

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Ing. Petr Valenta, CSc.

Využití numerických modelů proudění vody v protipovodňové ochraně

Numerical Simulation Models in the Flood Protection

Summary

Experiences resulting from the extreme flood events in the Czech Republic during last years have stressed the necessity of further development and practical evaluation of suitable methodologies enabling more detailed investigation of flood flow characteristics. Various numerical models and modeling techniques can be used and are continuously developed and improved according to the growing performance of computer technique.

One-dimensional (1D), quasi-twodimensional (1,5 D), two-dimensional (2D) or three-dimensional (3D) variants of numerical models can be used. Classical approach to the numerical modeling of flood events is based on the application of various types of 1D models. These models enable the estimation of longitudinal water elevation distribution along the river axis for the flood peak discharge (steady case calculation), or the analyses of the flood wave propagation (unsteady simulation). Flooding lines estimation and their official delimitation in the Czech Republic was previously (and in most cases still is) based on the application of 1D modeling technology.

Current trends in the field of numerical modeling of flood events are oriented towards the development and practical utility of more dimensional models. While 3D models are still too demanding to be used for flood flow modeling, quasi-2D and 2D models can be more widely used to solve larger practical problems even on personal computers nowadays. These complex models can provide results of substantially higher quality in comparison with 1D modeling tools. Together with the water elevation distribution 2D models provide a lot of other detailed information not available in the classical 1D numerical model output (i.e. the flow pattern evaluation, streamlines, distribution of velocity magnitudes and directions (velocity fields), streamlines, etc.), which is a highly important information necessary for hydraulic and other follow-up (flood risk, flood damage) analyses of flood events and for the appropriate design of flood mitigation measures and flood protection works.

The applicability and advantages of this modeling approach for simulating extreme flood flow situations with a view to optimize the resulting flood mitigation measures in floodplains with complex geometry, and in urban areas, are illustrated by the results of a pilot study in Choceň and Ústí nad Orlicí, towns which were severely affected during the 1997 and 1998 floods in the Czech Republic. The results document the current potential of very detailed and non-simplified numerical models of flood flow in domains with very complex geometry and in urban areas. Analog studies can be directly applied to practical problems encountered in water management and land-use planning, e.g. in formulation of guidelines for land use in flooded areas, categorization of flood planes, preparation of municipal plans, evaluation of impacts of human activities in flood plains on flood flow conditions and elaboration and evaluation of flood control projects.

Souhrn

Zkušenosti z průběhu extrémních povodní v minulosti i v poslední době prokazují naléhavou potřebu dalšího výzkumu v oblasti předpovídání a detailního zkoumání podmínek průchodu povodní koryty řek a k nim přilehlým inundačním územím. Ke zkoumání uvedené problematiky se v současné době využívají především různé numerické modely, které jsou s rostoucími možnostmi výpočetní techniky neustále rozvíjeny a zdokonalovány. Při numerickém modelování lze obecně vycházet z jednorozměrného (1D), kvazi-dvourozměrného (1,5D), dvourozměrného (2D) či třírozměrného (3D) přístupu.

Klasický přístup k numerickému modelování povodňových situací spočívá v aplikaci různých typů jednorozměrných modelů, které umožňují stanovení podélných profilů hladin podél osy toku při kulminačních povodňových průtocích, resp. při nestacionárním řešení stanovení postupu simulované povodňové vlny modelovaným úsekem toku. Na základě aplikace metodiky jednorozměrného modelování v minulosti byly a nadále jsou v České republice zpracovávány hydrotechnické studie určené ke stanovení a vyhlášení zátopových území pro vodní toky.

Současný rozvoj v oblasti numerického modelování povodňových situací se orientuje na vývoj a aplikaci vícerozměrných numerických modelů, zejména modelů dvourozměrných. Důvodem je skutečnost, že výstupem těchto podstatně komplikovanějších modelů jsou kromě základních informací o poloze hladiny mnohé další údaje, které jednorozměrné modely v potřebné kvalitě a spolehlivosti neposkytují – jedná se například o informace o celkovém charakteru proudového pole, způsobu obtékání jednotlivých překážek, informace o hloubkách vody a o směrech a velikostech rychlostí v celém rozsahu modelované oblasti, informace o vlivu jednotlivých existujících staveb a objektů na proudové pole apod., což jsou právě takové údaje, které mají pro analýzu povodňových situací a následné kvalifikované plánování a rozhodování mimořádný význam.

Využitelnost a výhody detailního dvourozměrného přístupu k modelování extrémních povodňových situací v geometricky složitých a urbanizovaných inundačních územích jsou dokumentovány s využitím výstupů pilotní studie v oblasti měst Choceň a Ústí nad Orlicí, která byla těžce postižena v průběhu povodňových událostí, ke kterým došlo v České republice v letech 1997 a 1998. Uvedená ukázka výsledků vývoje podrobného dvourozměrného modelu proudění vody dokládá současné možnosti detailního numerického modelování proudění vody a jeho význam při řešení praktických problémů územního plánování a správy vodních toků, jakými jsou např. formulace zásad využívání záplavových území, zpracování kategorizace inundačních území, zpracování územních plánů, posuzování vlivů důsledků lidské činnosti na průchod povodní, rozpracování povodňových plánů a navrhování a optimalizace účinných opatření proti povodním.

Klíčová slova : numerické modelování, proudění vody v otevřených korytech, ochrana proti povodním

Keywords: numerical modeling, open channel water flow, flood protection

České vysoké učení technické v Praze

Název: Využití numerických modelů proudění vody
v protipovodňové ochraně

Autor: Ing. Petr Valenta, CSc.

Počet stran: 26

Náklad: 150 výtisků

© Petr Valenta, 2005

ISBN

Obsah:

SUMMARY	2
SOUHRN.....	3
KLÍČOVÁ SLOVA.....	4
KEY WORDS	4
OBSAH.....	5
1. Možnosti zkoumání charakteristik proudění při povodních	6
2. Obsah numerického modelování povodňových situací	7
3. Matematická formulace výchozí soustavy rovnic.....	8
4. Přístupy k modelování turbulence.....	10
5. Numerické metody řešení řídicích rovnic.....	11
6. Přístupy k řešení proudění vody v korytě řeky a v inundačním území	12
7. Specifika numerického modelování povodňových situací	15
8. Metodika dvourozměrného numerického modelování povodňových situací.....	15
9. Příklad aplikace modelu - povodňový model města Choceň.....	16
10. Základní výstupy modelu a jejich využitelnost	17
11. Využití modelu pro ověření účinnosti protipovodňových opatření	21
12. Závěr.....	23
Literatura	24
Životopis.....	25

1. Možnosti zkoumání charakteristik proudění při povodních

Podrobná znalost podmínek průchodu povodně zkoumaným územím je základním předpokladem při řešení otázek protipovodňové ochrany a souvisejících úkolů vodohospodářské praxe. Z hydraulického hlediska je proudění charakterizováno v čase proměnnými údaji o poloze hladiny a směru a rychlosti proudění vody v rozsahu zkoumaného prostoru spolu s informacemi o jeho geometrii. Z těchto primárních údajů lze následně získat i další odvozené související charakteristiky proudových poměrů, jakými jsou např. měrné průtoky, hloubky vody, sklony hladiny, třecí rychlosti apod.

K získání potřebných informací lze v podstatě vycházet ze tří zdrojů :

- přímého pozorování a měření (hydrotechnický výzkum in situ),
- fyzikálního modelování na hydraulických modelech,
- numerického modelování.

Přímá pozorování a měření během povodně (jsou-li k dispozici) představují cenný podklad pro zkoumání zákonitostí průchodu povodně daným územím. Klasické metody pozorování a vyhodnocování průběhu povodně dnes spolu s využitím moderních technických prostředků (letecké a satelitní snímky) umožňují získat během povodně detailní informace nejen o časových průbězích průtoků a hladin ve vybraných měrných profilech a o kulminačních hladinách, ale i komplexní údaje o celkovém obrazu průchodu povodně sledovaným územím (rozsah a časový vývoj záplav, hlavní inundační proudy a směry proudění apod.). Vyhodnocená data představují základní a nezastupitelný podklad pro kalibraci numerických či fyzikálních modelů.

S ohledem na značnou časovou, ekonomickou a organizační náročnost zkoumání hydrodynamických jevů ve skutečnosti se k analýze proudění v oboru hydrotechniky využívají především různé techniky modelování, a to fyzikálního a numerického. Mezi hlavní výhody modelování patří především schopnost modelu simulovat řadu situací ve skutečnosti dosud nepozorovaných a možnost zkoumání řady variant včetně optimalizace návrhu hydrotechnického díla či uvažovaných technických opatření před vlastní realizací.

Na skutečnosti, že ze dvou základních metod modelování proudění vody – modelování fyzikálního a modelování matematického – se v současnosti při modelování povodňových situací uplatňuje převážně modelování matematické, se podílí několik faktorů :

- obecně vyšší finanční náročnost fyzikálních modelů ve srovnání s modely numerickými,
- velký rozsah modelovaných oblastí a s ním související nároky na prostor v laboratoři při nutnosti dodržet přijatelné měřítko fyzikálního modelu,
- značná složitost modelovaných oblastí s vysokými nároky na pracnost při stavbě modelu,
- absence omezujících požadavků v souvislosti s volbou měřítka modelu

- vyšší flexibilita numerických modelů při zkoumání variant ve srovnání s fyzikálním modelem,
- neustálý a rychlý rozvoj možností výpočetní techniky a s tím související trvalý vývoj nových a dokonalejších technik numerického modelování, vyžadujících stále nižší stupeň schematizace modelovaného jevu,
- rozvoj nových automatizovaných metod zpracování topografických a dalších dat, usnadňujících výrazně stavbu modelu při numerickém modelování,
- rozvoj nových presentačních a vizualizačních technologií umožňujících prezentovat účelně a přehledně výsledky výzkumu.

Na druhé straně dosud existuje řada problémů, k jejichž výzkumu není možné numerický model aplikovat a u kterých si fyzikální modely nadále zachovávají své dominantní postavení. Ve vztahu k numerickému modelování pak fyzikální model má nezastupitelnou roli jako zdroj informací a dat nutných při verifikaci a testování navržených modelových principů a algoritmů.

V řadě případů konkrétních výzkumů se v současnosti obě metody prolínají a vzájemně vhodně doplňují, což příznivě ovlivňuje nejen ekonomické a časové aspekty realizace výzkumu, ale rovněž kvalitu a komplexnost získaných výsledků.

2. Obsah numerického modelování povodňových situací

Numerické modelování je založeno na podobnosti mezi reálným a abstraktním systémem, kdy k popisu zkoumaného jevu jsou použity obyčejné či parciální diferenciální rovnice nebo jejich soustavy, které jsou kromě jednoduchých případů řešitelné pouze metodami numerické matematiky. V případě modelování proudění vody se obvykle jedná o numerické řešení systému řídicích rovnic tvořeného rovnicí kontinuity a pohybovými rovnicemi.

Při numerickém modelování nejde o pouhé řešení diferenciálních rovnic, které popisují zkoumaný jev, ale o jeho modelování, kdy nejen modelovaný jev, ale i prostředí, ve kterém probíhá, jsou zobrazovány numerickými prostředky. Numerický model pak lze chápat jako souhrn

- matematického vyjádření řídicích rovnic, které zkoumaný jev popisují,
- numerické metody řešení řídicích rovnic,
- numerického popisu modelu prostředí, ve kterém jev probíhá.

Numerické modely proudění vody lze členit podle různých kritérií. Mezi faktory, které mají přímý vliv na vlastnosti modelu a vhodnost jeho aplikace v různých úlohách vodohospodářské praxe patří :

- přístup k matematické formulaci výchozí soustavy řídicích rovnic,
- přístup k prostorové schematizaci a
- použitá numerická metoda k řešení řídicích rovnic.

3. Matematická formulace výchozí soustavy rovnic

Proudění skutečné kapaliny s vnitřním třením je obecně popsáno soustavou Navier-Stokesových rovnic. Rovnice je možné psát např. ve tvaru :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i ; \quad i, j = 1, 2, 3$$

kde první rovnice je rovnice kontinuity a druhá rovnice reprezentuje tři pohybové rovnice ve třech směrech os x_i kartézského souřadného systému. Tenzor tečných napětí τ_{ij} [Pa] je popsán Stokesovým vztahem

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

V rovnicích U_i značí vektor rychlosti vody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], P je tlak [Pa], ρ je hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], g_i je vektor gravitačního zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], t je čas [s], μ je dynamická viskozita [Pa.s] a δ_{ij} je symbol pro Kroneckerovo delta.

Hlavním problémem přímého řešení Navier-Stokesových rovnic pro turbulentní proudění (DNS – *direct numerical solution*) je skutečnost, že v turbulentním proudění sehrávají velkou roli i velmi malé vírové struktury, které je zapotřebí v rámci výpočetní sítě postihnout. K novým trendům modelování turbulentního proudění patří v současnosti metoda LES (*large eddy simulation*), která s využitím velmi husté výpočetní sítě přímo modeluje vírové struktury větších měřítek a pouze velmi malé víry nezachycené výpočetní sítí jsou řešeny pomocí modelu turbulence. Praktická aplikace metody v inženýrských úlohách většího rozsahu je však dosud nereálná.

Jako výhodnější výchozí matematická formulace pro tvorbu numerických modelů se proto používá soustava Reynoldsových rovnic pro turbulentní proudění, které nevyjadřují vztah mezi okamžitými pulzujícími hodnotami veličin, nýbrž mezi hodnotami časově vyhlazenými (bez flukтуаčních složek).

Výchozí matematickou formulaci pro dvourozměrné (2D) modely k řešení proudění vody v otevřených korytech je soustava svisle integrovaných Reynoldsových rovnic, která bývá někdy označována jako *shallow water equations* ("rovnice mělké vody"). Rovnice jsou vhodné pro případy, kdy půdorysné rozměry oblasti, v níž voda proudí, výrazně přesahují hloubku.

Jedná se o dvě pohybové rovnice ve směrech x_1 a x_2 a rovnici kontinuity.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial}{\partial x_i} (h + z_b) + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x_j} (h T_{ij}) + S_i ; \quad i, j = 1, 2$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h u_i)}{\partial x_i} = 0$$

V rovnicích značí u_i vektor průměrné svislicové rychlosti, t čas [s], g gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], h hloubku vody [m], z_b je svislá souřadnice polohy dna [m], ρ je hustota vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]. V rovnicích se kromě hloubky h vyskytují jako další hledané neznámé složky průměrných svislicových rychlostí u_1 a u_2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Po výšce průměrované složky tenzoru efektivních napětí T_{ij} zahrnují napětí vznikající vlivem viskozity, turbulentní Reynoldsova napětí a napětí vlivem nerovnoměrnosti rychlostních profilů ve svislici. Člen S_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] v pohybových rovnicích zahrnuje obecně působení vnějších sil a napětí, jakými jsou např. tečné napětí na dně τ_b [Pa], tečné napětí na hladině vlivem větru τ_w [Pa] a Coriolisovo zrychlení f_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Vzhledem k formulaci tenzoru efektivních napětí obsahujícího Reynoldsova turbulentní napětí není systém rovnic uzavřený a musí být doplněn vhodným modelem turbulence (u zjednodušených modelů se turbulence často zanedbává).

Základní řídicí rovnice pro tvorbu jednorozměrných modelů proudění vody v otevřených korytech představují Saint-Venantovy rovnice. Lze je psát např. ve tvaru :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (UQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0$$

kde Q je průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$], A průtočná plocha příčného řezu [m^2], $U = Q/A$ je střední průřezová rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], h je hloubka vody [m], S_0 je sklon dna [-], S_f je sklon čáry energie [-] a g je gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

Sklon čáry energie S_f reprezentuje celkové hydraulické odpory, které kromě tření na dně zahrnují i vlivy turbulence proudění, nerovnoměrnosti rychlostního pole v příčném řezu, prostorové efekty proudění apod. Zatímco u více-rozměrných (především třírozměrných) modelů jsou uvedené jevy alespoň přibližně postiženy přímo v řídicích rovnicích, u modelů jednorozměrných se jejich modelování v důsledku značné schematizace řešeného problému redukuje na vyjádření celkových hydraulických odporů pomocí aplikace různých empirických vztahů a parametrů k vyjádření Chézyho rychlostního součinitele.

Postupná schematizace modelovaného jevu směrem od třírozměrného (3D) pojetí až k jednorozměrnému (1D) náhledu na modelovanou skutečnost projevuje postupným zjednodušováním tvaru řídicích rovnic.

Kromě toho v rámci každé kategorie modelů (1D, 2D a 3D) existují tendence nelineární řídicí rovnice dále zjednodušit a usnadnit tak jejich numerické řešení. Toto zjednodušení spočívá v zanedbání některých členů v řídicích rovnicích. Stupeň zjednodušení je u různých modelů různý, přičemž každé zjednodušení pochopitelně snižuje obecnost a univerzálnost modelu.

4. Přístupy k modelování turbulence

Proudění vody modelované v rámci většiny praktických inženýrských aplikací je turbulentní. Modelování turbulence v otevřených korytech vesměs vychází z principu turbulentní (resp. efektivní) viskozity ν_t [m^2s^{-1}], podle kterého lze turbulentní napětí τ_{ij}^t [Pa] vyjádřit s využitím turbulentní viskozity a složek rychlostí u_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] ze vztahu :

$$\tau_{ij}^t = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \nu_t \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Modelování turbulence pomocí principu turbulentní viskozity spočívá ve formulaci a aplikaci modelových předpokladů pro velikost a průběh této veličiny. Modelování turbulence je významné u dvou a třírozměrných modelů, kde má přímý vliv na výsledné rychlostní pole.

Z hlediska přístupu k modelování turbulence lze modely proudění vody v otevřených korytech členit na :

- modely zanedbávající turbulentní napětí,
- modely používající konstantní turbulentní viskozitu,
- modely používající algebraické modely turbulence a
- modely řešící přenosové rovnice pro parametry turbulence.

Nejjednodušší a nejčastěji použitý přístup k modelování turbulence je použití konstantní turbulentní viskozity, a to buď v rámci celého modelu nebo v jeho jednotlivých podoblastech. Hlavní problém spočívá v určení velikosti zadávané turbulentní viskozity, která musí být stanovena buď na základě kalibrace nebo odhadem na základě zkušeností.

Jednoduché modely turbulence vycházejí z předpokladu lokální rovnováhy mezi produkcí turbulentní kinetické energie a disipací a modelují turbulenci pomocí jednoduchých algebraických vztahů. Praktickým důsledkem je, že turbulence proudění v jednom místě nemá vliv na proudění v ostatních částech modelované oblasti.

Tento nedostatek odstraňují složitější modely turbulence, založené např. na řešení přenosových rovnic pro turbulentní kinetickou energii k [m^2s^{-2}] a disipaci

ε [m^2s^{-3}], tzv. (k - ε) modely. Při užití těchto metod je nutné řešit navíc dvě přenosové rovnice pro uvedené parametry, čímž celkový počet nelineárních parciálních diferenciálních v soustavě řídicích rovnic modelu vzrůstá o další dvě nelineární rovnice.

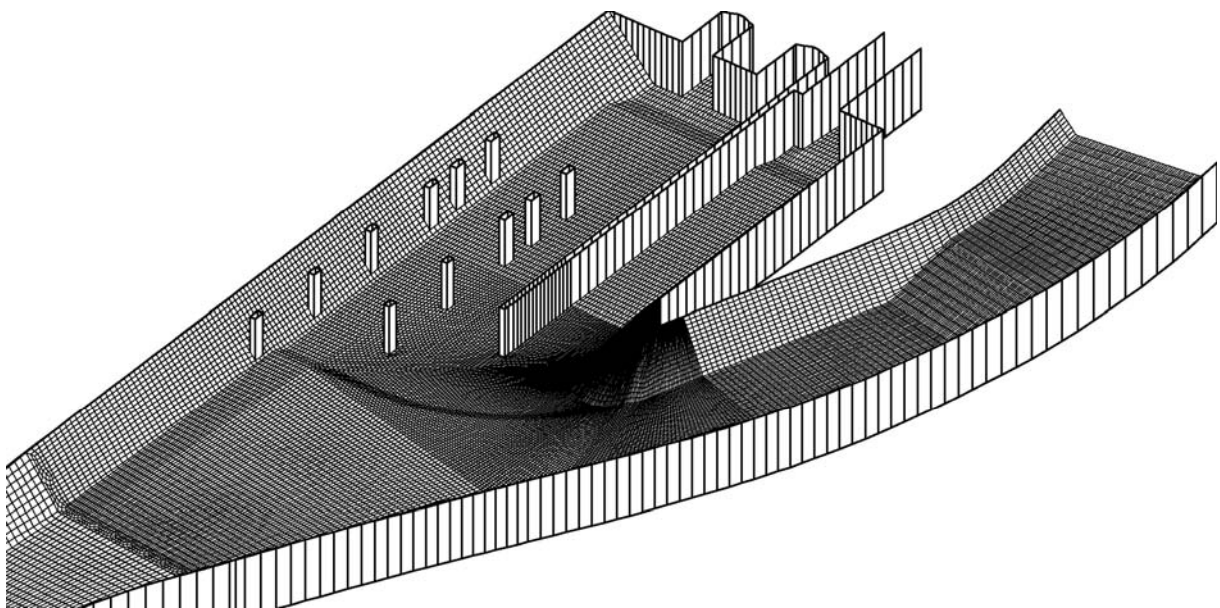
5. Numerické metody řešení řídicích rovnic

Nejčastěji používanými metodami pro řešení parciálních diferenciálních rovnic při numerickém modelování proudění vody v současnosti jsou

- metoda sítí,
- metoda konečných objemů a
- metoda konečných prvků.

Hlavní výhodou metody sítí ve srovnání např. s metodou konečných prvků je její jednoduchost. Z jednoduchosti metody vyplývá ve srovnání s ostatními metodami snazší algoritmizace, nižší nároky na použitý hardware a větší rychlost výpočtů. Tato skutečnost je významná především u výpočtů nestacionárního proudění.

Metoda konečných objemů je výhodná především vzhledem k možnosti modelovat tvarově složité oblasti pomocí křivočaré sítě, což umožňuje přizpůsobit tvar sítě např. tvaru koryta a inundačního území, popřípadě vytvarovat vnitřní linie sítě podle tvaru významných překážek proudění (násypy komunikací, hráze apod). Z tohoto hlediska představuje uvedená metoda významný přínos ve srovnání s klasickou metodou sítí.

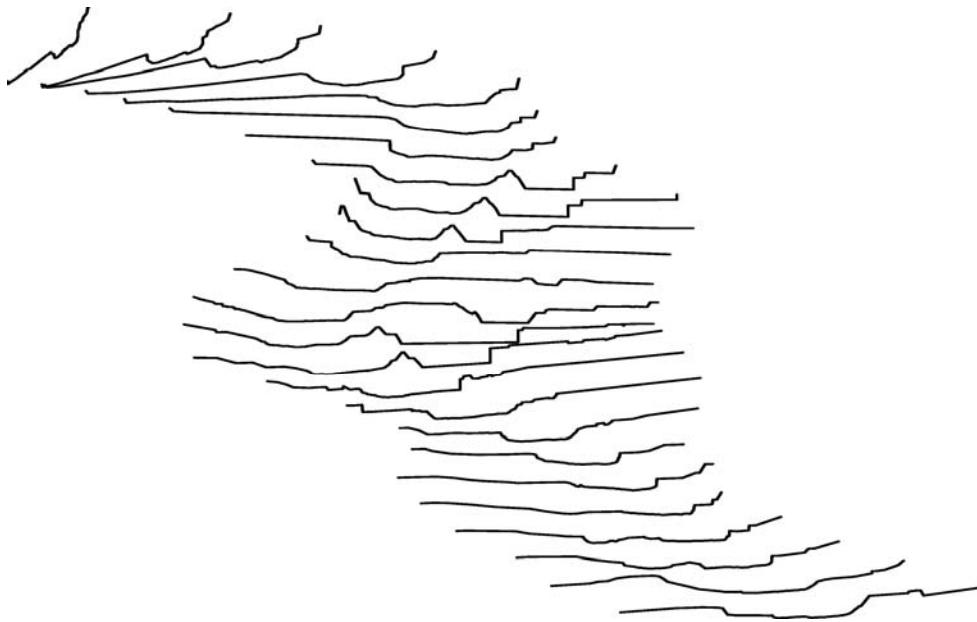


Obr. 1 Příklad aplikace MKP při numerickém modelování proudění vody (část numerického modelu vodního díla Přelouč)

Metoda konečných prvků umožňuje výstižně modelovat oblasti se zcela obecnou geometrií, a to i při použití nejjednodušších typů konečných prvků. Jak ukazuje příklad na obr. 1, uplatní se výhody metody zejména u modelování tvarově velmi složitých oblastí, kde přesnost modelování tvarových detailů má přímý vliv na výsledky řešení (jezové zdrže s hydrotechnickými objekty apod.). Z možností metody vyplývá její větší složitost ve srovnání s předchozími metodami s dopadem na komplikovanost výpočetního programu a nároky na hardware.

6. Přístupy k řešení proudění vody v korytě řeky a v inundačním území

Kromě volby výchozí soustavy řídicích rovnic a metody použité k jejich numerickému řešení ovlivňuje vlastnosti numerického modelu a předpokládanou využitelnost výsledků modelování především použitá prostorová schematizace. Podle přístupu k prostorové schematizaci lze modely členit na jednorozměrné (1D), pseudodvourozměrné (1,5D), dvourozměrné (2D), kvazitřírozměrné (2,5D) a třírozměrné (3D).



Obr.2 Schematizace koryta a inundace pomocí příčných profilů v 1D modelu

Dosud nejširšího uplatnění při řešení praktických úloh vodohospodářské praxe doznaly bezesporu jednorozměrné modely řešící jak ustálené, tak neustálené proudění v otevřených korytech a v systémech otevřených koryt. Tyto prostředky se dnes již staly běžným prostředkem hydraulického výzkumu i projekce a mají i u nás bohatou tradici. Výhoda jednorozměrných modelů spočívá v jejich jednoduchosti, většinou i snadné dostupnosti a v relativně malých nárocích na vstupní data. Oblast využití jednorozměrných modelů je

však v důsledku použité schematizace omezená. Modely lze bez problémů aplikovat v oblastech, kdy proudění má převážně jednorozměrný charakter.

Modelovaná oblast je přitom schematizována soustavou příčných profilů (obr.2), přičemž se předpokládá, že proudění se děje ve směru spojnic mezi jednotlivými profily a lze ho zjednodušeně popsat v každém profilu pomocí polohy hladiny a střední průřezové rychlosti ve směru osy koryta. Uvedená schematizace není na závadu, pokud řešíme proudění pouze v korytě řeky, případně v řece s přilehlým inundačním územím menšího rozsahu a pravidelného tvaru. Pokud však má přilehlé inundační území nepravidelný tvar nebo se v něm vyskytují obtékané či přelévané překážky proudění (zástavba, násypy komunikací apod.), nelze již zpravidla považovat aplikaci 1D modelu za zcela oprávněnou.

Snaha aplikovat principy jednorozměrného modelování i v podobných složitějších geometrických podmínkách vede někdy k použití 1,5D modelů. Při jejich aplikaci se skutečná komplikovaná prostorová geometrie uměle rozdělí na části a schematizuje se větvnou či okružovou sítí složenou z několika dílčích modelů (např. koryto a inundace). Hlavním úskalím je však právě rozdělení modelované oblasti na jednotlivé části. V případě, že proudění v jednotlivých částech není dostatečně predestinováno prostorovými podmínkami, je aplikace tohoto typu modelu dosti problematická a návrh modelu i získané výsledky nutně závisí na subjektivních přístupech zpracovatele.

Většímu rozšíření metodiky třírozměrného modelování proudění vody do vodohospodářské praxe dosud brání mimořádné nároky 3D modelů na použitý hardware a proto se aplikace 3D modelů zatím omezují pouze na úlohy velmi malého rozsahu. Přijatelné východisko při modelování proudění ve složitých prostorových podmínkách představují dvourozměrné a kvazitřírozměrné modely, které lze považovat za dostatečně exaktní prostředek ve všech případech, kdy lze předpokládat platnost řídicích rovnic, z nichž modely vycházejí. U nás se tyto modely používají zhruba v posledních deseti letech.

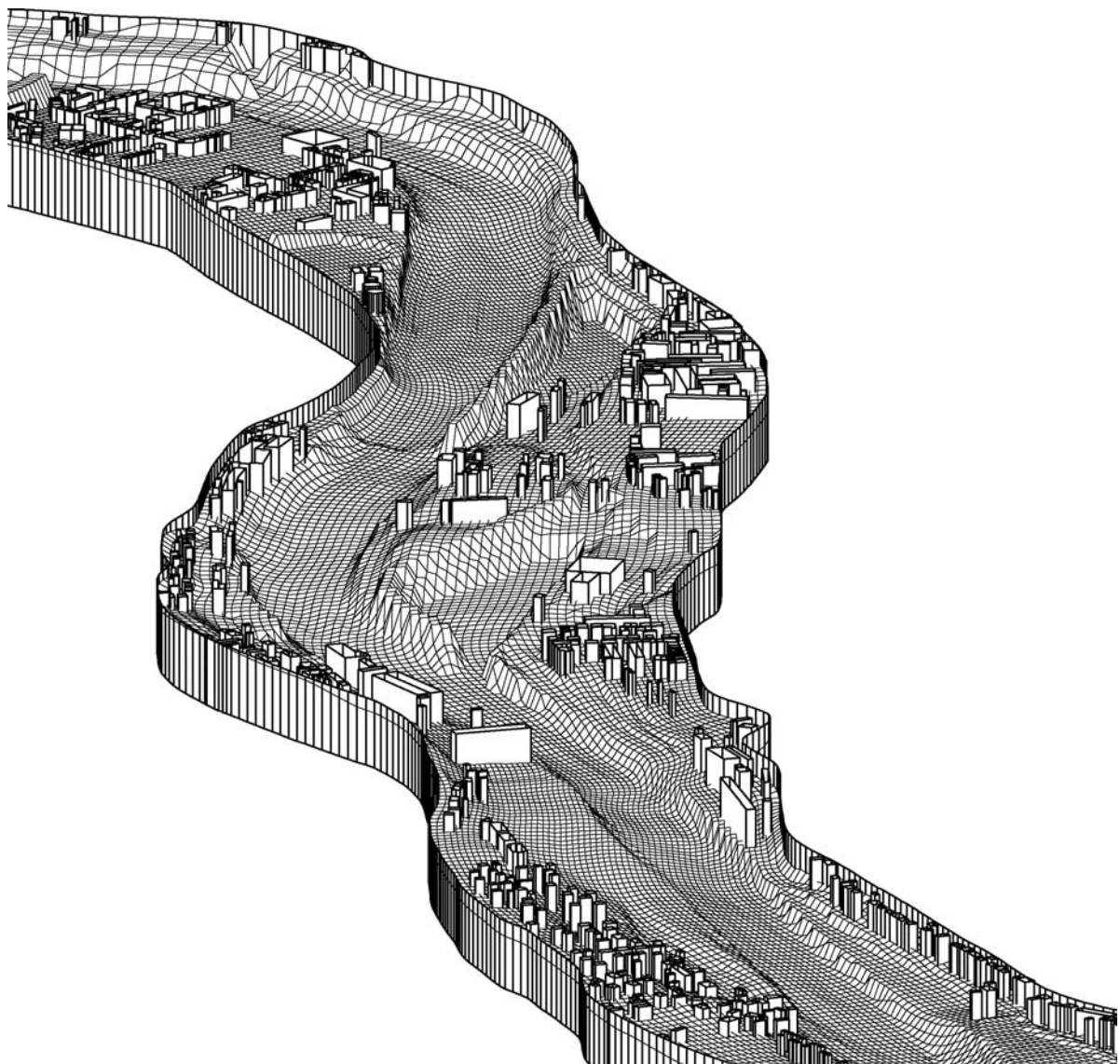
Dvourozměrné modely mají náročnější požadavky na vstupní data než 1D modely. Největší objem vstupních údajů představují data pro tvorbu třírozměrného digitálního modelu oblasti, tj. numerického popisu prostředí, v němž voda proudí. Vzhledem k tomu, že popis modelované oblasti u těchto modelů je třírozměrný (obr. 3), jsou požadavky na podklady obdobné, jako u třírozměrných modelů.

Jednorozměrné modely lze využít ke stanovení podélných profilů hladin podél osy toku při kulminačních povodňových průtocích, resp. při nestacionárním řešení ke stanovení postupu simulované povodňové vlny modelovaným úsekem toku. Vzhledem k jednoduchosti a rychlosti těchto modelů lze bez problémů aplikovat na relativně velmi dlouhé úseky vodních toků a jejich soustav.

Nicméně z hlediska kvalifikovaného rozhodování a způsobu využívání inundačního území a územního plánování jsou výstupy jednorozměrného

modelu omezené, neboť kromě primárního výstupu, tj. údajů o poloze hladiny a středních průřezových rychlostech v jednotlivých příčných profilech, neposkytují (buď vůbec či v nedostatečné kvalitě a spolehlivosti) řadu dalších velmi důležitých informací potřebných ke kvalifikovanému rozhodování o způsobu využití inundačního území. K těmto informacím patří podrobné údaje o proudových poměrech v zájmové oblasti včetně vyhodnocení hlavních inundačních proudnic, vyhodnocení prostorového průběhu hladiny při průchodu povodně, informace o rozložení oblastí s různými velikostmi rychlostí v celém rozsahu záplavového území, detailní informace o způsobu obtékání různých překážek (terénní útvary, tělesa komunikací, zástavba apod.) a jejich vlivu na podmínky převádění povodně zájmovým územím apod.

Uvedené nevýhody lze eliminovat při aplikaci vhodného dvourozměrného matematického modelu, využívajícího pokud možno dostatečně flexibilní numerickou metodu (nejlépe metodu konečných objemů či konečných prvků).



Obr.3 Schematizace koryta a inundačního území se zástavbou ve 2D modelu (metoda konečných objemů, zobrazení výpočetní sítě drátovým modelem)

7. Specifika numerického modelování povodňových situací

Ke specifickým aplikacím dvourozměrných modelů v povodňové problematice patří mimořádně složitý tvar modelované oblasti, který obvykle není předem určen, nýbrž závisí na topografii terénu a poloze hladiny a stává se tedy součástí řešení. Další charakteristikou je obvykle značný rozsah sestavovaného modelu, kladoucí mimořádné požadavky na množství vstupních údajů a jejich zpracování a samozřejmě především na samotný výpočetní program.

K nejkomplicovanějším úlohám patří bezesporu modelování proudění v území dotčeném lidskou činností, zejména pak v urbanizovaném inundačním území. Zde je proudění ovlivňováno nejrůznějšími překážkami proudění (umělé terénní tvary, násypy dopravních staveb, průmyslové stavební objekty, občanská zástavba), které jsou často bez jakékoli struktury a vylučují možnost předem odhadnout hlavní směry proudění a následně přistoupit ke schematizaci problému směřující k aplikaci jednorozměrného či pseudodvouřměrného modelu. Aplikace dvourozměrných modelů je pak v těchto případech značně náročná, neboť se střetává s protikladnými požadavky modelování rozsáhlých území při současném vysokém nároku na rozlišení numerického modelu, tj. na použití husté výpočetní sítě umožňující modelování detailů.

8. Metodika dvourozměrného numerického modelování povodňových situací

Pro účely detailního numerického modelování povodňových situací se v dosavadní praxi velmi dobře osvědčil autorem vytvořený numerický model FAST2D. Model umožňuje řešit ustálené a neustálené dvourozměrné proudění vody s volnou hladinou v oblastech se složitou geometrií. Vytvořený model řeší turbulentní proudění v otevřených korytech, popsané soustavou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. Jedná se o svisle integrované Reynoldsovy rovnice pro turbulentní proudění. Pro modelování turbulence je použit princip turbulentní viskozity, pro jejíž stanovení je v modelu použit $k - \varepsilon$ model turbulence. Model používá metodu konečných objemů, pro diskretizaci oblastí lze použít obecnou křivočarou neekvidistantní výpočetní síť. Z tohoto hlediska představuje uvedená metoda významný přínos ve srovnání s klasickou metodou sítí, která většinou vyžaduje použití přímočaré pravoúhlé ekvidistantní sítě. Věrný popis složité geometrie řešené oblasti pomocí takové sítě bývá v praktických úlohách problematický.

Předmětem řešení je celkem pět neznámých veličin, definovaných ve středu každého konečného objemu - dvě složky průměrných svislicových rychlostí u a v , poloha hladiny h , turbulentní kinetická energie k a disipace ε . Těchto pět neznámých je určováno jako řešení soustavy pěti diferenciálních nelineárních rovnic - dvou pohybových rovnic, rovnice kontinuity a přenosových rovnic pro k a ε .

Při praktické aplikaci modelu je řešená oblast nejprve pokryta křivočarou výpočetní sítí, která je zadávána pomocí souřadnic x a y rohových uzlů jednotlivých konečných objemů. Při konstrukci sítě je přitom vhodné využít možností dané metody a hlavní linie sítě přizpůsobit obrysům záplavového území a eventuelně významným vnitřním překážkám uvnitř modelované oblasti, jakými jsou například příčné a podélné usměrňovací stavby, linie významné zástavby, linie oddělující oblasti s různými drsnostmi dna (terénu), atd. V další fázi je třeba doplnit souřadnice konečných objemů o informaci o nadmořské výšce terénu ve všech bodech výpočetní sítě a vytvořit tak digitální model terénu. Pro každý konečný objem je dále třeba definovat odpovídající hodnotu součinitele drsnosti podle charakteru dna, resp. povrchu zaplavovaného terénu. Plošné rozložení drsností a odhad jejich velikosti je předmětem kalibrace modelu. Součástí tvorby modelu terénu je zohlednění zástavby, eventuelně dalších prvků, které představují úplné nebo částečné překážky proudění.

Výsledkem numerické simulace jsou složky rychlostí proudění a poloha hladiny spolu s charakteristikami turbulence proudění ve středech všech konečných objemů v řešené oblasti.

9. Příklad aplikace modelu - povodňový model města Choceň

Jako příklad aplikace dvourozměrného matematického modelu k podrobnému modelování a analýze povodňových situací v oblastech se složitou topografií je uvedena ukázka ze studie zaměřené na analýzu podmínek průchodu povodně korytem Tiché Orlice a přilehlým urbanizovaným inundačním územím v oblasti Chocně a Ústí nad Orlicí. V ukázce jsou využity výstupy z mezinárodního česko-švýcarského výzkumného projektu FLAMOR, řešeného v letech 2001 až 2003 na Stavební fakultě ČVUT. Projekt byl iniciován povodňovými událostmi v letech 1997 a 1998 a byl zaměřen na návrh a ověření vhodné metodiky pro numerické modelování povodňových situací, analýzu povodňových rizik, predikci povodňových škod a posuzování účinnosti protipovodňových opatření.

Pro účely podrobného modelování a analýzy podmínek průchodu povodní urbanizovaným záplavovým územím v Chocni pomocí numerického modelu FAST2D byl sestaven model zájmového území v délce 3,8 km a v šířce přibližně 1 km. Průměrné rozměry jedné buňky výpočetní sítě činily 2,5 x 2 metry a byly zvoleny tak, aby rozlišení výpočetní sítě již umožňovalo dostatečně podrobné modelování jednotlivých stavebních objektů. Pro popis tvaru terénu v numerickém modelu bylo zapotřebí vytvořit podrobný a dostatečně přesný digitální model terénu. Při tvorbě modelu se vycházelo z fotogrammetrického vyhodnocení leteckých snímků, tvar vodotečí a dalších terénních útvarů nepostižených v leteckém zaměření byl modelován na základě doplňkového pozemního geodetického zaměření.

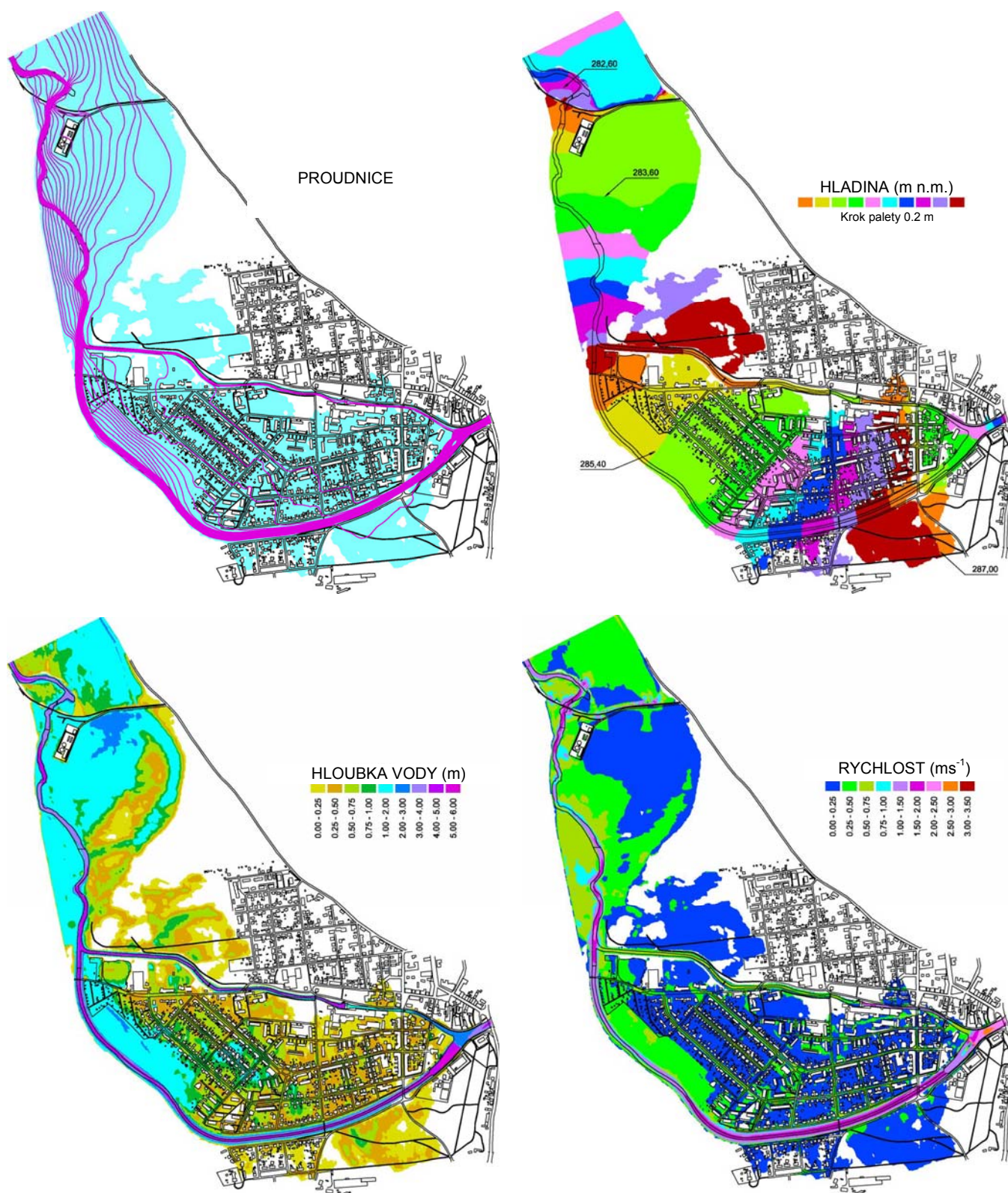


Obr. 4 Model záplavového území v Chocni se zástavbou – pohled od jihu

Tvar výsledného sestaveného modelu je zřejmý z obrázku 4, který obsahuje třírozměrné zobrazení výsledného modelu zájmové oblasti v podobě, v jaké je digitálně reprezentována v numerickém modelu. Jedná se o pohled směrem od jihu, pro zvýšení prostorového dojmu jsou buňky výpočetní sítě barevně odlišeny v závislosti na jejich nadmořské výšce. V obrázku jsou postprocesorem modelu schematicky (pomocí svislých stěn) vykresleny i modelované neprůtočné překážky. Model je vykreslen v převýšeném měřítku.

10. Základní výstupy modelu a jejich využitelnost

Pomocí vytvořeného numerického modelu lze provést řadu simulací proudění vody v průběhu povodní s kulminačními průtoky odpovídajícími N-letým vodám dle hydrologických podkladů ČHMÚ, případně s jinak volenými hodnotami návrhových průtoků. Výsledky výpočtů mohou být přehledně graficky vyhodnoceny s využitím funkcí postprocesoru, ukázka vyhodnocení základních charakteristik proudění je uvedena na obrázku 5. Grafické vyhodnocení výsledků zahrnuje vyhodnocení proudových poměrů pomocí proudnic, vyhodnocení prostorového průběhu hladin, hloubek a absolutních velikostí rychlostí proudění vody pomocí záplavových map. V těchto mapách jsou pomocí barevné škály s vhodně voleným krokem rozlišeny velikosti příslušné vyhodnocované charakteristiky. Alternativně lze volit i jiné způsoby přehledného vyhodnocení, na obr. 6 je například uvedeno třírozměrné zobrazení vypočteného průběhu hladiny v použitém modelu zájmového území.



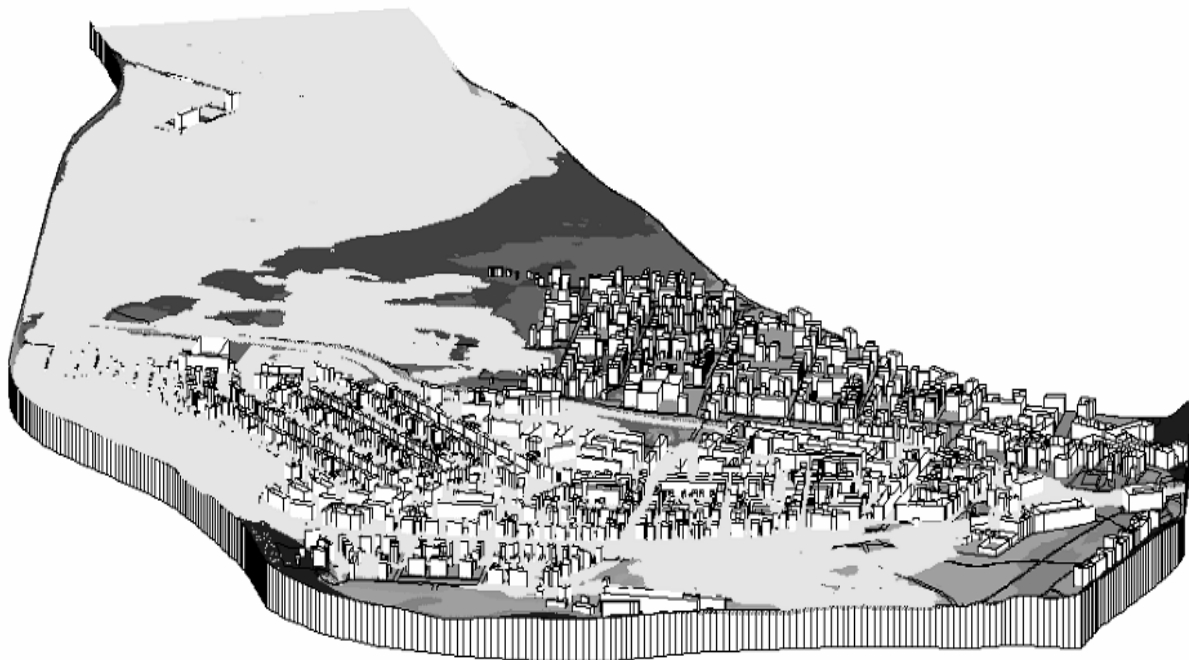
Obr. 5 Ukázka vyhodnocení charakteristik proudění při povodni (záplavové mapy pro stoletou povodeň v oblasti Chocně)

Grafické vyhodnocení výsledků pomocí záplavových map poskytuje přehledné informace o charakteristikách proudění v libovolném místě modelované oblasti a umožňuje provedení kvalifikované analýzy proudových

poměrů v inundačním území při povodňových situacích.

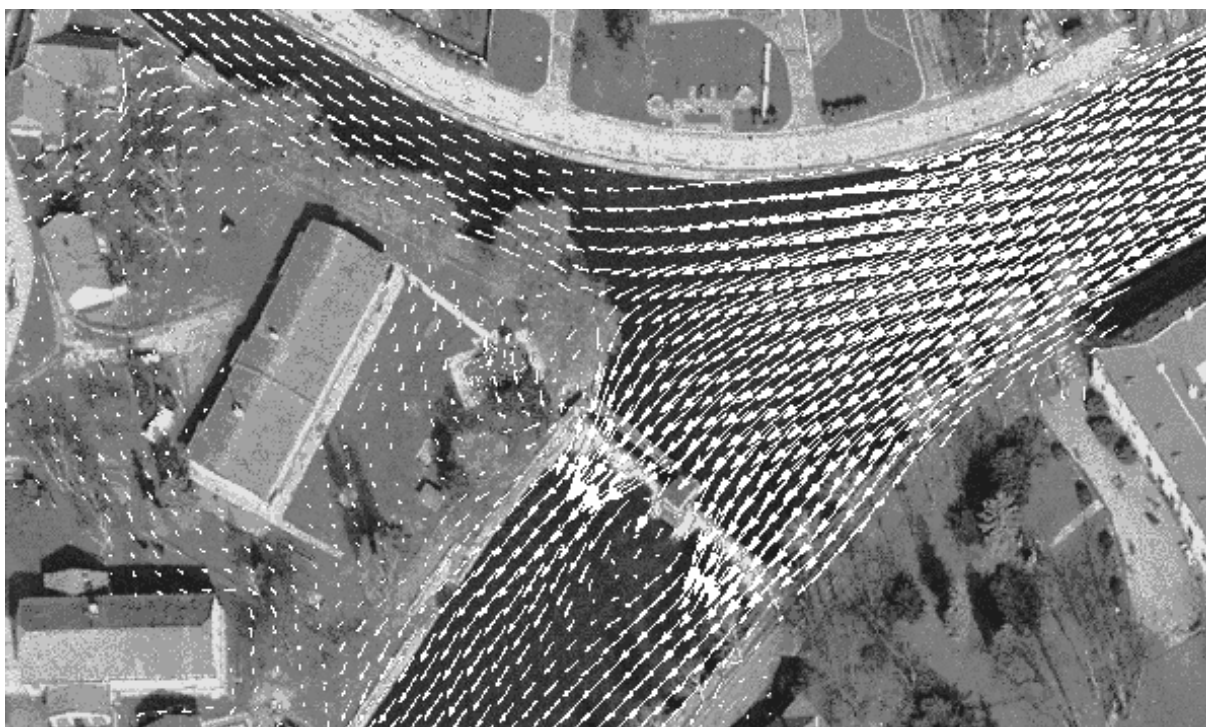
Pomocí vyhodnocení proudnic lze hodnotit rozložení průtoku v korytě a inundaci (proudové pásy), identifikovat hlavní inundační proudnice, na základě hustoty a tvaru proudnic rozlišit aktivní a pasivní zóny proudění, identifikovat hlavní omezující profily a překážky a získat tak exaktní podklad pro objektivní hodnocení odtokových poměrů a klasifikaci inundačních území.

Vyhodnocení průběhu hladiny umožňuje kromě získání informace o poloze hladiny v libovolném místě hodnotit i sklony hladin, analyzovat případné příčiny způsobující vzduť hladiny a představuje základní podklad pro návrh protipovodňových opatření. Znalost rozložení hloubek a rychlostí v modelované oblasti umožňuje identifikaci zón přístupných a nepřístupných v průběhu povodně a představuje základní podklad pro rizikovou analýzu v záplavovém území.



Obr. 6 Ukázka prostorového vyhodnocení průběhu hladiny v numerickém modelu

Kromě záplavových map, které představují souhrnné a přehledné zobrazení rozsáhlých výstupů numerického modelu, lze získané výsledky v případě potřeby vyhodnotit a znázornit i detailně v podrobnosti blízcí se skutečnému rozlišení modelu. Jako příklad je uvedeno na obr.7 detailní vyhodnocení rychlostního pole v oblasti odbočení náhonu k vodní elektrárně nad válcovým jezem v Chocni. Výstupy numerického modelu lze dále využít jako vstupní údaje pro komplexnější metody vyhodnocení, které jsou založené na znalosti prostorového rozložení charakteristik proudění a pro které numerický model poskytuje potřebné detailní informace.

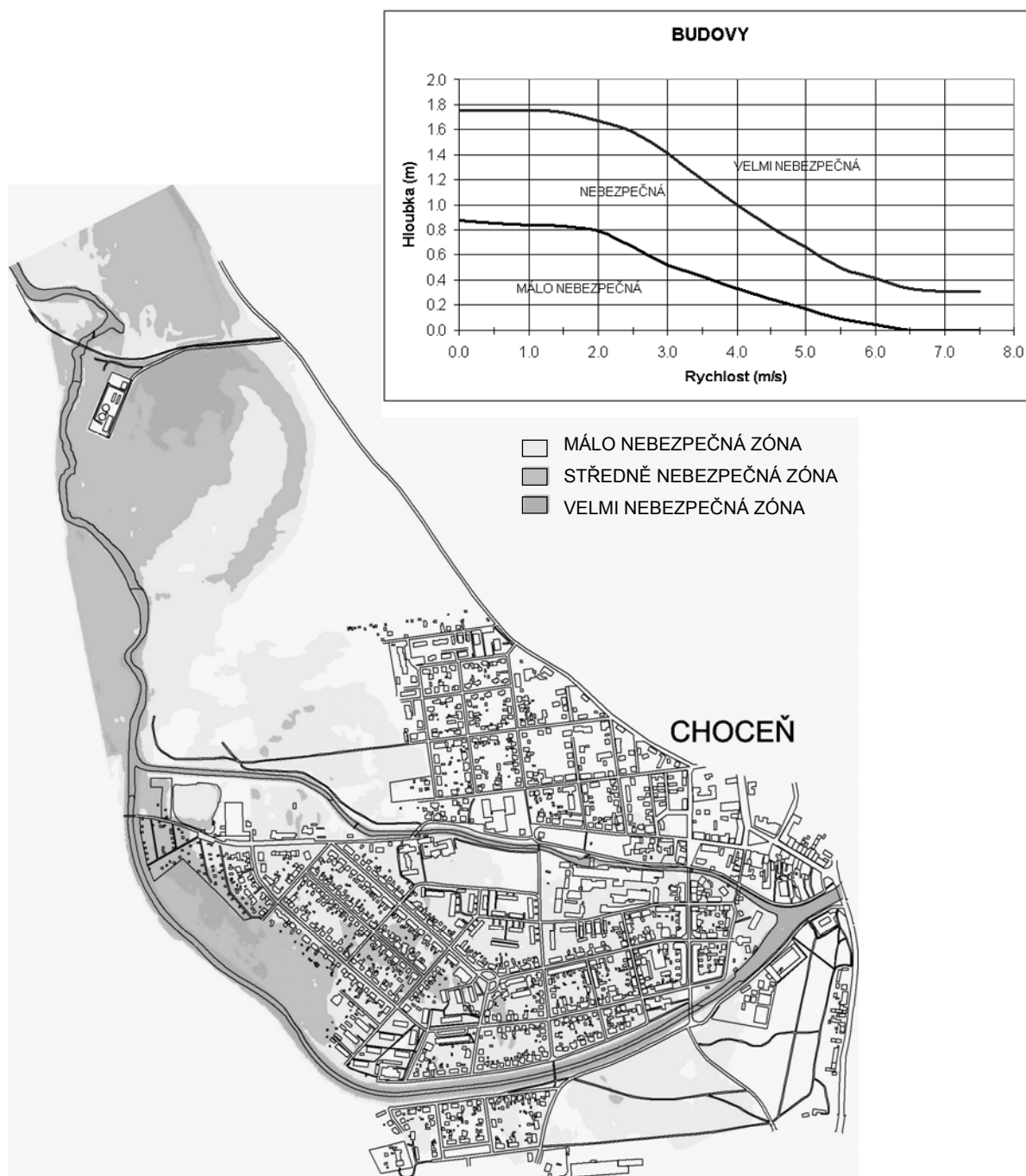


Obr. 7 Detailní vyhodnocení rychlostního pole v oblasti odbočení náhonu VE

Pro kvalifikované rozhodování o způsobu využívání inundačních území a případných protipovodňových opatřeních je zapotřebí znát kromě hydraulických veličin i míru ohrožení a souvisejícího rizika, která možné zaplavení zájmového území přináší. Na základě znalosti charakteristik proudění vody v záplavovém území během povodně lze kvantifikovat míru nepříznivého vlivu povodně na území v jeho jednotlivých částech, případně ji vyjádřit přímo ve vztahu ke konkrétním subjektům jako jsou osoby, stavební objekty různého typu apod. Při vyjádření míry povodňového ohrožení lze brát do úvahy řadu kritérií, přičemž k hlavním a nejčastěji používaným patří informace o hloubce a rychlosti proudění vody v průběhu povodně.

V rámci vyhodnocení povodňového ohrožení dochází k agregaci několika druhů vstupních údajů do jediné výstupní proměnné, charakterizující stupeň povodňového ohrožení (detailní postup závisí na konkrétní metodice). Grafické vyhodnocení rozložení této proměnné v modelované oblasti pak vede k sestavení tzv. map povodňového ohrožení.

Příklad zpracování map povodňového ohrožení pomocí metodiky Downstream Hazard Classification Guidelines (U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation) s využitím nadstavbového modulu numerického modelu je uveden na obrázku 8. S využitím primárních výsledků numerického modelu lze v případě potřeby řešit i komplikovanější úlohy rizikové analýzy a predikce povodňových škod v záplavovém území s využitím komplikovanějších algoritmů, realizovaných obvykle pomocí aplikací na bázi geografických informačních systémů (GIS).



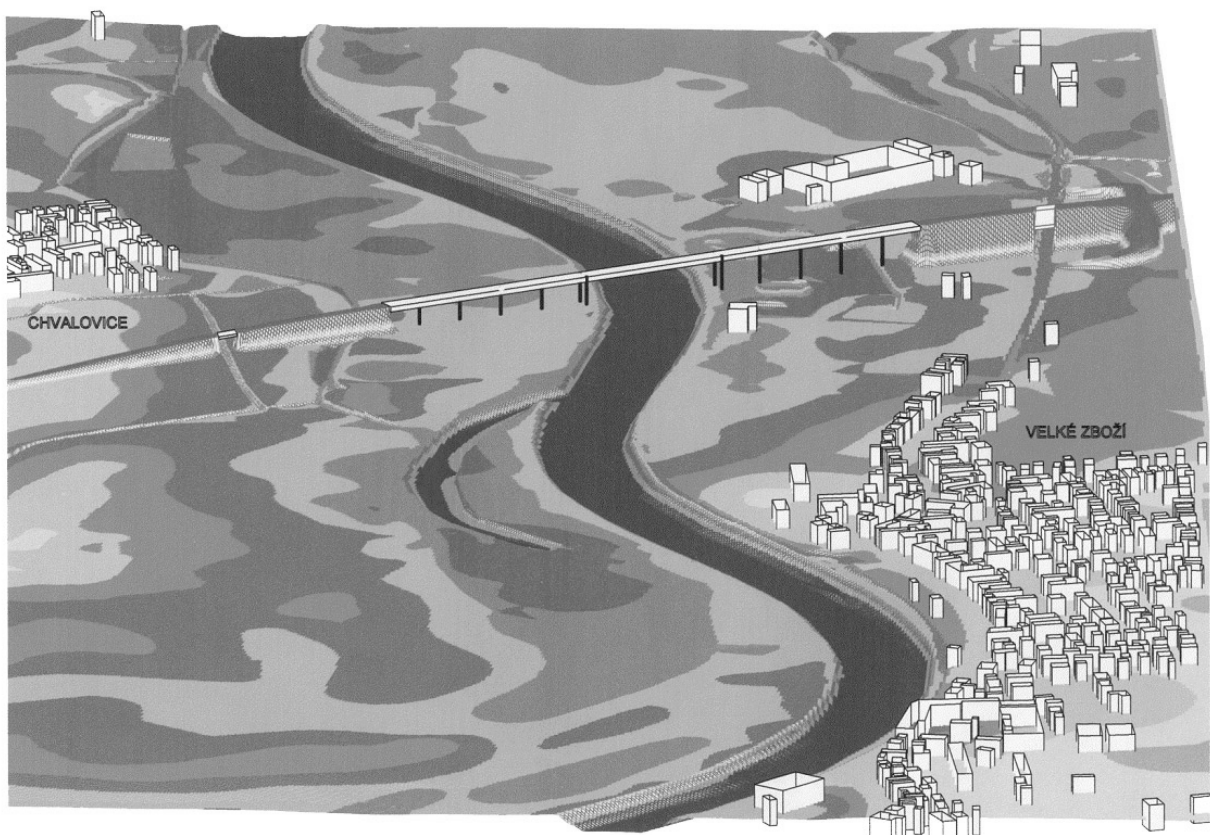
Obr. 8 Ukázka zpracování map povodňového ohrožení (nebezpečných zón)

11. Využití modelu pro ověření účinnosti protipovodňových opatření

S využitím vyhodnocených výsledků simulací pro zvolenou sadu návrhových průtoků lze ze sestavených záplavových map zřetelně identifikovat omezující prvky, způsobující potenciální problémy při průchodu povodní zájmovým územím. Numerický model však lze velmi výhodně využít nejen

k analýze podmínek proudění při povodni za současného stavu, ale i k návrhu a ověření účinnosti různých variant protipovodňových opatření. Velkou výhodou je přitom snadná opakovatelná využitelnost již sestaveného numerického modelu, do kterého lze jednotlivá zkoumaná protipovodňová opatření a jejich kombinace jednoduše zavést a jejich účinnost kvantifikovat formou srovnávacích numerických simulací. Pozitivní účinky zkoumaných opatření jsou přitom vyhodnocovány jako rozdíly ve vypočtených charakteristikách proudění (především v hladinách) oproti současnému stavu. Vyhodnocení a porovnání výsledků srovnávacích simulací pro různé varianty protipovodňových opatření pak umožňuje jednoznačný a kvalifikovaný výběr optimální varianty, která vykazuje nejefektivnější vynaložení finančních prostředků na realizaci ochrany proti povodním.

Také v případě nově navrhovaných staveb v inundačním území je hlavní výhodou využití podrobného dvourozměrného numerického modelu možnost současného posouzení celé řady možných variant řešení s následným výběrem optimálního návrhu. Typickým příkladem obdobných studií je posuzování vlivu dopravních staveb na proudové poměry při povodních, zaměřené na kvalifikovaný návrh potřebného počtu mostních objektů a optimalizace jejich dispozičního uspořádání a návrhových parametrů z hydraulického a hydrotechnického hlediska.



Obr. 9 Aplikace 2D modelu pro posouzení nové dopravní stavby v inundaci (numerický model pro posouzení nového mostu přes Labe u Nymburka)

Dostatečně exaktním prostředkem k řešení těchto komplikovaných případů proudění je dvourozměrný numerický model vhodného typu, který umožňuje postihnout s přijatelnou přesností složité podmínky obtékání překážky reprezentované dopravní stavbou včetně ovlivnění proudového pole jednotlivými mostními objekty s různou kapacitou a správně kvantifikovat vliv realizace stavby na proudové poměry a průběh hladiny při povodni. Součástí hodnocení jednotlivých variant je i podrobné vyčíslení charakteristik proudění v blízkosti nově navrhovaných objektů, které se stává důležitým podkladem pro příslušná technická opatření v rámci projektového návrhu.

12. Závěr

Uvedené příklady aplikace podrobného dvourozměrného numerického modelu proudění vody a jeho nadstavbových modulů dokumentují současné možnosti využití metodiky dvourozměrného numerického modelování při analýze povodňových situací v urbanizovaném inundačním území s velmi složitou prostorovou geometrií. Výsledky obdobných studií mají okamžité přímé a velmi široké využití v řadě praktických inženýrských úloh. Velkou výhodou je přitom možnost opakovaného využití vytvořeného modelu, který je možno využít nejen k ověření navrhovaných protipovodňových opatření, ale i k posouzení dalších objektů a staveb v inundačním území, které mohou mít významný vliv na proudění vody při povodni.

Velkým přínosem aplikace podrobného numerického dvourozměrného modelu v těchto náročných úlohách je skutečnost, že poskytuje jako výstup mnohé potřebné informace, které dosud používané a dnes již klasické jednorozměrné modely v požadované kvalitě a spolehlivosti poskytnout nemohou. Jedná se o informace o celkovém charakteru proudového pole, směrech a velikostech proudění vody, způsobu obtékání jednotlivých překážek a jejich vlivu na průběh hladiny a rychlostní pole apod., což jsou právě takové údaje, které mají pro hydraulickou a rizikovou analýzu povodňových situací a následné kvalifikované plánování a rozhodování mimořádný význam.

Vzhledem ke skutečnosti, že z výstupů navrženého numerického modelu a jeho nadstavbových modulů lze přímo čerpat detailní informace o průběhu hladiny, hloubkách vody, směrech a rychlostech proudění i informace o míře nebezpečí při povodni, jsou výstupy modelu dále přímo využitelné nejen při navrhování a optimalizaci opatření k ochraně před povodněmi, ale i při formulaci zásad pro využívání inundačních území a při zpracování jejich kategorizace, při zpracování územních plánů a generelů, plánování, optimalizaci a schvalování dopravních a jiných staveb v inundačních územích, při zpracování povodňových plánů a při řešení dalších praktických úloh územního plánování a správy vodních toků.

Literatura

1. Beck, J. et al.: Two Dimensional Modeling of Floods in an Urban Environment. In: Int. Conf. Preventing and Fighting Hydrological Disasters. Timisoara, Romania, 2002.
2. Beck, J. – Valenta, P. – Musy, A. : Flood Analysis and Mitigation on the Orlice River (FLAMOR). In: ERGW Letter, Land and Water Management in Europe. ICID, 2003, No. 14.
3. Cunge, J.A. – Holly, F.M. – Verwey, A.: Practical Aspects of Computational River Hydraulics. London: Pitman Publishing, 1980.
4. Čábelka, J. - Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Československá akademie věd, Praha : Academia, 1987.
5. Hervouet, J.M. – Van Haren, L.: Recent Advances in Numerical Methods for Fluid Flows. In: Floodplain Processes, John Wiley & Sons, 1996.
6. Horritt, M.S. - Bates, P.D.: Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation. Journal of Hydrology, 2002, Vol.268, No.1.
7. Kolář, V. – Patočka, C. – Bém, J.: Hydraulika. Praha : SNTL, 1983.
8. Langtangen, H.P. - Mardal, K.A. - Winther, R.: Numerical Methods for Incompressible Viscous Flow. Advances in Water Resources, 2002, Vol. 25.
9. Patera, A. – Váška, J. – Zezulák, J. – Eliáš, V. (eds.) : Povodně: prognózy, vodní toky a krajina. Ostrava: CICERO, 2002.
10. Rodi, W.: Turbulence Models and Their Application in Hydraulics. IAHR Monograph, 1980.
11. Satrapa L. (ed.) : Povodňové škody, Stanovení potenciálních škod způsobených povodněmi. Praha : Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, 1999.
12. Šulc, J.: Současné metody stanovení charakteristik proudící kapaliny a jejich aplikace při fyzikálním a matematickém modelování v hydrotechnice. Vědecké spisy VUT v Brně, sv. 119. Brno : VUT, Fakulta stavební, 2003.
13. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation : Downstream Hazard Classification Guidelines, 1988.
14. Willems, P. et al.: Quasi 2D River Flood Modelling. In : Bousmar – Zech (eds.): River Flow 2002. Swets & Zeitlinger, 2002.

Životopis

Ing. Petr Valenta, CSc

Narozen 18.9.1959, národnost česká, ženatý, dvě děti

Vzdělání a kvalifikace :

České vysoké učení technické v Praze, Stavební fakulta,
obor vodní stavby a vodní hospodářství - 1983

Kandidát technických věd, obor hydrotechnika - 1994

Zaměstnání:

1983 - 1988 Hydroprojekt, projektant

1988 - dosud Katedra hydrotechniky ČVUT, odborný asistent

Zahraniční praxe:

Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Německo, 1989/1990
(odborná stáž, výzkum, 10 měsíců)

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Německo, 1992/1993 (výzkum, 8
měsíců)

Odborné zaměření:

Vodní stavby a vodní hospodářství, obor hydrotechnika. Specializovaný
odborný zájem – vývoj a aplikace moderních numerických metod modelování
proudění vody, zejména hydrodynamických jevů v tocích a inundačních
územích, nyní v souvislosti s povodňovými událostmi posledních let především
výzkum a vývoj v oblasti numerického modelování povodňových situací a jeho
aplikací v protipovodňové ochraně.

Výuka:

Pedagogická činnost na katedře hydrotechniky spočívá ve výuce v předmětech :

Přehrady (cvičení), 1988 - 1989

Programování, Základy informatiky (cvičení), 1991 - 2001

Jezy, Vodní cesty a plavba (cvičení), 1989 - 1995

Technické aplikace programování (seminář), 1994 - 2001

Fyzikální a numerické modelování (seminář), 1999 - dosud

Experimentální metody hydraulického výzkumu (dokt. studium), 1999 - dosud

Ocelové konstrukce vodohospodářských staveb (cvičení), 1992 - dosud

Vodohospodářské stavby 28, obor Realizace staveb (přednášky), 1997 - 2000

Vodohospodářské stavby 12, obor M (přednášky), 2002 - dosud

Vodohospodářské stavby 12, obor E (přednášky), 1999 – dosud

Hydrotechnické stavby 10 – Jezy, obor V (přednášky), 2004 - dosud

Vědeckovýzkumná činnost:

V letech 1990-2004 spoluřešitel či řešitel výzkumných úkolů, které vesměs souvisely s vývojem a aplikací metod numerického modelování:

Metody operativního řízení vodohospodářských soustav, dílčí úkol státního výzkumného úkolu II-5-7/3, spoluřešitel, 1990

Řešení ekologických a technických problémů využití povrchových a podzemních vod, rektorátní grant ČVUT, spoluřešitel, 1992 - 1993

Vývoj pre- a postprocesorů pro metodu konečných prvků na bázi grafického editoru AutoCAD. Fakultní grant ČVUT, řešitel, 1995

Studium dynamiky přirozeného meandrujícího toku s pomocí fyzikálního a matematického modelování, projekt MŽP VaV/610/2/96, spoluřešitel, 1996

Hydrotechnický modelový výzkum nového plavebního stupně Přelouč, veřejná zakázka ŘVC ČR, řešitel části 2 – Numerické modelování, 1999

Eliminace vnějších vlivů na pohyb plavidel na vodní cestě. Projekt výzkumu a vývoje č. S409/140/801, spoluřešitel, 1998 - 2001

Extrémní hydrologické jevy v povodích. GAČR 103/99/1470, spoluřešitel, 1999 - 2001

Výzkumný úkol VaV/510/1/99 Ochrana a užívání vodních zdrojů v rámci uceleného povodí. (spolupráce s VÚV TGM Praha), 2001.

FLAMOR - Flood analysis and mitigation on the Orlice river. Česko-švýcarský výzkumný projekt, řešitel, 2000-2003.

FLAMIS - Flood analysis and mitigation in South Bohemia. Česko-švýcarský výzkumný projekt, řešitel, 2003-dosud.

Publikace:

Za posledních 5 let autor či spoluautor 28 odborných publikací, 9 výzkumných zpráv a 23 posudků a odborných studií.

Jazykové znalosti :

němčina, angličtina

Členství v odborných organizacích :

ČVTVHS sekce pro vodní toky