzv. hybridním modelování. V rámci výzkumu je zkoumaný hydrodynamický jev napřed popsán pomocí matematického modelu a optimální hydraulické řešení obtékaných konstrukcí je řešeno simulací určitého počtu variant. Výsledné řešení je potom ověřeno na hydraulickém modelu v laboratoři a v případě potřeby upřesněno. Tento přístup vede k omezení počtu zkoumaných variant na hydraulickém modelu a tedy k úspoře finančních nákladů a k menší časové náročnosti výzkumu.

Vodní dílo Děčín

V rámci komplexního hydraulického výzkumu pro připravovanou

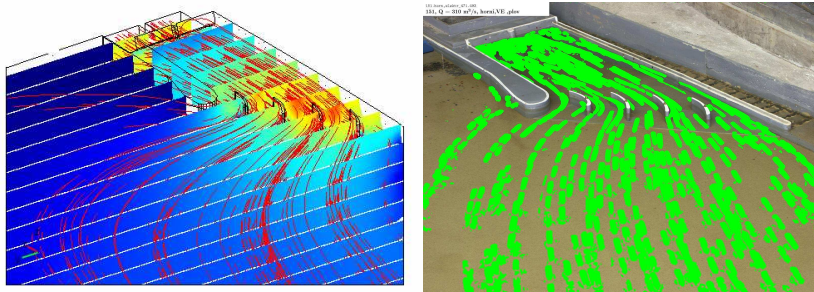
investiční akci „Zlepšení plavebních podmínek řeky Labe od Střekova po státní hranici ČR/SRN“ je zkoumán ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G.Masaryka rozsáhlý soubor problémů s cílem optimálního návrhu plavebního stupně Děčín (původně Prostřední Žleb) z hlediska jeho hydraulické funkce, bezpečnosti plavebního provozu a bezpečnosti vodního díla samotného. K tomu účelu byl vybudován ve velké hale hydraulické laboratoře hydraulický model plavebního stupně v měřítku geometrického zmenšení 1:70, znázorňující jez o třech polích, plavební komoru s rejdami a přilehlé úseky horní a dolní zdrže v celkové délce 2,7 km.

Technologie matematického modelování umožnila v předstihu otestovat velké množství variant tvarového řešení optimalizovaných konstrukcí z hlediska hydrodynamických poměrů. Cílem byla zejména optimalizace vtokového objektu vodní elektrárny (VE) s cílem snížení turbulencí a úplavů, které snižují celkovou účinnost systému. Na obr. 1 je znázorněno porovnání proudového pole ve vtokovém objektu VE pro základní variantu pomocí hydraulického a matematického modelu.



Obr. 1 Proudové pole ve vtokovém objektu VE Děčín a) na hydraulickém modelu, b) na matematickém modelu.

V rámci výzkumu na matematickém modelu byl dále optimalizován tvar, umístění a počet usměrňovacích pilířků ve vtokovém objektu s cílem zabránit nerovnoměrnému natékání obou turbín VE (obr. 2).



Obr. 2 Optimalizace usměrňovacích pilířků a) matematický model, b) ověření na hydraulickém modelu.

Součástí výzkumu na 3D matematickém modelu bylo posouzení proudových poměrů v oblasti vstupu a výstupu z kanálového rybiho přechodu s ohledem na zachování vhodných podmínek pro migraci ryb.

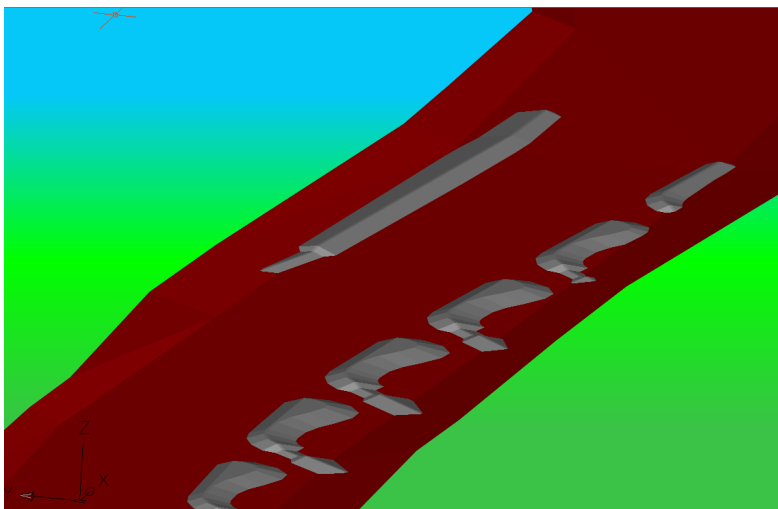
Balvanité výhony na dolním Labi

Návrh balvanitých výhonů řeší zlepšení plavebních podmínek v úseku pod plánovaným plavebním stupněm Děčín po státní hranici ČR/SRN. V rámci výzkumu byla pozornost zaměřena na ověření funkce balvanitých výhonů v rámci pilotního úseku pl. km 101,90 – 102,45, který byl zvolen jako reprezentativní část s možností spolehlivé extrapolace dosažených výsledků na ostatní části dolního Labe. Výzkum byl prioritně zaměřen na problematiku interakce balvanitých výhonů a šterkových náplavů v souvislosti s jejich zanášením a vlivem na šterkomilná společenstva. Výzkum dále ověřil stabilitu balvanitých výhonů za zvýšených průtoků. Hlavní cíle výzkumu byly z tohoto pohledu následující:

- zjištění rychlosti proudění vody kolem výhonů, a to jak z vnitřní, tak z vnější strany,

- zjištění unášecí schopnosti proudu a sedimentačního potenciálu plavenin v prostoru za výhony,
- stanovení předpokladů chování plavenin a splavenin v okolí výhonů v rozsahu různých průtoků v Labi.

Posouzení proudových poměrů bylo napřed provedeno pomocí 3D matematického modelu, který umožnil optimalizovat tvarové řešení výhonů. Jejich základní funkce spočívá v soustředění proudu vody během minimálních plavebních průtoků do plavební dráhy a zvýšení plavební hloubky na požadovanou úroveň. Z pohledu environmentálního byla pozornost zaměřena na omezení nežádoucí sedimentace v prostoru mezi břehem a výhony. Za tím účelem byl postupnou optimalizací navržen tvar výhonu dle obr. 3. Výhony obsahují v koruně lokální depresi (průleh), který při zvýšených průtocích soustřeďuje proud vody vtékající do prostoru za výhonem. Dále je navržená konstrukce výhonu charakteristická postupným rozšiřováním koruny (zužováním prostoru za výhony), což umožňuje zachovat dostatečnou rychlost proudění, která brání sedimentaci plavenin. V další etapě bylo navržené konstrukční a tvarové řešení ověřováno na hydraulickém modelu v laboratoři v měřítku geometrické podobnosti 1:50 (viz obr. 4).



Obr. 3 Optimalizovaný tvar soustředovacích výhonů v pilotním úseku.



Obr. 4 Hydraulický model soustředovacích výhonů v laboratoři.

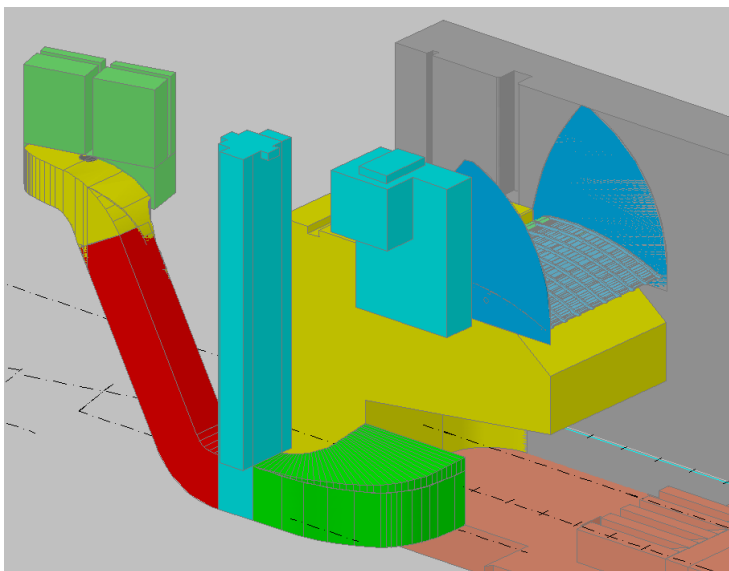
Funkce soustředovacích výhonů byla měřením na hydraulickém modelu prokázána a byly současně vyhodnoceny rychlostní poměry v prostoru mezi výhony a břehem. Na základě těchto měření byl posouzen splaveninový režim za výhony. Na obr. 5 je fotografie z realizace soustředovacích výhonů v pilotním úseku dolního Labe v roce 2009.



Obr. 5 Realizace výhonů v pilotním úseku dolního Labe.

Plavební komora České Vrbné

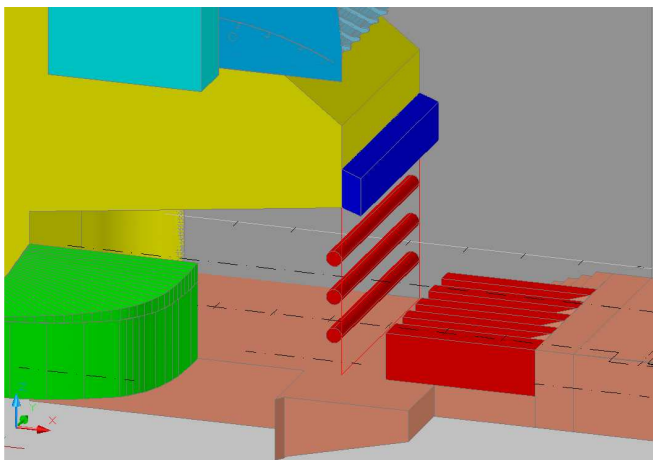
V roce 2008 byl na Katedře hydrotechniky proveden hydraulický výzkum plnění a prázdnění plavební komory České Vrbné. Mezi hlavní cíle výzkumu patřilo posouzení a optimalizace funkce plnění krátkého obtoku s ohledem na proudové pole v horním ohlavi, oblasti vyústění obtoků a dále v plavební komoře s vlivem na stabilitu plavidel v komoře a tlumení kinetické energie. V rámci přípravného výzkumu na 3D matematickém modelu byla navržena základní koncepce plnění plavební komory, která vychází z realizace jednostranného krátkého obtoku systémem podzáporníkového plnění dle obr. 6. Výzkum byl realizován v úzké spolupráci s generálním projektantem firmou Hydroprojekt CZ, a.s.



Obr. 6 Schéma systému plnění plavební komory České Vrbné.

Kritériem pro přijetí koncepce plnění byly hodnoty rychlostí na počátku užité délky plavební komory s cílem omezit vliv na proplavovaná plavidla. Pro utlumení kinetické energie bylo na hydraulickém modelu v geometrickém měřítku 1:15 testováno celkem 11 variant tlumících prvků. Jako optimální byla vyhodnocena varianta

se třemi vodorovnými válcovými prvky na konci tlumící komory a deflektorem (obr. 7). Varianta je současnosti realizována firmou Metrostav, a.s. Na obr. 8 je fotografie z realizace v dubnu 2010.



Obr.7 Optimální varianta tlumení kinetické energie.



Obr. 8 Realizace tlumící komory v lokalitě (2010).

Plavební stupeň České Vrbné

Hydraulický výzkum plavebního stupně (PS) České Vrbné byl realizován na Katedře hydrotechniky v letech 2008 až 2009 a výzkum navázal na optimalizaci objektu plavební komory. Cílem řešení bylo ověření a optimalizace dispozičního uspořádání plavebního stupně. Dispoziční model PS České Vrbné byl umístěn ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Na obr. 9 je znázorněno schéma plavebního stupně s vyznačením jednotlivých objektů.



Obr. 9 Situace plavebního stupně České Vrbné.

Měřítko geometrické podobnosti bylo zvoleno 1:50 a model obsahoval klapkový jez o dvou polích, plavební komoru s rejdy a přilehlými úseky horní a dolní zdrže, vodní elektrárnu na levém břehu, ochranný přístav na levém břehu a vjezd a výjezd ze slalomové dráhy.

Hydraulický model byl koncipován s pohyblivým dnem. Výzkum se zaměřil na posouzení povodňového režimu a vlivu realizace jednotlivých objektů na odtokové poměry, dále výzkum vyhodnotil deformace dna v okolí objektů a návrh jejich stabilizace z hlediska tvorby výmolů a významnou součástí experimentů byly nautické zkoušky, které ověřily a optimalizovaly plavební podmínky pro soubor různých plavebních průtoků.

Na následujícím obr. 10 je znázorněn hydraulický model plavebního stupně se všemi objekty v měřítku geometrické podobnosti 1:50. Celkový rozsah modelu představuje délku cca 1 km ve skutečnosti, tedy 20 m v laboratoři.

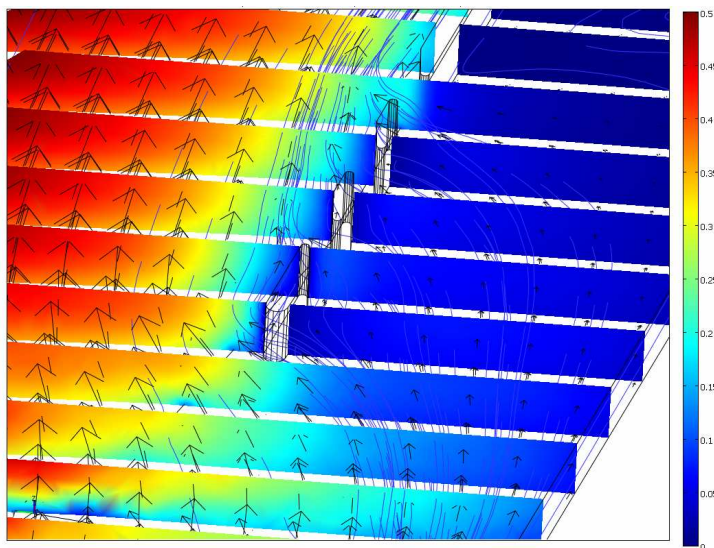


Obr. 10 Hydraulický model plavebního stupně České Vrbné.

Samostatnou úlohou je návrh vhodné délky dělicí zdi horní a dolní rejdy plavební komory. Pro potřeby posouzení byl napřed připraven matematický 3D model proudění v rozsahu horní zdrže, který obsahuje úsek od osy jezu 375 m proti proudu. Největší hodnoty příčných rychlostí v oblasti zhlaví dělicí zdi horní rejdy lze očekávat při maximálním plavebním průtoku (obr. 11). Jeho hodnota byla stanovena na $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dle Čábelky (1976) hrozí v místě vjezdu do horní rejdy řada problémů, mezi které se řadí zejména:

- překročení příčné složky $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na vjezdu do horní rejdy,
- podemílání přední části dělicí zdi,
- omezení kapacity přilehlého jezového pole při povodních.

V minulosti došlo na středním Labi k několika nebezpečným podemlétím předního zhlaví horní dělicí zdi rejdy plavební komory, které muselo být sanováno (Kostelec n. L., Kostomlátky, Srnojedy). V roce 1946 se dokonce na zdymadle Klavary zřítla velká část horní dělicí zdi rejdy komory. Z uvedených důvodů bylo doporučeno aplikovat na základě předchozích výzkumů úpravu předního zhlaví dělicí zdi průtočnými otvory. Ty jsou tvořeny třemi pilířky upravenými jako hydraulicky vhodné usměrňovací stěny.



Obr. 11 Matematická simulace proudění u zhlaví zdi horní rejdy.

Navržená koncepce dělících zdí rejd plavební komory byla následně testována pro soubor průtokových scénářů na hydraulickém modelu v měřítku 1:50 (viz obr. 12). Na obr. 13 je fotografie z realizace horní dělící zdi z dubna 2010.



Obr. 12 Hydraulický model dělící zdi horní rejdy.



Obr. 13 Realizace dělící zdi horní rejdy (duben 2010).

Součástí hydraulického výzkumu plavebního stupně České Vrbné byly nautické experimenty, které obecně představují jednu z nejspolehlivějších metod pro posouzení bezpečnosti a plynulosti plavebního provozu již ve fázi předprojektové přípravy. Princip nautických experimentů spočívá v simulování pohybu plavidel pomocí jejich rádiem řízených modelů. Technologie nautických experimentů pak umožňuje v případě nepříznivých interakcí proudění vody a plavidel optimalizovat dispoziční uspořádání plavebního stupně, popř. technické řešení jednotlivých funkčních objektů.

Nautické experimenty byly v minulosti využity pro optimalizaci řady významných plavebních stupňů a zařízení. Jedná se např. o modelové výzkumy plavebních podmínek na dolním Labi, který byl realizován ve VÚV, T. G. M., v.v.i. s měřítkem geometrické podobnosti 1:70. Na Katedře hydrotechniky Fakulty stavební ČVUT v Praze byl v roce 1993 realizován výzkum vlivu provozu vodní elektrárny Štvanice na plavbu (měřítko modelu 1:60). V roce 1998 až 1999 byl ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT realizován výzkum vodního díla Přelouč (měřítko 1:50) a v letech 2008 až 2010 probíhají výzkumy vodních děl České Vrbné, Hluboká nad Vltavou a Hněvkovice.

5. Závěry

V rámci předloženého příspěvku byly představeny základní metody hydraulického výzkumu vodních staveb, které byly doloženy několika konkrétními aplikacemi realizovanými v posledních letech na Katedře hydrotechniky, Fakulty stavební ČVUT v Praze. Základní poznatky lze shrnout do následujících bodů:

1. Hydraulický výzkum je významnou součástí předprojektové přípravy významných vodních staveb. Náklady na výzkum jsou zpravidla řádově nižší než dodatečné úpravy konstrukcí, popř. zvýšené provozní náklady. V současné době lze zaznamenat rostoucí poptávku po hydraulickém výzkumu v souvislosti se zvýšenou investiční činností v oblasti protipovodňové ochrany, splavňování vodních toků a využívání vodní energie.
2. Pro správnou interpretaci výsledků výzkumu má zásadní význam znalost výchozích předpokladů a rozsah platnosti matematických modelů, resp. numerické aproximace řídicích rovnic. Podobně při výzkumu pomocí fyzikálních modelů (zpravidla hydraulických) je zásadní znalost mezních podmínek mechanické podobnosti.
3. Zkušenosti z řady praktických aplikací naznačují, že kombinace numerického a fyzikálního modelování představuje užitečný přístup ve smyslu výrazného zefektivnění výzkumu vodních staveb, které se projevuje zejména ve snížení počtu testovaných variant na hydraulickém modelu v laboratoři.

Seznam použité literatury

1. Čábelka, J., Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (1), Výzkum na hydraulických a ve skutečnosti. Academia Praha 1987.
2. Čábelka, J.: Vodní cesty a plavba, SNTL Praha 1976.
3. Čihák, F., Medřický, V.: Navrhování jezů, Vydavatelství ČVUT, Praha 1991.
4. Femlab 3.0, Users Guide, COMSOL AB., 2004.
5. Fošumpaur, P., Králík, M., Zukal, M.: Hydraulický výzkum plavebního stupně České Vrbné. Závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2009.
6. Fošumpaur, P., Králík, M., Zukal, M.: Hydraulický výzkum plnění a prázdnění plavební komory České Vrbné. Závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2008.
7. Fošumpaur, P., Králík, M., Zukal, M.: Posouzení a optimalizace balvanitých výhonů na Labi v úseku pl. Km 101.90-102.45 pomocí hydraulického modelu. Závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2008.
8. Gabriel, P., Fošumpaur, P., Libý, J.: Hydraulický výzkum plavebního stupně Děčín, Výzkum elektrárny a rybích přechodů. Závěrečná zpráva, VÚV T.G.M., v.v.i., 2007.
9. Gabriel, P., Grandtner, T., Průcha, M., Výbora, P.: Jezy, SNTL, Praha 1989.
10. Holata, M.: Malé vodní elektrárny, ed.: Pavel Gabriel, Academia, Praha 2002.
11. Hunter, S.C.: Mechanics of Continuous Media, Ellis Horwood, Chichester, England 1976.
12. Kolář, V., Patočka, C., Bém, J.: Hydraulika, SNTL, Praha 1983.
13. Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve, D.E.: Hydraulic Modelling - An Introduction, Taylor and Francis, 2010.
14. Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R.: Hydraulic structures, Fourth edition, Taylor and Francis, 2007.
15. Wilcox, D.: Turbulence Modeling for CFD, 2nd edition, DCW Industries Inc., 1998.

Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Osobní údaje

Jméno a příjmení: Pavel Fošumpaur

Datum narození: 4. 4. 1972

Národnost: česká

Státní příslušnost: ČR

Email: fosumpaur@fsv.cvut.cz

Vzdělání

1990 – 1995: ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
obor Vodní hospodářství a vodní stavby, (Ing.)

1996 – 1998: postgraduální studium,
ČVUT Praha, Fakulta stavební,
obor Vodní hospodářství a vodní stavby (Dr.)

1998: studijní pobyt na Heriot - Watt University,
Edinburgh, Velká Británie.

2008: ERASMUS kurz „Environmental Risk due to
Natural Hazards“ Università degli Studi di Firenze

Zaměstnání

1999 – dosud: odborný asistent, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

2006 – dosud: zástupce vedoucího Katedry hydrotechniky

Odborná činnost

2004 – 2005: expert Ministerstva zemědělství ČR v rámci
programu 229 113 „Odstraňování následků
povodně z roku 2002“.

2006 – 2008: expert Ministerstva zemědělství ČR v rámci
programu 229 114 „Odstraňování následků
povodně z roku 2006“.

2004 – dosud: strategický expert Ministerstva zemědělství ČR a
Evropské investiční banky v rámci programu
129 120 „Prevence před povodněmi“.

2007 – dosud: strategický expert Ministerstva zemědělství ČR v
rámci programu 129 130 „Podpora obnovy,

odbahnění a rekonstrukce rybníků a
výstavby vodních nádrží“.

Odborné zaměření

Hospodaření s vodními zdroji a teorie nádrží vodohospodářských soustav, hydrotechnické stavby, hydraulický výzkum vodních děl, hydraulika říčních koryt, hydraulika podzemní vody.

Významné výzkumné projekty – odpovědný řešitel

- 1999 – 2001: GA103/99/D031 - Fošumpaur, P.: Aplikace umělé inteligence ve výzkumu extrémních hydrologických jevů. Poskytovatel: GA ČR.
- 2002 – 2004: GP103/02/D049 - Fošumpaur, P.: Návrh modelů řízení ve vodním hospodářství a jejich optimalizace. Poskytovatel: GA ČR.
- 2007 – 2009: GA103/07/1620 - Fošumpaur, P.: Predikční a simulační modely v teorii operativního řízení vodohospodářských soustav. Poskytovatel: GA ČR.
- 2008: Posouzení a optimalizace balvanitých výhonů na Labi v úseku pl. km 101,90 – 102,45 pomocí hydraulického modelu. Ředitelství vodních cest ČR.
- 2008: Hydraulický výzkum plnění a prázdnění plavební komory České Vrbné. Ředitelství vodních cest ČR.
- 2008 – 2009: Hydraulický výzkum plavebního stupně České Vrbné. Ředitelství vodních cest ČR.
- 2009: Hydraulický výzkum vlivu MVE Sokolský ostrov v Českých Budějovicích na plavební poměry v obratišti pod Jiráskovým jezem. AQUA ENERGIE.
- 2009 – 2010: Modelový výzkum plavebního stupně Hněvkovice Ředitelství vodních cest ČR.

Publikační činnost za posledních 10 let

2 monografie ČR, 6 článků v mezinárodních recenzovaných časopisech, 23 příspěvků na mezinárodních konferencích, 9 článků v tuzemských časopisech, 45 příspěvků na tuzemských konferencích, 4 uplatněné certifikované metodiky.