

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 362

ISSN 1213-418X

Aleš Dráb

**RIZIKOVÁ ANALÝZA
ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍ
S PODPOROU GIS**

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav vodních staveb

Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

**RIZIKOVÁ ANALÝZA ZÁPLAVOVÝCH
ÚZEMÍ S PODPOROU GIS**

**FLOOD RISK ANALYSIS
SUPPORTED BY GIS**

Teze habilitační práce
obor Vodní hospodářství a vodní stavby



Brno 2010

Klíčová slova: riziková analýza, GIS, povodeň, riziko, nebezpečí, ohrožení, škoda, poškození, zranitelnost

Key Words: risk analysis, GIS, flood, risk, hazard, danger, loss, damage, vulnerability

Místo uložení: Originál habilitační práce je uložen v archivu Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno. V tezích je uvedena podstatná část práce, kde je akcentován její hlavní přínos.

OBSAH

OBSAH	3
PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD	6
1.1 Cíle a obsah habilitační práce	6
1.2 Současný stav poznání řešené problematiky	6
2 METODY SNIŽOVÁNÍ POVODŇOVÉHO RIZIKA	7
2.1 Povodňové riziko a jeho definice	7
2.2 Řízení rizika (risk management) v záplavových územích	8
2.3 Postup rizikové analýzy záplavových území	9
2.4 Nejistoty v rizikové analýze záplavových území	9
2.5 Úloha GIS v rizikové analýze záplavových území	10
3 POVODŇOVÉ NEBEZPEČÍ A JEHO KVANTIFIKACE	11
3.1 1D numerické modelování proudění vody s podporou GIS	12
3.2 2D numerické modelování proudění vody s podporou GIS	12
4 ZRANITELNOST ZÁPLAVOVÉHO ÚZEMÍ A JEJÍ STANOVENÍ	13
5 POVODŇOVÉ RIZIKO A JEHO KVANTIFIKACE	14
5.1 Metoda matice rizika	14
5.2 Metoda založená na vyjádření potenciálních škod	18
6 PŘÍPADOVÁ STUDIE - VYUŽITÍ METOD RA V RÁMCI GENERELU ODVODNĚNÍ MĚSTA BRNA	21
6.1 Předběžná analýza zájmového území	21
6.2 Plošná riziková analýza zasaženého území	22
6.3 Hodnocení ekonomické efektivity PPO	25
7 ZÁVĚR	25
7.1 Dosažené výsledky autora v oboru RA	25
7.2 Podněty pro další výzkum v oboru RA	26
7.3 Dosažené výsledky v oblasti výuky a koncepce vzdělávání v oboru RA a GIS	26
8 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	28
8.1 Literatura	28
8.2 Související legislativa a normy	31
9 SEZNAM AUTOREM ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ SOUVISEJÍCÍCH S TÉMATEM PRÁCE	33
9.1 Vědecko výzkumné projekty	33
9.2 Projekty s praktickou aplikací metod RA	33
9.3 Projekty zaměřené na podporu výuky GIS a RA	34
ABSTRACT	35

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Aleš Dráb, Ph.D

Narozen: 22.6. 1974 v Jablonci nad Nisou



Vzdělání:

- Gymnázium Táborská, Brno (1988 – 1992).
- Ing. – 1997, Vysoké učení technické v Brně, FAST, studijní obor Vodní hospodářství a vodní stavby.
- Ph.D. – 2002, Vysoké učení technické v Brně, FAST, disertační práce na téma: „Riziková analýza záplavových území“, obor: 36 – 35 – 9 Vodní hospodářství a vodní stavby.

Odborné zaměření:

Riziková analýza záplavových území, protipovodňová ochrana, geografické informační systémy a jejich aplikace ve vodním hospodářství, hydroinformatika, numerické modelování proudění vody, využití vodní energie.

Přehled zaměstnání:

Od roku 2000 doposud – asistent a odborný asistent na Ústavu vodních staveb, Fakulty stavební, VUT v Brně.

Odborné stáže:

Společnost Pöyry Environment – od roku 2006 celkem 3 stáže a přednáškové cykly zaměřené na zavádění GIS při řešení úloh vodního hospodářství a rizikovou analýzu záplavových území v celkové délce 2 měsíce.

Pedagogická činnost:

Od roku 1998 do současnosti na Ústavu vodních staveb, FAST, VUT v Brně výuka těchto předmětů inženýrského, bakalářského a magisterského studijního programu:

- CR56 Protipovodňová ochrana (přednáška + cvičení)
- CR04 Hydroinformatika (garant)
- CR54 Geographical Information Systems in Water Management (garant)
- BR07 Hydrotechnické stavby II (cvičení)
- BR08 Projekt vodní stavby (cvičení)
- BR04 Hydraulika (cvičení)
- 0R0 Hydraulika I (cvičení)
- 0R2 Hydraulika a hydrologie I (cvičení)
- 0R3 Hydraulika II (cvičení)
- 0R5 Přehrady a využití vodní energie (cvičení)
- 0R8 Přehrady (cvičení)
- 1R1 Využití vodní energie, VCP (cvičení)

V doktorském studijním programu výuka následujících předmětů:

- DS66 Analytické nástroje a datové modely GIS (garant)
- DS77 Využití GIS ve vodním hospodářství (přednáška + cvičení)

Další činnosti související s pedagogickým procesem:

- Řešitel nebo spoluřešitel 7 projektů zaměřených na podporu výuky protipovodňové ochrany, hydroinformatiky a geografických informačních systémů na FAST, VUT v Brně.
- Školení odborné veřejnosti v rámci kurzů celoživotního vzdělávání ČKAIT a odborných přednášek.
- Vyzvané přednášky na vysokých školách.
- Autor nebo spoluautor učebních textů a kurzů e-learningu.
- Od roku 2003 vedení celkem 11 obhájených diplomových prací a 4 bakalářských prací.
- Školitel studentů doktorského studia.

Výzkumné projekty:

Odpovědný řešitel nebo spoluřešitel 9 výzkumných projektů zaměřených na rizikovou analýzu záplavových území a numerické modelování proudění vody v záplavových územích.

Spolupráce s praxí:

- Řešitel, popř. spoluřešitel 15 inženýrských projektů zahrnujících praktickou aplikaci metod rizikové analýzy záplavových území. Z uvedených projektů lze několik kvalifikovat jako významná inženýrská díla orientovaná na protipovodňovou ochranu města Brna, hlavního města Prahy a dalších vybraných úseků významných vodních toků v ČR.
- Spoluautor metodiky pro stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území dle požadavků Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.
- Posudková činnost v oblasti hodnocení investičních záměrů na realizaci protipovodňových opatření v ČR (cca 150 posudků), posudky a studie v oboru využití vodní energie.
- Odborný konzultant v rámci soudně znaleckých posudků.
- Programátorská činnost v oblasti tvorby účelových aplikací pro GIS.

Publikace:

Autor nebo spoluautor těchto publikací:

- monografie: 3x
- původní vědecká práce ve vědeckém časopisu s IF > 1: 1x
- původní vědecká práce ve vědeckém časopisu bez IF: 2x
- významná inženýrská díla: 3x
- příspěvek ve sborníku světového nebo evropského kongresu: 4x
- abstrakt ve sborníku světového nebo evropského kongresu: 2x
- příspěvek ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu: 15x
- publikace v odborném časopisu: 2x
- skripta: 5x

1 ÚVOD

1.1 CÍLE A OBSAH HABILITAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je prokázat vědecký a odborný přínos autora v oboru rizikové analýzy záplavových území (RA) v souvislosti s využitím geografických informačních systémů (GIS). Habilitační práce představuje průřez problematikou řešenou autorem v uplynulých cca 8 letech. Jedná se především o shrnutí dílčích výsledků z aplikovaného výzkumu a řešení řady praktických úloh v rámci projektů uvedených v kap. 9.1 a 9.2. Hlavní motivací autora pro výzkum v oboru RA a GIS je zejména navazující pedagogická činnost zahrnující přenos získaných výsledků výzkumu a vývoje do praktického využití ve státní a podnikatelské sféře. Tato činnost je realizována výukou v bakalářských, magisterských, doktorských studijních programech a dále formou celoživotního vzdělávání pracovníků z praxe. Přehled projektů řešených autorem v oblasti podpory výuky podává kap. 9.3.

Práce obsahuje popis postupů zpracování jednotlivých etap RA s důrazem na využití nástrojů GIS. Vzhledem ke značné šíři problematiky RA se práce zaměřuje pouze na úzce vybranou oblast zahrnující metody a postupy, které již byly v podmínkách ČR realizovány, se kterými má autor praktické zkušenosti a u kterých je předpoklad zařazení do metodického pokynu na zpracování map povodňového nebezpečí a rizik v rámci směrnice [ES 2007]. Konkrétně se jedná o metodu matice rizika a metodu založenou na vyjádření potenciálních povodňových škod. Uvedené metody prošly v ČR během minulých let dlouhým vývojem, na kterém se autor práce aktivně podílel (viz kap. 9) a který umožnil jejich současné široké uplatnění ve vodohospodářské praxi. Vývoj zahrnoval především teoretické rozbory a úpravy metod, testování na pilotních lokalitách, volbu vstupních podkladů a tvorbu účelových programových nástrojů. Vzhledem ke značnému rozsahu zmiňovaných činností jsou v habilitační práci dokumentovány pouze konečné výsledky.

1.2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Zkušenosti z extrémních povodňových událostí v ČR v minulých letech ukázaly potřebu systematického přístupu k řešení otázek spojených s ochranou před povodněmi. Jako velice účinné se jeví postupy založené na teorii řízení rizika (risk management). Zmiňovaný trend potvrzují i četné zahraniční publikace [Klijn et al. 2008], [Schanze et al. 2008], [Hutter 2007], [Alphen and Passchier 2007], [Samuels et al. 2006] a výsledky mezinárodních projektů. Mezi nejvýznamnější projekty z poslední doby patří např. Flood Site nebo CRUE ERA-NET. Účelem metod řízení rizika je zejména identifikace ohrožených oblastí a následný cílený návrh vhodných protipovodňových opatření (PPO). Koncepce PPO by měla být dle využití ohrožených území diferencovaná, podpořená analýzou nákladů a užitků [Schanze et al. 2008], popř. hodnocením dalších hledisek (environmentální, sociální, apod.) [Meyer et al. 2007], [Meyer, Scheuer and Haase 2009], [Kubal et al. 2009].

Význam metod RA a aktuálnost problematiky ochrany před povodněmi potvrzuje v oblasti legislativy projednání Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik [ES 2007]. Směrnice naznačuje masivní nasazení metod RA v členských zemích Evropské unie, tedy i v České republice. Konkrétně požaduje vytvoření účinných nástrojů, které poskytnou informace o povodňovém riziku a umožní stanovit priority pro přijímání dalších technických, finančních a politických rozhodnutí týkajících se zvládání povodňových rizik. Tento cíl bude zajištěn vytvořením map povodňových nebezpečí a map povodňových rizik znázorňujících možné nepříznivé následky různých povodní. Dále budou zpracovány tzv. plány pro zvládání povodňových rizik s cílem předcházet nepříznivým dopadům povodní se zaměřením na omezení škod na lidském zdraví, životním prostředí, kulturním dědictví a ekonomické činnosti [ES 2007].

Nutno konstatovat, že postupy rizikového hodnocení v protipovodňové problematice jsou v České republice rozvíjeny a aplikovány již od katastrofických povodní v roce 1997 a jsou v souladu s evropskými a světovými trendy. Stav v tomto oboru byl mimo jiné dokumentován v monografii [Říha 2005], monotematickém čísle Urbanismu a územního rozvoje 5/2006 (viz [Satrapa, Fošumpaur, Horský 2006], [Drbal aj. 2006a], [Dráb 2006]), příspěvku [Dráb 2007] a výstupech projektu [7] publikovaných v [Drbal 2005].

Je potěšitelné, že do nadcházejícího období vstupuje Česká republika připravena z pohledu dostupných nástrojů RA a ve smyslu jejich praktického ověření v řadě pilotních lokalit i území, která byla hodnocena např. v rámci projektu [7] a dále při posuzování protipovodňových opatření navržených do II. etapy Programu prevence před povodněmi [12] dle [MZe ČR 2006] a [ČVUT 2005]. V současné době se rovněž projevují snahy zapracovat výsledky RA do obnovovaných územních plánů např. v rámci generelů odvodnění urbanizovaných oblastí (viz [21], [22]).

Aktuálně se k řešení otázek spojených povodňovou problematikou využívají v ČR převážně podklady vycházející z dokumentace záplavových území (ZÚ), popř. studií odtokových poměrů (SOP). Tyto dokumenty (ZÚ, SOP) podporované stávající legislativou [Zákon č. 254/2001 Sb.], [Vyhláška MŽP 236/2002 Sb.] jsou základními podklady při hodnocení záplavového území a poskytují první informace týkající se možného celkového rozsahu záplavy a hrubého stanovení více a méně nebezpečných zón (tzv. aktivní zóny). V souladu se směrnicí [ES 2007] budou tyto dokumenty využívány i nadále pro účely tzv. předběžného vyhodnocení povodňových rizik, které má za cíl vytipovat ohrožené lokality pro následné zpracování map povodňového nebezpečí a rizik. RA se v současné době stává rutinním nástrojem při hodnocení míry ohrožení území v důsledku povodňového nebezpečí a při posouzení ekonomické rentability navrhovaných opatření na ochranu před povodněmi. Její praktické použití a možnosti jsou dosud vnímány zejména vodohospodářskými odborníky správců povodí, v menší míře pak vodohospodáři činnými ve státní správě. Menší zájem je prozatím zřejmý u urbanistů a pracovníků odborů rozvoje, územního plánování a stavebního řádu, kteří obvykle koordinují činnosti při vyhotovení územních plánů.

Aktuálně nejrozsáhlejší aplikace metod rizikové analýzy záplavových území byla na území ČR v souladu se směrnicí [ES 2007] realizována během zpracování Generelu odvodnění města Brna (GOMB), který by se měl stát základním vodohospodářským podkladem v procesu územního plánování na území Brna [22]. V rámci jeho zadání se v části „Vodní toky - ochrana před povodněmi“ podařilo prosadit vyhodnocení povodňového rizika na celém území města Brna, a také formalizované posouzení rentability navrhovaných protipovodňových opatření metodou nákladů a užitků. Podrobněji se o rozsahu zpracovaného území v rámci GOMB zmiňuje kap. 6.

2 METODY SNIŽOVÁNÍ POVODŇOVÉHO RIZIKA

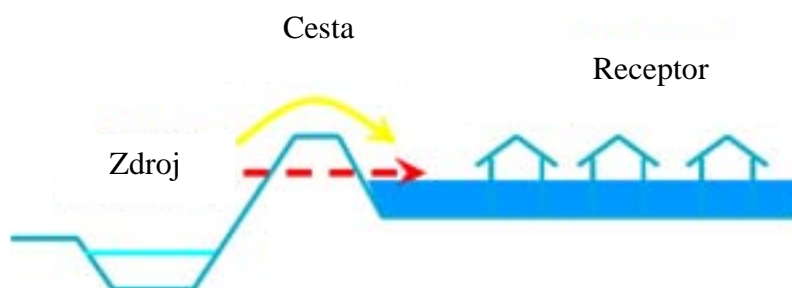
2.1 POVODŇOVÉ RIZIKO A JEHO DEFINICE

Terminologie v oboru rizikové analýzy záplavových území (RA) dosud není na lokální ani mezinárodní úrovni zcela jednotná. Z toho důvodu jsou v této kapitole uvedeny definice základních pojmů tak, jak jsou chápány v textu práce. Obsah jednotlivých pojmů vychází především ze zkušeností autora se zaváděním základní terminologie v oboru RA záplavových území v ČR [Drbal 2003], [Říha 2005] a z aktuálních trendů v této oblasti na evropské úrovni [Gouldby 2009].

Základním pojmem v oboru RA je povodňové riziko, které lze definovat pomocí koncepčního modelu „zdroj – cesta – receptor“ (z anglického source – pathway – receptor) [Gouldby 2009]. Tento model přehledně zachycuje jevy a procesy, které ve svém důsledku vedou k zaplavení území a následně ke vzniku povodňových poškození a škod. Iniciátorem povodňového rizika je tzv. „zdroj“, který představuje hrozbu nepříznivého jevu (povodně), kterou označujeme pojmem povodňové ohrožení. Míra povodňového ohrožení je závislá na tzv. „cestě.“ Ta v koncepčním

modelu představuje určitý sled událostí s danou pravděpodobností výskytu, které vedou k zaplavení území (vzniku povodňového nebezpečí) a následné expozici. Expozicí rozumíme vznik povodňových poškození a škod na tzv. „receptorech“ (osoby, majetek, příroda a krajina) v důsledku působení povodňového nebezpečí. Stupeň poškození a škod na „receptorech“ závisí především na:

- povodňovém nebezpečí (viz kap. 3), jehož míru lze kvantifikovat na základě charakteristik průběhu povodně (průtok, hloubka a rychlost proudění vody, doba zaplavení atd.);
- zranitelnosti „receptorů“ (viz kap. 4), která vyjadřuje jejich citlivost na působení povodňového nebezpečí.



Obr. 2.1 – Schéma koncepčního modelu zdroj-cesta-receptor

Povodňové riziko vzniká pouze za předpokladu, že dojde k expozici, tj. ke kontaktu povodňového nebezpečí a „receptorů“ s definovanou zranitelností. Z uvedeného rovněž vyplývá, že riziko lze v rámci tohoto přístupu definovat jako funkci pravděpodobnosti výskytu povodňového nebezpečí a odpovídajících následků (poškození a škod). Konkrétním postupům pro vyjádření povodňového rizika je věnována kap. 5.

2.2 ŘÍZENÍ RIZIKA (RISK MANAGEMENT) V ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍCH

Cílem procesu označovaného jako řízení rizika (risk management) je dosažení přijatelné míry rizika v ZÚ. Tento proces obvykle probíhá ve čtyřech etapách:

1. Formulace řešeného problému.
2. Vyhodnocení rizika (risk assessment).
3. Návrh opatření pro snížení rizika, popř. k jeho udržování na přijatelné míře.
4. Realizace zvolených protipovodňových opatření.

První etapa procesu zahrnující formulaci řešeného problému by měla obsahovat především:

- vytyčení řešeného problému jasnou a jednoznačnou terminologií,
- prostorové a časové vymezení řešeného problému,
- určení případných omezení při hodnocení (časová, finanční, legislativní, apod.),
- evidenci možných zdrojů nejistot,
- vytvoření koncepčního modelu zahrnujícího „zdroje“ nebezpečí, „receptory“ a možné „cesty“ vzniku expozice.

Podstatou navazující druhé etapy procesu je posouzení, zda povodňové riziko stanovené metodami RA nepřekračuje přijatelné meze.

Cílem třetí etapy je pak nalézt vhodná protipovodňová opatření (PPO) v případech, kdy povodňové riziko překračuje přijatelné meze. Návrh těchto opatření je součástí tzv. plánů pro

zvládání povodňových rizik, které jsou definovány směrnicí [ES 2007]. Úkolem navržených PPO je především snížit škody způsobené povodněmi, přičemž hlavní prioritou je maximálně omezit ztráty na životech lidí a zvířat. Zde je třeba zdůraznit fakt, že 100% (tj. absolutní) PPO neexistuje. PPO je možné obecně rozdělit do dvou základních skupin:

- strukturální (technická),
- nestrukturální.

Strukturální (technická) opatření zahrnují zejména úpravy na vodních tocích a v inundačních územích. Opatření směřují k zajištění dostatečné kapacity koryt toků, stability dna a břehů koryt, zvýšení retenční schopnosti a transformaci objemu povodňové vlny v prostoru a čase nádržemi, poldry apod. Tyto prvky se vyznačují okamžitou odezvou po vybudování, jejich účinek lze poměrně dobře kvantifikovat a jsou obvykle známy i jejich negativní účinky, slabá místa a rizikové faktory. Podskupinou strukturálních opatření jsou tzv. opatření blízka přírodě [MŽP 2008].

Mezi nestrukturální spadají především bezpečnostní opatření a organizování služeb pro havarijní případy, jako jsou kvalifikované hydrologické předpovědi povodňových situací, hlásná a povodňová služba, organizace evakuačních a záchranných prací apod. Do této skupiny rovněž zahrnujeme územní plánování, které hraje důležitou úlohu při preventivním snižování nepříznivých účinků povodní [Dráb 2006], [Dráb, Říha 2008], [Satrapa 2006], [Konvička 2002].

2.3 POSTUP RIZIKOVÉ ANALÝZY ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍ

Postup RA je možné zobecnit do dvou základních kroků, které jsou podrobně popsány v kap. 3 až 5:

1. **Kvalitativní analýza** – tento krok představuje v souladu se směrnicí [ES 2007] tzv. předběžné vyhodnocení povodňových rizik, které má za cíl vytipovat ohrožené lokality pro následné zpracování map povodňového nebezpečí a rizik.
2. **Kvantitativní analýza** - v této fázi jsou určeny pravděpodobnosti a následky definovaných povodňových událostí. Riziko je kvantifikováno diskretními hodnotami nebo jako funkční závislost pravděpodobnosti a rozsahu potenciálních poškození nebo škod (viz kap. 5). Kvantitativní analýza zahrnuje vyčíslení povodňového nebezpečí, stanovení zranitelnosti záplavového území a kvantifikaci rizika. V souladu s [ES 2007] se v rámci rizikové analýzy záplavových území obvykle provádí kvantifikace těchto druhů rizik:
 - riziko vzniku poškození a škod na majetku,
 - individuální a společenské riziko (vyplývající z ohrožení obyvatelstva),
 - environmentální riziko (dopady na přírodu a krajinu v souvislosti se zaplavením potenciálních zdrojů znečištění, kontaminací zdrojů pitné vody apod.),
 - riziko poškození citlivých objektů (nemocnice, hasiči, policie, historické objekty apod.).

Další text práce je zaměřen pouze na první jmenovaný druh rizika, jehož stanovení již bylo v podmínkách ČR ověřeno na řadě pilotních lokalit a v rámci praktických aplikací (viz kap. 9).

2.4 NEJISTOTY V RIZIKOVÉ ANALÝZE ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍ

Nejistoty obecně zahrnují všechny etapy zpracování rizikové analýzy, od prostých chyb měření a pozorování až ke komplexním nejistotám předpovědí, nahodilosti přírody, přesnosti modelů, budoucích potřeb, možností, chování lidí a politickým omezením. Jejich povaha může být

fyzikální, ekonomická, environmentální nebo společenská. Důležitou otázkou je zvažování, zda nejistota může nějakým způsobem ovlivnit výsledky RA a pokud ano, tak v jaké míře. Zařazení kvantifikace nejistot do RA není zatím v praxi zcela běžnou záležitostí a objevuje se spíše výjimečně. Vyjádření nejistot lze provést s využitím např. těchto metod:

- statistické modelování (např. metoda Monte-Carlo a její modifikace) [U.S. Army 1996],
- intervalová analýza [Pownuk 2004],
- citlivostní analýza [Saltelli 2005].

2.5 ÚLOHA GIS V RIZIKOVÉ ANALÝZE ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍ

GIS představují spolu s numerickým modelováním proudění vody (viz kap. 3) základní nástroje RA. V Tab. 2.1 jsou shrnuty hlavní možnosti použití GIS ve vazbě na jednotlivé etapy RA uvedené v kap. 2.3.

Důvodem rozsáhlého využívání GIS v RA je především nutnost zpracování širokého okruhu geografických dat, jejich analýza a následná prezentace výsledků. Konkrétnější představu o možnostech využití GIS podávají následující kap.3 až 5, věnované jednotlivým etapám RA.

Tab. 2.1 – Funkce GIS v rizikové analýze záplavových území

Etapa RA dle kap. 2.3	Funkce GIS
Kvalitativní analýza	<ul style="list-style-type: none"> • Shromáždění a analýza informací za účelem předběžného vyhodnocení povodňových rizik. Jedná se o vymezení oblastí, kde lze předpokládat nepříznivé účinky povodňového nebezpečí na lidské zdraví, životní prostředí, kulturní dědictví a hospodářskou činnost.
Kvantitativní analýza – kvantifikace povodňového nebezpečí (viz kap. 3)	<ul style="list-style-type: none"> • Příprava vstupních dat (pre-processing) a vyhodnocení výsledků výpočtů (post-processing) numerických modelů proudění vody. • Vyhodnocení informací o historických povodních. • Zpracování výsledků výpočtů popř. informací z historických povodní do podoby map povodňového nebezpečí.
Kvantitativní analýza – stanovení zranitelnosti ZÚ (viz kap. 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Kategorizace majetku v záplavových územích pro účely RA. • Zpracování statistických údajů o poškozeních a škodách z historických povodní (např. počty zranění a úmrtí obyvatel, vyčíslení škod na majetku atd.).
Kvantitativní analýza – kvantifikace rizika (viz kap. 5)	<ul style="list-style-type: none"> • Kvantifikace rizika a prezentace výsledků v číselné nebo grafické podobě (mapy povodňového ohrožení a rizika).

3 POVODŇOVÉ NEBEZPEČÍ A JEHO KVANTIFIKACE

V rámci kap. 2.1 bylo povodňové nebezpečí definováno jako důsledek určitého sledu událostí s danou pravděpodobností výskytu („cesta“), který ve svém důsledku vede k zaplavení území, tj. ke vzniku povodně. Povodeň, kterou chápeme jako hydrologický extrém, je výsledkem složitého procesu, do kterého se kromě klimatických vlivů promítají i faktory související se srážkoodtokovým procesem, jako je např. stupeň nasycení zemského povrchu, druh zemského pokryvu, roční období atd. Mezi další podstatné faktory patří antropogenní vlivy, které zahrnují např. způsob hospodaření v krajině, vliv vodohospodářských a dalších objektů na tocích apod. Výsledná pravděpodobnost výskytu daného povodňového nebezpečí tak kromě nahodilosti působících přírodních jevů postihuje i zmiňované antropogenní vlivy. Stanovení dílčích pravděpodobností jednotlivých zmiňovaných jevů je do značné míry limitováno nedostatkem údajů z dlouhodobého měření příslušných náhodných veličin. Zajištění podrobného měření by vyžadovalo vybudování rozsáhlého monitorovacího systému, jehož realizace není z praktických důvodů v plném rozsahu možná.

Z uvedených příčin je pro vodohospodářskou praxi nezbytné přijmout určitá zjednodušení, která i za současných podmínek umožní stanovení pravděpodobnosti výskytu daného povodňového nebezpečí. Jednou z dostupných možností je využití údajů o velikosti a průměrné době opakování kulminačních průtoků. Tyto informace ve formě N -letých průtoků poskytuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) v souladu s normou ČSN 75 1400. Pro povodí s dostatečným množstvím měrných profilů jsou hodnoty N -letých vyhodnocovány metodami matematické statistiky (frekvenční analýzou) z naměřených dat [Starý 2005], [Sommer 1985], [Gelder et al. 1999]. V případě nedostatečného počtu měření v měrných profilech jsou tyto hodnoty stanovovány na podkladě výsledků srážkoodtokových modelů vycházejících z údajů sítě srážkoměrných stanic pokrývajících celé území ČR (srážkoměrná síť ČHMÚ). Další možností je stanovení hodnot N -letých průtoků např. s využitím metod analogie [Starý 2005], [Sommer 1985].

Požadovanou pravděpodobnost překročení daného kulminačního průtoku je pak možné odvodit na základě průměrné doby opakování příslušného kulminačního průtoku N ze vztahu [Starý 2005], [Sommer 1985]:

$$p = 1 - e^{-p'} = 1 - e^{-\frac{1}{N}}, \quad (3.1)$$

kde p' značí periodicitu. Pro hodnoty cca $N \geq 5$ lze uvažovat:

$$p \approx p' = \frac{1}{N}. \quad (3.2)$$

Pro stanovení povodňového rizika je třeba kromě zmiňované pravděpodobnosti kvantifikovat i míru povodňového nebezpečí. Tu lze vyjádřit na základě tzv. charakteristik průběhu povodně, které zahrnují především:

- hydrologické údaje (např. kulminační průtok a hydrogram povodně),
- hranice rozlivů a hloubky vody v záplavovém území,
- rychlosti proudění vody v záplavovém území,
- dobu zaplavení,
- teplotu vody,
- kontaminaci nebezpečnými látkami.

Podstatou kvantifikace povodňového nebezpečí je určení časoprostorového rozdělení uvedených charakteristik průběhu povodně a zpracování těchto údajů do podoby tzv. map

povodňového nebezpečí. Ty slouží následně jako podklad pro kvantifikaci rizika. K určení charakteristik průběhu povodně lze v první fázi využít existujících podkladů (např. dokumentace ZÚ přirozených a zvláštních povodní, SOP, mapy a atlasy ZÚ, záznamů z historických povodní). Tyto podklady slouží především pro získání prvotní informace o povodňovém nebezpečí. Ke zpracování RA je obvykle nutné použití jednorozměrných (1D) nebo dvojrozměrných (2D) numerických modelů proudění vody v tocích a v záplavových územích, které umožňují provedení výpočtů pro širší škálu kulminačních průtoků, zahrnutí vlivu navrhovaných PPO apod. Volba dimenze numerického modelu (1D nebo 2D) a přijaté zjednodušující předpoklady jsou vždy kompromisem mezi požadavky použité metody hodnocení rizika, úrovní dostupných dat a časovými a finančními možnostmi zadavatele. Obdobně jako dimenzi použitého matematického modelu je nutné zvážit vliv nestacionarity proudění na kvantifikaci rizika v ZÚ. Obecně lze říci, že řešení ustáleného proudění je méně náročné než řešení proudění neustáleného. Na druhou stranu model ustáleného proudění nezohledňuje transformaci povodňové vlny inundací, což může v některých případech vést k poměrně velkému zkreslení výsledků. Další text kapitoly je věnován podrobnějším informacím o využití GIS ve spojení s 1D a 2D numerickými modely pro kvantifikaci povodňového nebezpečí. Dosavadní zkušenosti z použití GIS k těmto účelům potvrdily, že se jedná o efektivní nástroj s širokým okruhem možností.

Na Ústavu vodních staveb, FAST VUT v Brně probíhá vývoj programových nástrojů na podporu využití GIS při práci s 1D a 2D hydrodynamickými modely [27, 28]. Zmiňované nástroje jsou vytvářeny zejména v jazycích VBA, VBS, Python a jsou učené pro programy z řady ArcGIS firmy ESRI. Tyto nástroje byly využity např. v rámci projektu [11].

3.1 1D NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY S PODPOROU GIS

Jednorozměrný (1D) model proudění je vhodné použít v případech, kdy je v průtočném profilu dostatečně přesná aproximace:

- rychlosti proudění jednou hodnotou - průřezovou rychlostí,
- konstantní polohou hladiny.

V případě proudění v širokém inundačním území jsou většinou rychlosti a hloubky vody v průtočném profilu natolik rozdílné, že je výpočet potřebné provést 2D modelem. V současné praxi se jako jedno z možných východisek pro výpočet proudění vody, zejména v urbanizovaných územích (uliční sítě), používá rovněž tzv. 1,5 dimenzionálních modelů (1,5D), které vycházejí z matematického popisu proudění za předpokladu 1D aproximace. Síť „koryt“ (jednotlivé ulice, průlehy v inundačním území, apod.) je v záplavovém území třeba předem zadat. Síť může být větvená nebo zaokruhovaná. Základní rovnice pro řešení 1D úloh proudění vody v tocích byly odvozeny s využitím zákona zachování hmotnosti a věty o změně hybnosti. Vstupní předpoklady a odvození těchto rovnic je uvedeno např. v publikaci [Chow 1959].

Mezi nejrozšířenějším programové vybavení, používané v ČR pro řešení 1D úloh proudění vody, patří především HEC-RAS [USACE 2008] a MIKE11 [DHI 2008]. Oba zmiňované programy (MIKE11, HEC-RAS) podporují ve fázích přípravy dat (pre-processing) i vyhodnocení výsledků (post-processing) využití GIS.

Kromě správy vstupních dat jsou GIS ve spojení s 1D modely využívány především k vyhodnocení výsledků výpočtů, jehož produktem jsou mapy povodňového nebezpečí zahrnující údaje o hloubkách a rychlostech proudění vody.

3.2 2D NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY S PODPOROU GIS

Hydraulické výpočty proudění pomocí 2D numerických modelů se používají pro stanovení charakteristik průběhu povodně zejména v případech kdy:

- je nezbytné stanovit plošné rozložení charakteristik průběhu povodně v zájmovém území, tj. hloubky vody a složky vektoru svislicové rychlosti;
- zájmové území je po stránce morfologické natolik členité, že použití 1D schematizace není možné nebo je příliš komplikované.

2D numerické modely jsou založeny na řešení rovnic proudění vody o malé hloubce s volnou hladinou v zahraniční literatuře uváděné jako “shallow water equations“ [Vreugdenhil 1988]. Mezi nejrozšířenější programové vybavení používané v ČR k řešení tohoto typu úloh patří především MIKE21 [DHI 2008], SMS - FESWMS [AQUAVEO 2009] a FAST2D [Valenta 2004]. Zmiňované programy podporují stejně jako v případě 1D modelů využití GIS ve fázích přípravy dat (pre-processing) i vyhodnocení výsledků (post-processing)

Možnosti využití GIS ve spojení s 2D modely jsou obdobné jako u 1D modelů, tj. příprava dat (pre-processing) a vyhodnocení výsledků (post-processing). Vyhodnocení výsledků výpočtů v GIS spočívá v jejich interpretaci z údajů o vypočtených veličinách v diskrétních bodech (výpočtové uzly) do podoby spojitého rozložení hodnot na náhradní oblasti.

4 ZRANITELNOST ZÁPLAVOVÉHO ÚZEMÍ A JEJÍ STANOVENÍ

V souladu s definicí v kap. 2.1 je zranitelnost chápána jako vlastnost objektu, která se projevuje náchylností ke škodám v důsledku působení povodňového nebezpečí a expozice. ZÚ představuje složitou strukturu tvořenou velkým množstvím různorodých objektů. Z důvodů praktické proveditelnosti metod RA je proto nezbytné ZÚ schematizovat na zvolené úrovni podrobnosti a zaměřit se jen na podstatné skupiny objektů, mezi které zahrnujeme:

- majetek (budovy vč. vybavení, infrastruktura, zemědělské pozemky atd.),
- obyvatelstvo,
- potenciální zdroje znečištění v případě zaplavení,
- citlivé objekty (nemocnice, památky, hasiči atd.).

S ohledem na metody kvantifikace rizika popsané v kap. 5 je další text práce orientován pouze na postupy stanovení zranitelnosti majetku v ZÚ. Vyjádření zranitelnosti ostatních zmiňovaných skupin objektů bylo autorem řešeno např. v rámci projektů [7], [8], [22], [23].

Prvním krokem ke stanovení zranitelnosti ZÚ je, v závislosti na použité metodě RA, volba vhodné rozlišovací úrovně. V zásadě se používají následující dvě rozlišovací úrovně majetku [Drbal 2005]:

- Rozlišovací úroveň majetku I. – představuje plochy zahrnující stavební objekty s podobným funkčním využitím (plochy pro bydlení, průmysl, služby atd.).
- Rozlišovací úroveň majetku II. – představuje jednotlivé stavební objekty (např. budovy, infrastruktura apod.) a plochy (např. zemědělské pozemky, zpevněné plochy apod.).

Rozlišovací úroveň majetku I. je využívána především ve spojení s metodou matice rizika (viz kap. 5.1). Hlavním zdrojem podkladů pro identifikaci ohrožených ploch v záplavovém území je územně plánovací dokumentace (ÚPD) obcí, která poskytuje informace o stávajícím a navrhovaném funkčním využití území.

Stanovení zranitelnosti se v případě použití metody matice rizika provádí přiřazením tzv. přijatelné míry rizika pro jednotlivé funkční plochy v zájmovém území (viz Tab. 5.1).

Rozlišovací úroveň majetku II. se používá ve spojení s metodou RA založenou na odhadu potenciální povodňových škod na majetku v ZÚ (viz kap. 5.2). Následující text popisuje postup kategorizace majetku v souladu s metodikou [MZe ČR 2006]. Ta spočívá v kategorizaci zasažených ploch a stavebních objektů v ZÚ podle způsobu jejich využití. Provádí se na podkladě

dat ZABAGED [ČÚZK 2008], katastrálních map, ÚPD, Registru sčítacích obvodů [ČSÚ 2008] a místních šetření. Pro stávající stav v zájmových lokalitách je třeba vymezit tyto kategorie majetku s přímou vazbou na ekonomické škody: obytné objekty, objekty občanské vybavenosti, průmyslové objekty, pozemní komunikace, železniční komunikace, mosty, zpevněné plochy, infrastruktura, sportovní plochy, zemědělská půda, lesní půda.

Zranitelnost majetku se v této rozlišovací úrovni a při použití metod RA založených na odhadu potenciální povodňových škod (viz kap.5.2) stanovuje na základě tzv. škodních křivek (viz Obr. 5.5).

5 POVODŇOVÉ RIZIKO A JEHO KVANTIFIKACE

V následujících kapitolách jsou uvedeny dvě základní metody RA sloužící ke kvantifikaci povodňového rizika. Jedná se o:

- metodu matice rizika,
- metodu potenciálních povodňových škod.

Jde o v současnosti nejrozšířenější metody RA používané v ČR ke kvantifikaci povodňových rizik, které již byly aplikovány na řadě konkrétních lokalit. Tyto metody budou rovněž zařazeny do metodického pokynu k implementaci směrnice [ES 2007]. V dalším textu je uveden princip zmiňovaných metod, postup jejich zpracování s využitím GIS a doporučená interpretace výsledků analýz doložená na praktických příkladech v kap. 6.

5.1 METODA MATICE RIZIKA

Pro plošné hodnocení povodňového nebezpečí, zranitelnosti, ohrožení a následně i rizika je vhodná metoda vycházející z tzv. matice rizika [Říha 2005], [Zimmerman et al. 2005], [FOWM 1997]. Metoda nevyžaduje kvantitativní odhad škody způsobené vyběžením vody z koryta, ale vhodným způsobem vyjadřuje povodňové ohrožení a riziko. Při hodnocení ZÚ v první fázi nepostihuje zranitelnost. Ta je nezbytným činitelem při stanovení vlastního rizika a do hry se dostává až v konečné fázi zpracování nad mapami charakterizujícími využití území (ÚPD). Zranitelnost je v použité metodě vyjádřena ve formě tzv. přijatelného rizika, resp. nezbytných opatření pro jednotlivé typy objektů a omezení aktivit ve vybraných částech území. Tato skutečnost naznačuje využití této metody zejména v oblasti územního plánování [Dráb 2006], [Dráb, Říha 2008], lokalizace rozvojových ploch, ale i při zpracování vodohospodářských generelů urbanizovaných území [21], [22]. Zavedení popsaného hodnocení zranitelnosti a přijatelného rizika je hlavním přínosem autora k rozšíření původní citované metody. V metodě rizikové matice je povodňové ohrožení definováno jako funkce pravděpodobnosti překročení příslušného N -letého kulminačního průtoku a tzv. intenzity povodně, která vyjadřuje povodňové nebezpečí. Povodňové ohrožení se stanovuje s použitím tzv. matice rizika (viz Obr. 5.1). Postup metody spočívá ve třech krocích:

- Kvantifikace povodňového nebezpečí – výpočet intenzity povodně na základě hloubek a rychlostí proudění vody.
- Stanovení povodňového ohrožení pomocí matice rizika.
- Stanovení ploch se zvýšeným rizikem s využitím údajů o zranitelnosti území.

V rámci kvantifikace povodňového nebezpečí je třeba definovat a popsat nebezpečí, které je vyjádřeno pomocí intenzity povodně IP . Ta je chápána jako měřítko ničivosti povodně a je definována jako funkce hloubky vody h a rychlosti proudění vody v :

$$IP(h, v) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ h, & h > 0 \text{ m}, v \leq 1 \text{ m/s} \\ h.v, & v > 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5.1)$$

Na základě intenzity povodně stanovené pro vybrané N -leté kulminační průtoky (minimálně v rozsahu Q_5, Q_{20}, Q_{100}) se nejprve stanoví hodnoty ohrožení s použitím tzv. matice rizika, která je uvedena na Obr. 5.1. Řádky matice odpovídají kategoriím IP_i a sloupce kategoriím N -letosti kulminačních průtoků. Pro takto stanovené hodnoty ohrožení R_i odpovídající jednotlivým N -letým kulminačním průtokům je možné následně přijmout doporučení dle Tab. 5.2.

Tab. 5.1 – Příklad tříd funkčního využití území dle ÚPD

Funkční využití území	Přijatelné riziko
Bydlení	(2) Nízké
Občanská vybavenost	
Doprava a technická infrastruktura	
Výroba	
Zemědělská výroba	
Sport a hromadná rekreace	(3) Střední
Vodní plochy	(4) Vysoké
Parky, veřejná zeleň, zahrady, lesy	
Orná půda, louky, pastviny	

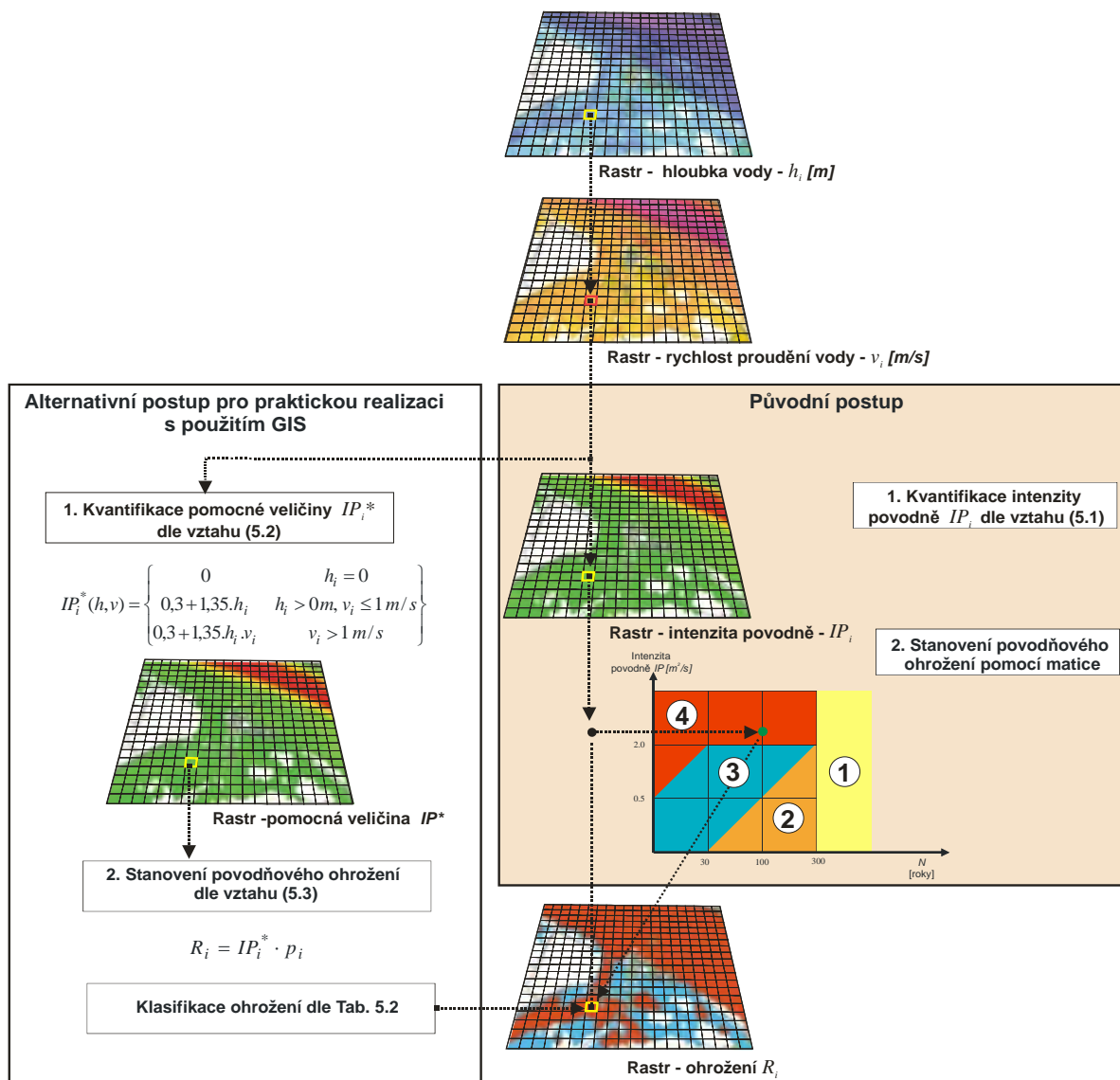
Tab. 5.2 - Klasifikace a verbální popis ohrožení v souladu s Obr. 5.1 a vztahem (5.3)

Ohrožení R dle [Beffa 2000] stanovené ze vztahu (5.3)	Kategorie ohrožení dle Obr. 5.1	Doporučení
$R \geq 0,1$ nebo $IP^* \geq 3$	(4) Vysoké (červená barva)	Doporučuje se nepovolovat novou ani rozšiřovat stávající zástavbu ve které se zdržují lidé nebo umísťují zvířata. Pro stávající zástavbu je třeba provést návrh protipovodňové ochrany, která zajistí odpovídající snížení rizika.
$0,01 \leq R < 0,1$	(3) Střední (modrá barva)	Výstavba je možná s omezeními vycházejícími z podrobného posouzení potenciálního ohrožení objektů povodňovým nebezpečím. Nevhodná je výstavba citlivých objektů (např. zdravotnická zařízení, hasiči apod.). Nedoporučuje se rozšiřovat stávající plochy určené pro výstavbu.
$R < 0,01$	(2) Nízké (oranžová barva)	Výstavba je možná , přičemž vlastníci dotčených pozemků a objektů musí být upozorněni na potenciální ohrožení povodňovým nebezpečím. Pro citlivé objekty je třeba přijmout speciální opatření ve smyslu protipovodňové ochrany
$p < 0,0033$ (tj. N -letost > 300)	(1) Reziduální (žlutá barva)	Otázky spojené s protipovodňovou ochranou se zpravidla doporučuje řešit prostřednictvím dlouhodobého územního plánování se zaměřením na zvláště citlivé objekty (zdravotnická zařízení, památkové objekty apod.). Snahou je vyhýbat se objektům a zařízením se zvýšeným potenciálem škod.

Výše popsany postup založený na odečítání ohrožení z matice rizika na Obr. 5.1 je obtížně proveditelný s použitím nástrojů GIS. Z tohoto důvodu byla navržena jeho úprava, která vede

ke shodným výsledkům [Beffa 2000]. Úprava postupu spočívá v zavedení pomocné veličiny IP^* , která se stanoví dle předpisu (5.2):

$$IP^*(h, v) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.3 + 1.35 \cdot h & h > 0m, v \leq 1 m/s \\ 0.3 + 1.35 \cdot h \cdot v & v > 1 m/s \end{cases} \quad (5.2)$$

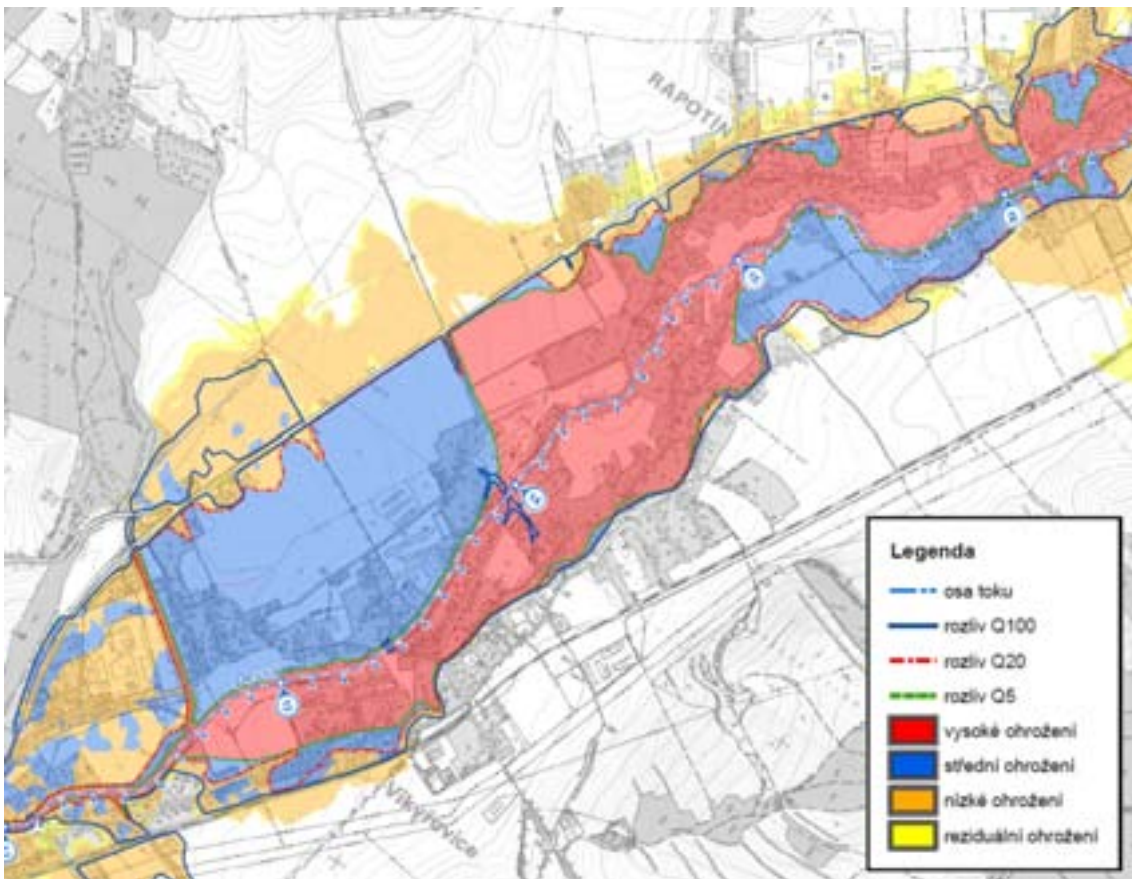


Obr. 5.1 - Schéma postupu metody rizikové matice pro daný N -letý kulminační průtok

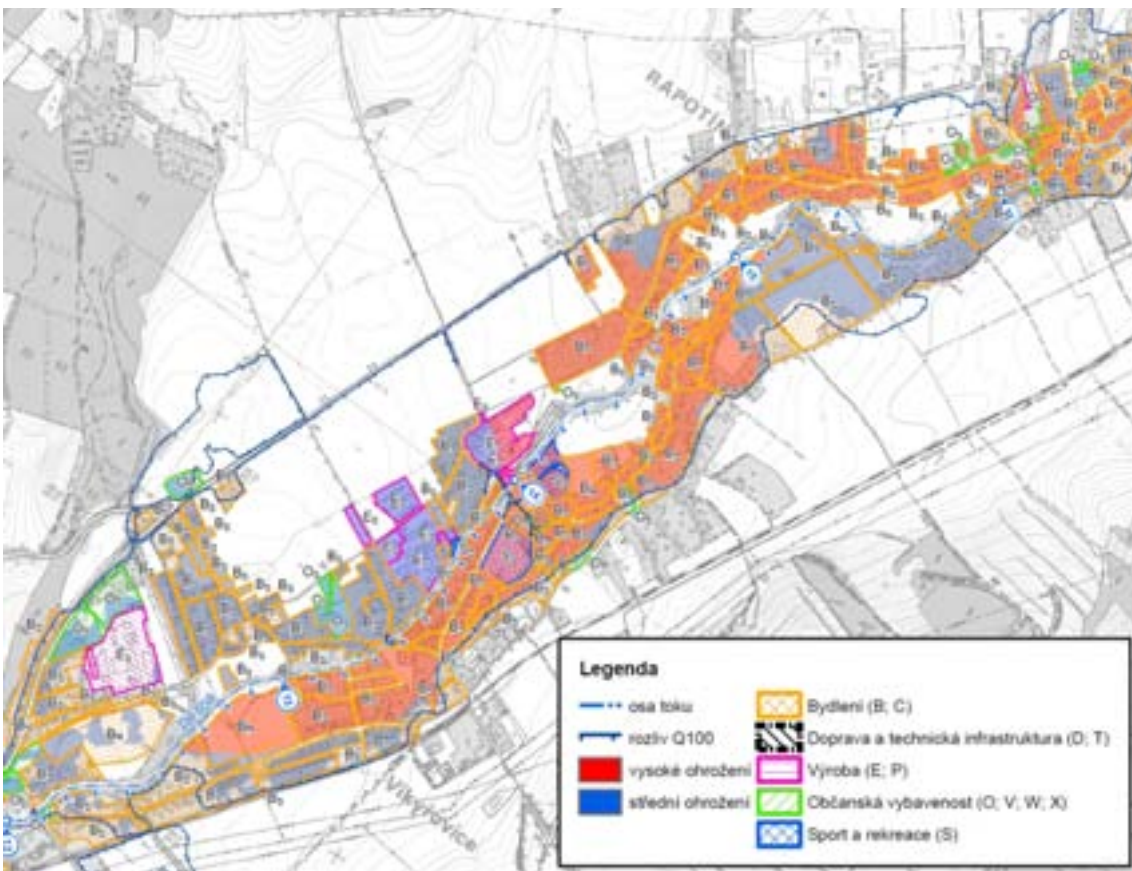
Ohrožení se pak pro daný N -letý kulminační průtok stanoví dle vztahu:

$$R_i = IP_i^* \cdot p_i, \quad (5.3)$$

kde pravděpodobnost překročení příslušného N -letého kulminačního průtoku se vypočte ze vztahu (3.1), popř. (3.2).



Obr. 5.2 - Příklad mapy ohrožení v lokalitě Rapotín [24]



Obr. 5.3 - Příklad mapy rizika v lokalitě Rapotín [24]

Výsledné ohrožení R se na závěr vyhodnotí jako maximální hodnota z jednotlivých dílčích ohrožení R_i odpovídajícím řešeným N -letým kulminačním průtokům dle vztahu:

$$R = \max_{i=1}^n R_i, \quad (5.4)$$

kde n značí počet řešených N -letých kulminačních průtoků. Vypočtené hodnoty ohrožení R se následně zařadí do kategorií dle Tab. 5.2. Prakticky se výpočet intenzity povodně IP_i^* provádí s využitím nástrojů GIS na základě podkladů o hloubkách a rychlostech proudění vody pro dané N -leté kulminační průtoky (viz Obr. 5.1). Stanovení rozsahu oblastí klasifikovaných reziduálním ohrožením (viz Tab. 5.2) je možné buď na základě údajů o rozlivech extrémních povodní s velmi malou pravděpodobností překročení ($N > 300$) nebo odborným odhadem vycházejícím z morfologie údolní nivy a rozsahu kvartérních fluviálních sedimentů. Předběžný odhad je třeba verifikovat při pochůzkách v rámci místních šetření.

Výsledky výše uvedené metody založené na matici rizika se pro zájmové území zpracovávají do podoby **map ohrožení** (viz Obr. 5.2) a **map rizika** (viz Obr. 5.3).

Mapy ohrožení (viz Obr. 5.2) zobrazují pomocí barevné škály kategorie ohrožení ploch v ZÚ s uvedením vysvětlujících komentářů dle Tab. 5.2. Kategorie člení záplavové území z hlediska povodňového ohrožení, které umožňuje posouzení vhodnosti stávajícího nebo budoucího funkčního využití ploch a doporučení na omezení případných aktivit na plochách v ZÚ s vyšší mírou ohrožení (viz Tab. 5.2). Tohoto postupu je možné využít např. v procesu územního plánování, při návrhu PPO apod.

Mapy rizika (viz Obr. 5.3) kombinují údaje o ohrožení s informacemi o zranitelnosti objektů v exponovaném území, které je možno excerpovat z ÚPD, mapových podkladů a místních šetření. Na základě dostupné ÚPD lze vymezit třídy ploch dle funkčního využití území (viz Tab. 5.1). Každé ze tříd je přiřazena hodnota tzv. maximálního přijatelného rizika (viz Tab. 5.1). Mapy takto klasifikovaných ploch využití území (mapy zranitelnosti) jsou následně „překryty“ s mapami ohrožení a analytickými nástroji GIS převedeny do map rizika (Obr. 5.3). V mapách rizika jsou zvýrazněny ty využívané plochy, na kterých je kritérium maximálního přijatelného rizika překročeno. Uvnitř každé takové plochy jsou vyznačeny dosažené hodnoty ohrožení. Takto identifikovaná území představují exponované plochy při povodňovém nebezpečí při jejich vysoké zranitelnosti. Dalším logickým krokem je podrobnější posouzení „rizikových ploch“ z hlediska řízení rizika, tj. snížení rizika na přijatelnou míru.

5.2 METODA ZALOŽENÁ NA VYJÁDŘENÍ POTENCIÁLNÍCH ŠKOD

Na základě výsledků plošné analýzy území metodou matice rizika (viz kap. 5.1) je třeba v oblastech s překročenou mírou přijatelného rizika přikročit k variantnímu návrhu PPO a vyčíslit předpokládané investiční náklady na jejich realizaci. V případě investic většího rozsahu je vhodné rozdělit navrhovaná PPO na menší, hydraulicky uzavřené celky. Účelnost vynaložených investic do navržených PPO je možné následně vyhodnotit metodou nákladů a užitků. Řešení zpravidla obsahuje:

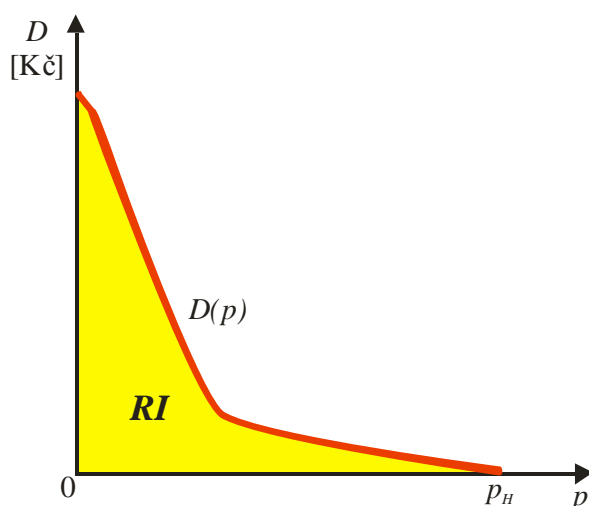
- odhad rozsahu ohroženého a ochráněného majetku v záplavových územích,
- odhad povodňových škod, kvantifikaci povodňového rizika metodou založenou na vyjádření potenciálních škod a výpočet hodnotících ekonomických kritérií metodou nákladů a užitků.

Rozsah ohroženého majetku v záplavových územích je třeba stanovit pro stav před a po realizaci navrhovaných PPO. Nejprve je provedeno hodnocení povodňového nebezpečí, které vychází z map hloubek vody v záplavových územích pro povodně odpovídající obvykle průtokům

Q_5 , Q_{20} a Q_{100} . Odhad povodňových škod na majetku v záplavových územích se provádí s využitím tzv. škodních křivek [MZe ČR 2004] [Satrapa, Fošumpaur, Horský 2006], [Říha 2005], které vyjadřují funkční závislost výše škody, popř. poškození na hloubce vody. Vyjádření povodňového rizika na základě potenciálních škod vychází ze vztahu:

$$RI = \int_0^{p_H} D(p) dp, \quad (5.5)$$

kde RI značí průměrné roční ekonomické povodňové riziko v [Kč/rok], p je pravděpodobnost překročení příslušného N -letého kulminačního průtoku vyjádřená přibližně vztahem (3.1), popř. (3.2). $D(p)$ představuje funkční závislost potenciálních škod [Kč] na pravděpodobnosti překročení příslušných kulminačních průtoků a p_H je pravděpodobnost překročení neškodného průtoku. Geometrický význam integrálu (5.5) je patrný z Obr. 5.4.



Obr. 5.4 – Čára překročení škod $D(p)$

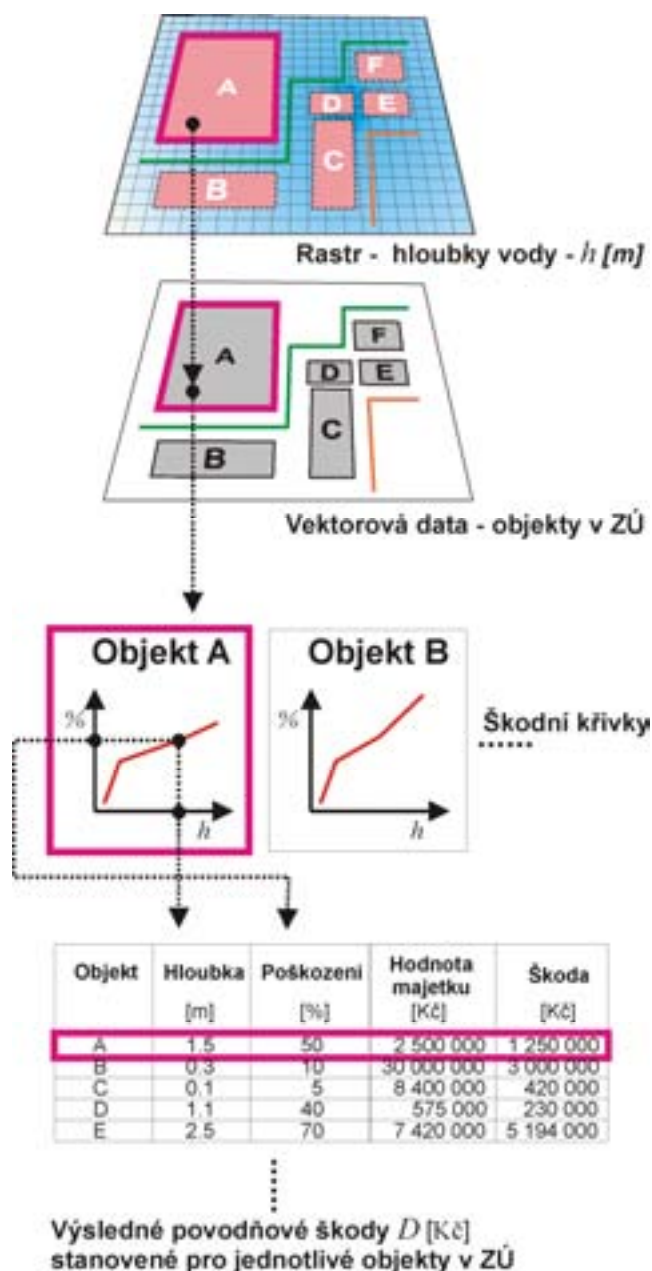
Funkční závislost $D(p)$ lze získat na základě potenciálních povodňových škod stanovených v diskrétních bodech odpovídajících vybraným N -letým kulminačním průtokům. Kulminační průtoky se volí v intervalu od neškodného průtoku, při kterém předpokládáme nulové škody, až do průtoku cca $Q_{1000} - Q_{10\,000}$, kdy je již přírůstek rizika velmi malý a na celkové hodnotě rizika RI se přestává projevovat. Praktický postup stanovení průměrného ročního ekonomického povodňového rizika probíhá v následujících krocích:

- Pro jednotlivé scénáře povodňového nebezpečí reprezentované N -letým kulminačním průtokem se provede odhad pravděpodobnosti jejich překročení ze vztahu (3.1), popř. (3.2).
- Modelovým hydraulickým výpočtem se pro jednotlivé scénáře povodňového nebezpečí stanoví charakteristiky průchodu povodně, především hloubky vody v záplavovém území.
- Z charakteristik průchodu povodně se přes škodní křivky (Obr. 5.5) odvodí výše přímých škod v daném území odpovídající jednotlivým povodňovým scénářům. Z těchto údajů se graficky vynese závislost $D(p)$, která umožní výpočet rizika RI dle vztahu (5.5).

Uvedený postup je vhodné realizovat v GIS, nejlépe s použitím účelové aplikace, která eliminuje rutinní opakování pracovních postupů (viz Obr. 5.5).. Autorem práce byla na Ústavu vodních staveb v rámci projektů [12], [6] vytvořena účelová aplikace v jazyce VBA, určená pro programové vybavení ArcGIS, která umožňuje zpracování uvedených kroků vč. kategorizace objektů v ZÚ na základě dat ZABAGED a RSO. Výstupem je přehled dotčeného majetku v ZÚ a kvantifikace povodňových škod. Výsledky jsou automaticky ukládány do programu MS Excel, kde je umožněno jejich další zpracování.

Stanovená hodnota RI slouží pro následné hodnocení ekonomické efektivity PPO, které lze provést např. na základě těchto ukazatelů [MZe ČR 2006]:

- ukazatel poměrné ekonomické efektivity PU ,
- ukazatel absolutní ekonomické efektivity AU ,
- doba návratnosti DN .



Obr. 5.5 - Schéma postupu stanovení potenciálních povodňových škod na objektech s použitím GIS

Uvedené ukazatele ekonomické efektivnosti PPO lze stanovit s použitím následujících vztahů (5.7), (5.8) a (5.9).

$$PU = \frac{RI(\text{bez PPO}) - RI(\text{po realizaci PPO})}{IDS}, \quad (5.7)$$

kde $RI(\text{bez PPO})$ je průměrné roční riziko před realizací PPO, $RI(\text{po realizaci PPO})$ je průměrné roční riziko po realizaci PPO, I jsou celkové náklady na realizaci PPO a DS je roční diskontní sazba v desetinném tvaru. V případě, že PU nabývá hodnot větších než 1, jde z dlouhodobého hlediska o rentabilní investici a naopak.

$$AU = \left(\frac{RI(\text{bez PPO}) - RI(\text{po realizaci PPO})}{DS} \right) - I, \quad (5.8)$$

přičemž kladné hodnoty ukazatele AU svědčí o ekonomické rentabilitě opatření, záporné hodnoty naopak svědčí o ekonomické nevýhodnosti realizace takového opatření.

$$DN = \frac{I}{RI(\text{bez PPO}) - RI(\text{po realizaci PPO})}, \quad (5.9)$$

6 PŘÍPADOVÁ STUDIE - VYUŽITÍ METOD RA V RÁMCI GENERELU ODVODNĚNÍ MĚSTA BRNA

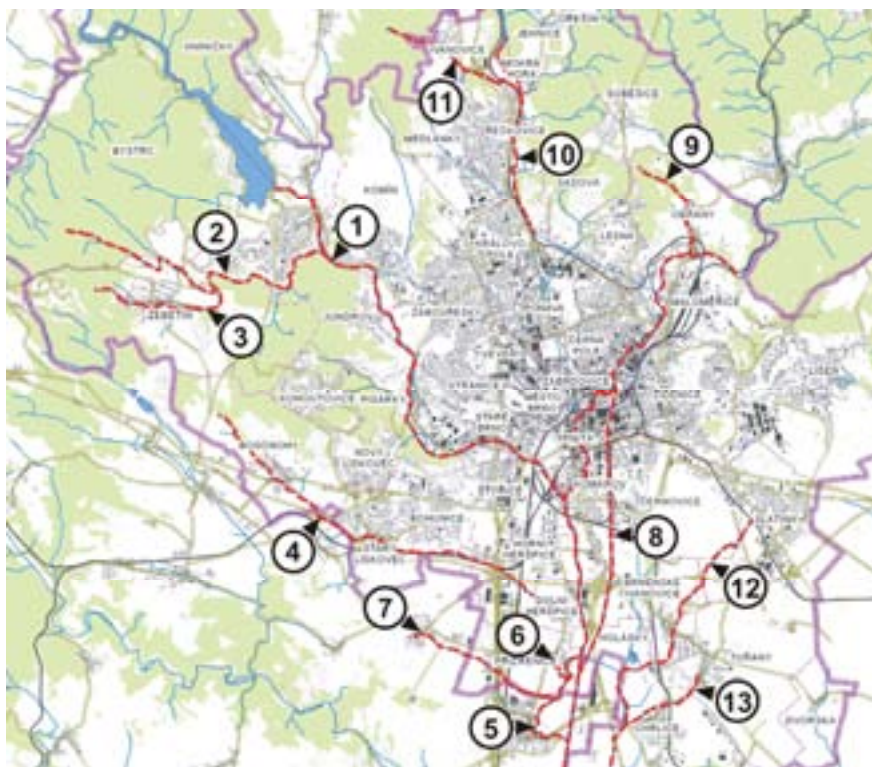
Jako případová studie pro prezentaci postupů rizikové analýzy bylo zvoleno řešení Generelu odvodnění města Brna (GOMB) na jehož zpracování se rámci části „Vodní toky - ochrana před povodněmi“ autor práce významně podílel [22]. V rámci GOMB byly využity metody RA popsané v kap. 5 a v průběhu zpracování bylo aplikováno účelové programové vybavení pro odhad potenciálních povodňových škod vytvořené autorem práce.

Obecně je možné postup RA použitý při zpracování GOMB rozdělit na tři stupně (etapy):

1. předběžná analýza zájmového území,
2. plošná RA metodou matice rizika,
3. hodnocení ekonomické efektivnosti PPO.

6.1 PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Prvním krokem při zpracování rizikové analýzy záplavového území a návrhu koncepce protipovodňové ochrany na území města Brna byl předběžný průzkum zájmového území. Byly vymezeny vodní toky, které mohou způsobit povodňové nebezpečí a na základě dřívějších studií byl zhodnocen orientační rozsah záplavového území. Pro zpracování bylo území omezeno na řece Svratce úsekem mezi brněnskou přehradou a profilem pod čistírnou odpadních vod v Modřicích, řeka Svitava byla sledována v úseku od Obřan až po soutok se Svratkou. Další toky byly hodnoceny pouze v případě, že procházejí zástavbou a pokud v důsledku vybřežení vody může dojít ke vzniku povodňových škod na majetku, k ohrožení životů a zdraví lidí nebo ke vzniku ekologických škod.. Rozsah zájmového území s vyznačením studovaných toků je patrný z Obr. 6.1.



Obr. 6.1 - Mapa zájmového území s označením posuzovaných toků na území města Brna

6.2 PLOŠNÁ RIZIKOVÁ ANALÝZA ZASAŽENÉHO ÚZEMÍ

Druhý stupeň rizikové analýzy záplavových území vycházel z výsledků hydraulických výpočtů realizovaných v souladu se zadáním Generelu odvodnění města Brna s použitím jednorozměrných (1D) hydrodynamických modelů. Pro plošnou analýzu byla použita metoda rizikové matice.

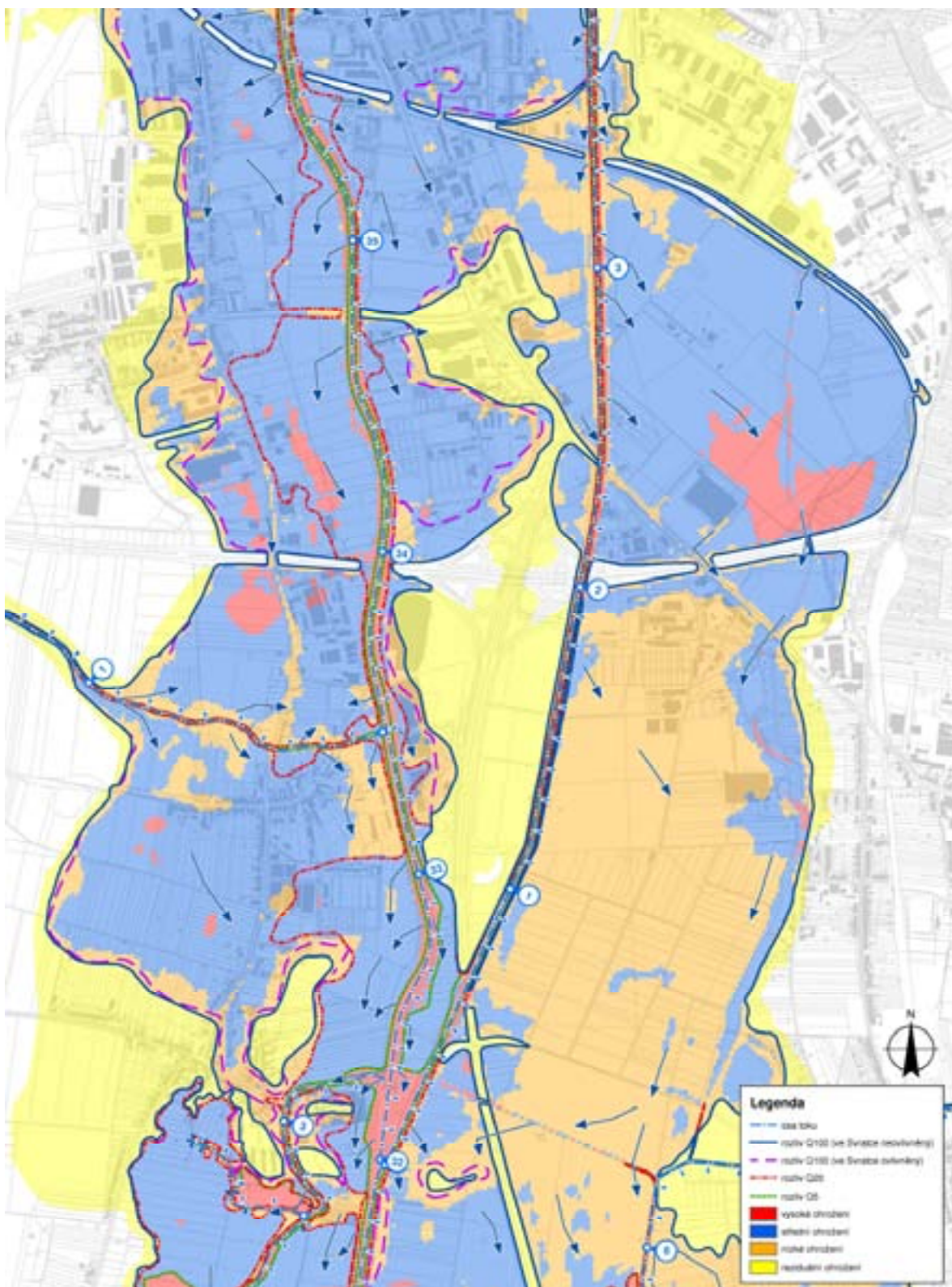
Pro zájmové toky (viz Obr. 6.1) byly k dispozici výsledky hydraulických výpočtů proudění vody zpracované v rámci GOMB s použitím 1D hydrodynamického modelu, které zahrnovaly vymezení hranic rozlivů vody pro průtoky Q_5 , Q_{20} , Q_{100} . Pro Svratku a Svitavu byly navíc k dispozici výsledky výpočtů pro průtoky Q_1 , Q_{10} , Q_{50} a pouze pro Svratku byl dále proveden výpočet průtoků Q_{100} (neovlivněný) a střet kulminačních průtoků Q_{100} na soutoku se Svitavou. Na základě těchto výsledků a digitálního modelu terénu (DMT) byly pro dostupnou škálu N -letých průtoků s použitím nástrojů GIS vyhotoveny mapy hloubek a rychlostí proudění vody. Dále byly stanoveny hranice rozlivu tzv. maximální možné hypotetické povodně, a to na základě odborného odhadu s ohledem na morfologii údolní nivy, úroveň břehové linie a na rozsah kvartérních fluviačních sedimentů v údolní nivě. Jako další upřesňující podklad byl využit maximální rozliv zvláštní povodně pod brněnskou přehradou. Takto stanovená území pak reprezentovala oblasti s tzv. „reziduálním povodňovým ohrožením“.

Dalším z významných podkladů byl koncept územního plánu města Brna, jehož využití při RA spočívalo v identifikaci funkčního využití ploch v zájmovém území.

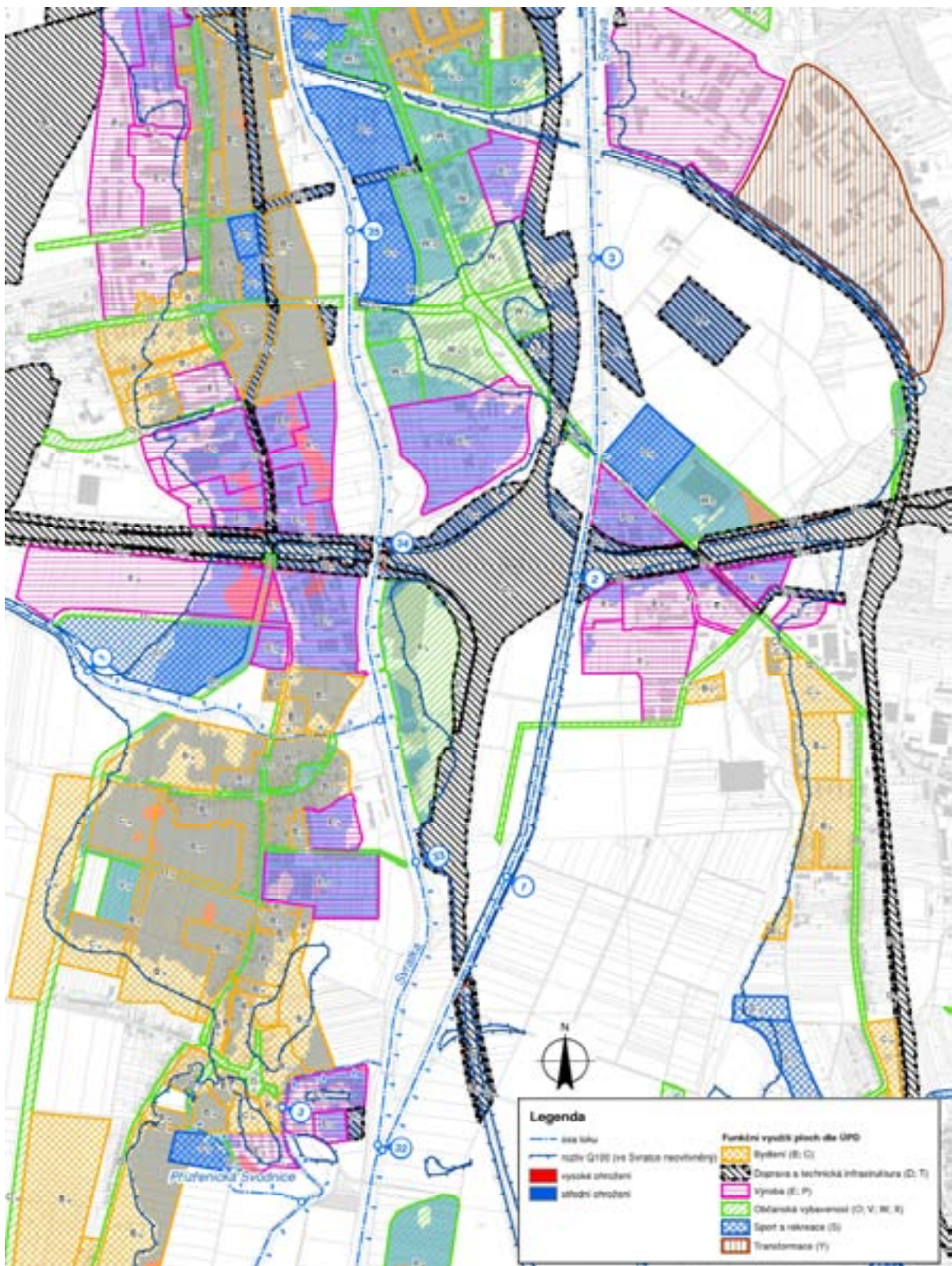
Výsledky metody založené na matici rizika byly pro zájmové území zpracovány do podoby map ohrožení a map rizika (viz Obr. 6.2 a 6.3).

Konečným krokem bylo podrobnější posouzení „rizikových ploch“ z hlediska snížení rizika na přijatelnou míru. Vytvořené mapy ohrožení a rizik by měly být vodítkem při urbanistických návrzích dalšího rozvoje města Brna z hlediska využití území a návrhu koncepce protipovodňové ochrany (PPO). S určitými omezeními rozvoje, resp. nápravnými opatřeními je třeba uvažovat především v oblastech s vysokým, ale také se středním i nízkým povodňovým ohrožením. Podrobnější komentář vyžadují i ohrožené plochy (včetně ploch s tzv. reziduálním rizikem), na

nichž je riziko menší než přijatelné. V žádném případě neznamená, že tyto plochy nemohou být zaplaveny a nemohou na nich vznikat škody. Koncept PPO byl následně podroben hodnocení ekonomické efektivity (viz následující kap. 6.3).



Obr. 6.2 - Příklad mapy ohrožení, Brno - Heršpice



Obr. 6.3 - Příklad mapy rizika, Brno - Heršpice

6.3 HODNOCENÍ EKONOMICKÉ EFEKTIVNOSTI PPO

Na základě výsledků plošné analýzy území metodou matice rizika byl pro všechny zájmové vodní toky proveden variantní návrh strukturálních PPO a vyčísleny předpokládané finanční náklady na jejich realizaci. Pro posouzení ekonomické efektivity byla navrhovaná PPO na Svitavě a Svatce rozdělena na 16 úseků, které tvořily hydraulicky uzavřené celky. Účelnost vynaložených investic do navržených PPO byla v jednotlivých úsecích hodnocena odděleně metodou nákladů a užitek (viz kap. 5.2).

7 ZÁVĚR

7.1 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY AUTORA V OBORU RA

Habilitační práce podává přehled o činnosti autora v oblasti vývoje metod rizikové analýzy záplavových území (RA) řádově v rozpětí let 2002 - 2010 a jejich aplikacích na cca 170 lokalitách v ČR (viz kap. 9). Současně s metodami RA se autor zabýval návrhem postupů pro jejich zpracování v prostředí GIS. V rámci uvedených činností byly vytvořeny účelové programové nástroje určené pro prostředí ArcGIS, které umožňují efektivnější provádění metod RA. Funkčnost a účelnost programových nástrojů byla autorem ověřena jejich nasazením např. při řešení projektu 129 120 – Podpora prevence před povodněmi [12] a dalších (viz kap. 9). Dlouhodobé zkušenosti z provedených prací jsou aktuálně zpracovávány do metodického pokynu k implementaci Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládnutí povodňových rizik [ES 2007] v rámci projektu [8].

Za aktuálně nejrozsáhlejší a nejkompaktnější aplikaci metod RA v rámci ČR lze považovat Generel odvodnění města Brna (GOMB), kde byly uplatněny a prosazeny progresivní metody RA [22]. Výsledky hodnocení metodami RA poskytly podklad pro rozhodování o diferencované míře protipovodňové ochrany (PPO) na základě posouzení její oprávněnosti, účelnosti a rentability. GOMB je základním vodohospodářským podkladem v procesu územního plánování na území města Brna, který je v souladu se směrnicí [ES 2007].

Pro plošné hodnocení ZÚ byla použita tzv. metoda matice rizika, kterou bylo provedeno hodnocení celkem 13 vodních toků v celkové délce cca 87 km. Tato metoda umožnila jednak rozčlenění území z hlediska stupně povodňového ohrožení a dále označení ploch s překročenou mírou tzv. přijatelného rizika. V územích, kde rozsah záplavy vedl k nepřijatelné výšce povodňového rizika, byly následně provedeny variantní návrhy PPO rozdělených do 16 úseků, včetně odhadu investičních nákladů na jejich realizaci, které činí cca 3,2 mld. Kč. PPO tak byla cíleně směřována do lokalit s překročenou mírou přijatelného rizika. Navržená PPO byla dále podrobena hodnocení ekonomické efektivity, jehož výsledky budou spolu s řadou dalších hledisek (např. sociální, environmentální atd.) důležitým podkladem pro rozhodování o prioritách realizace opatření v jednotlivých částech města Brna. Výstupy z řešení metodami RA se promítnou i do paralelně zpracovávaného územního plánu. Průběh i výsledky řešení ukazují, že metody RA, opírající se o výstupy z účinných prostředků numerického modelování proudění povrchové a podzemní vody, jsou významným přínosem v procesu zpracování generálních vodohospodářských výstupů, které jsou nezbytným podkladem při územním plánování v urbanizovaných územích. Výsledky provedených analýz slouží jako objektivní podklad pro prioritizaci úseků PPO za účelem zpracování dalších stupňů projektové dokumentace a zpracování žádostí o poskytnutí finančních prostředků z dotačních titulů.

Z dalších významných aplikací metod RA je možné uvést např. výsledky projektů [7], [9], které zahrnovaly významné toky Labe, Svitavu, Svatku, Jihlavu a Dyji.

7.2 PODNĚTY PRO DALŠÍ VÝZKUM V OBOU RA

Současný aplikovaný výzkum v oboru RA směřuje v ČR především k naplnění směrnice [ES 2007]. Konkrétně se jedná se o přípravu metodického pokynu a jeho ověření na pilotních lokalitách. Tyto úkoly jsou realizovány v rámci projektu [8], jehož nositelem je Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka a spoluřešiteli Vysoké učení technické v Brně, České vysoké učení technické, Masarykova univerzita, Vysoká škola ekonomická v Praze a další.

Na evropské úrovni je aktuálně podstatná zejména příprava mezinárodních projektů, které mají za úkol zajistit kompatibilitu metodik pro stanovení povodňového nebezpečí a rizik v rámci členských států EU. Tato problematika se týká toků protékajících územím více států. V ČR jde především o toky: Labe, Odra, Morava, Dyje.

V návaznosti na předchozí odstavce bude další výzkum autora v oboru RA zaměřen především na:

- multikriteriální hodnocení rizik v ZÚ;
- vyjádření rizik vyplývajících z ohrožení obyvatelstva během povodňových událostí, tj. stanovení individuálního a společenského rizika;
- vyjádření rizik souvisejících s ohrožením životního prostředí a citlivých objektů;
- hodnocení efektivnosti nestrukturálních PPO,
- vyjádření nejistot v RA.

Jako nejpodstatnější se v současnosti jeví téma multikriteriálního hodnocení rizik v ZÚ. V úvodní kap. 2 byl zmíněn proces řízení rizika (risk management) v ZÚ, který vrcholí návrhem opatření na snížení rizika, popř. jeho udržení na stávající úrovni. Tento návrh je výsledkem srovnání aktuálního rizika stanoveného rizikovou analýzou s rizikem přijatelným. V současnosti je při tomto hodnocení hlavní pozornost mnohdy zaměřena na posuzování ekonomické efektivnosti případných opatření a ostatní aspekty (sociální, environmentální) jsou posuzovány pouze okrajově. Cílem proto bude nalezení vhodných metod, které umožní multikriteriální analýzu (MCA) povodňových rizik. V souladu se směrnicí [ES 2007] by se mělo jednat konkrétně o současné hodnocení těchto typů rizik:

- ekonomické riziko,
- riziko vyplývajících z ohrožení obyvatelstva,
- rizika související se zaplavením potenciálních zdrojů havarijního znečištění vody v případě zaplavení,
- riziko vyplývajících z ohrožení citlivých objektů (památkově chráněné významné objekty, objekty sociální péče, zdravotnická zařízení atd.).

Dalším podstatným kritériem výběru metod MCA bude jejich realizovatelnost v prostředí GIS a možnost prezentace výsledků ve formě map.

7.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY V OBLASTI VÝUKY A KONCEPCE VZDĚLÁVÁNÍ V OBOU RA A GIS

Praktické úlohy řešené v odborné praxi kladou stále vyšší požadavky na odbornou úroveň a znalosti absolventů Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Obsahovou náplň jednotlivých předmětů vyučovaných konkrétně na oboru Vodní hospodářství a vodní stavby (V) je tedy nutno průběžně aktualizovat tak, aby studenti byli seznamováni s nejnovějšími poznatky. Mohutný rozvoj prodělala, zejména v posledních letech, oblast využití informačních technologií. Tato oblast, nazývaná souborným názvem hydroinformatika, v současnosti prolíná celým spektrem odborných předmětů vyučovaných na oboru (V). Do oboru hydroinformatiky spadají i GIS, které

jsou dnes považovány za účinný nástroj při řešení celé řady úloh v inženýrské praxi. Z toho plyne nutnost zařazení výuky GIS i do studijních programů FAST VUT v Brně.

Rozsáhlejší aktivity jsou v tomto směru autorem vyvíjeny zhruba od roku 2003, kdy byla vybudována nová počítačová učebna na Ústavu vodních staveb. Dále navazoval projekt [25], v rámci kterého byly pořízeny fakultní multilicence programového vybavení ArcGIS, zařízení pro výuku mobilních GIS, vizualizační technika, zařízení pro velkoformátový tisk a zrealizována nová počítačová učebna na Ústavu vodního hospodářství krajiny vč. síťové infrastruktury. Tento trend v technickém zabezpečování výuky pokračuje až do současnosti, což dokazuje průběžné rozšiřování a obnovování programového vybavení a výpočetní techniky např. v rámci projektů [29], [30]. Konkrétně z projektu [30] byly pořízeny serverové aplikace ArcGIS a ve větším měřítku i zařízení pro výuku mobilních GIS. Posledním počinem v oblasti technického vybavení pro podporu výuky byla realizace projektů [31], [32], které umožnily kompletní rekonstrukci původní zmiňované počítačové učebny na Ústavu vodních staveb z roku 2003 a dále vybudování další nové počítačové učebny. Snahou je i do budoucna průběžně udržovat na odpovídající úrovni vybavení učeben výpočetní technikou, programovým vybavením a moderními výukovými pomůckami.

Hlavním důvodem k realizaci výše uvedených činností je umožnění výuky informačních technologií – hydroinformatiky v rámci odborných předmětů na oboru Vodní hospodářství a vodní stavby a dále podpořit výuku GIS i v rámci dalších oborů na Fakultě stavební. S tím kromě nezbytného technického vybavení souvisí i rozšiřování nabídky stávajících předmětů. V této souvislosti byl zrealizován projekt [26] s cílem vytvořit nové volitelné předměty zaměřené na základní teoretické a uživatelské znalosti práce s programovým vybavením ArcGIS. Tyto předměty tak doplnily stávající nabídku v rámci akreditovaných studijních programů orientovanou primárně na oborové aplikace GIS.

Výuka RA je aktuálně součástí magisterského studijního programu v rámci předmětů: CR56 Protipovodňová ochrana, CR04 Hydroinformatika a CR54 Geografické informační systémy ve vodním hospodářství. U těchto předmětů probíhá aktuálně modernizace zaměřená na aktualizaci obsahu a využití metod e-learningu [32].

Za podstatnou součást výuky je autorem rovněž považováno zadávání témat diplomových a disertačních prací z oboru RA a GIS, v rámci kterých se mohou studenti podílet na řešení konkrétních úkolů z oblasti praxe nebo výzkumu.

Mezi další činnosti autora v oblasti vzdělávání na Ústavu vodních staveb patří realizace kurzů celoživotního vzdělávání zaměřených na problematiku RA a GIS. V oboru RA lze předpokládat, že trend vzdělávání formou CŽV bude pokračovat především v souvislosti s naplněním požadavků směrnice [ES 2007], které zahrnují zpracování map povodňového nebezpečí, map rizik a plánů zvládnutí povodňových rizik. V této souvislosti bude nezbytné zaškolení pracovníků jak z oblasti státní správy, tak soukromého sektoru. Tato skutečnost bude vyžadovat zapojení výzkumných organizací a vysokých škol, zabývajících se dlouhodobě výzkumem v oblasti RA. V rámci Ústavu vodních staveb jsou již v tomto směru vyvíjeny aktivity spočívající v zapojení do Operačního programu – vzdělávání pro konkurenceschopnost, který by měl napomoci především v oblasti materiálního a personálního zabezpečení výše uvedených vzdělávacích činností.

Zmiňované aktivity v oblasti pedagogiky jsou v souladu s dlouhodobým záměrem Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. K plnění dlouhodobého záměru přispívají jednak v otázce zvýšení možnosti uplatnění absolventů v praxi, což je jedno z hlavních kritérií pro hodnocení kvality výuky. Dalším podstatným přínosem je vytvoření nabídky specializovaných předmětů v rámci celoživotního vzdělávání, reagujících na nejnovější trendy a poznatky v oboru vodního hospodářství a vodních staveb, a které rozšíří vědomosti absolventů fakulty a umožní jejich větší specializaci.

8 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

8.1 LITERATURA

van ALPHEN, J. and PASSCHIER, R. 2007. Atlas of Flood Maps, examples from 19 European countries, USA and Japan, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, Netherlands, prepared for EXCIMAP.

AQUAVEO. 2009. <http://www.aquaveo.com/>.

BEFFA, C. 2000. A Statistical Approach for Spatial Analysis of Flood Prone Areas. International Symposium on Flood Defence, D-Kassel.

BOOTH, B. 2000. Using ArcGIS 3D Analyst. Esri Press.

BURKE, R. 2003. Getting to Know ArcObjects, ESRI Press.

ČSÚ. 2008. Katalog geografických produktů k 1.7. 2008. Český statistický úřad. Praha.

ČÚZK. 2008. <http://www.cuzk.cz> – internetové stránky Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního.

ČVUT. 2005. Metodika pro posuzování protipovodňových opatření navržených do II. etapy programu prevence před povodněmi, Praha.

DHI. 2008. <http://www.dhigroup.com/>.

DRÁB, A. 2002. Nejistoty v rizikové analýze záplavových území. Seminář 2002 – sborník příspěvků. Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, Sešit 2. s.50 – 54.

DRÁB, A. 2003. Využití mobilních GIS v rizikové analýze záplavových území. In 3. Vodohospodářská konference 2003. Brno, CERM s.r.o., Brno. 2003. s. 271 - 278. ISBN 80-86433-26-9.

DRÁB, A. 2003a. Concepts of flood risk analysis methodology. In Safety and Reliability. Lisse, A.A. Balkema. p. 567 - 574. ISBN 9058095959.

DRÁB, A. 2006. Analýza povodňových rizik v procesu územního plánování s využitím GIS. Urbanismus a územní rozvoj 5/2006, s. 37 - 42.

DRÁB, A. 2007. Aplikace metody matice rizika v podmínkách ČR. In Rizika ve vodním hospodářství. Brno, CERM. s. 53 - 594. ISBN 978-80-86433-43-1.

DRÁB, A., ČEJP, J. 2004. 2D matematické modelování proudění vody během zvláštní povodně. In 4. Vodohospodářská konference 2004 - sborník příspěvků. Brno, CERM, s.r.o. s. 72 - 79. ISBN 80-7204-360-9.

DRÁB, A., JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2001. Numerical modelling of the intake parts of small hydropower plants. In Hydropower in the New Millennium. Netherlands, A.A.Balkema. p. 361 - 370. ISBN 90 5809 195 3.

DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2008. Riziková analýza záplavových území v procesu územního plánování – aplikace na území města Brna. Urbanismus a územní rozvoj 2/2008, s. 25-33.

DRBAL, K. aj. 2003. Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území a její ověření v povodí Labe – Zpráva 2003. VÚV T.G.M. Brno.

DRBAL, K. aj. 2005. Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území a její ověření v povodí Labe - Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území. VÚV T.G.M. Brno.

- DRBAL, K., aj. 2006a. Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území. Urbanismus a územní rozvoj 5/2006. s. 43-49.
- DRBAL, K., aj. 2006b. Návrh nástroje hodnocení účinnosti realizovaných preventivních opatření ochrany před účinky povodní. Zpráva úkolu č.3385 za rok 2006. VÚV T.G.M. Brno.
- FEMA. 1997. Multi Hazard Identification and Risk Assessment, The Cornerstone of the National Mitigation Strategy.
- FLOODSITE. 2008. <http://www.floodsite.net/>. www stránky projektu Flood Site.
- FOWM. 1997. Federal Office for Water Management: Empfehlungen: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. EDMZ, CH-3000 Bern.
- GABRIEL, P., KRATCHVÍL, J., ŠEREK, M. 1982. Výpočetní technika pro obor vodní hospodářství a vodní stavby. SNTL/ALFA, Praha.
- GELDER, PHAJM et al. 1999. On the Lack of Information in Hydraulic Engineering Models. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
- GELDER, PHAJM. 1999. Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures, PhD. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
- GOULDBY, B. and SAMUELS, P. 2009. Language of Risk (Second Edition). Report T32-04-01. FLOODsite Consortium. <http://www.floodsite.net/>.
- HUTTER, G. 2007. Strategic Planning for Long-Term Flood Risk Management. IPS - International Planning Studies. Vol. 12, No. 3, pp. 273-289.
- CHOW, VT. 1959. Open-channel hydraulics. Tokyo:McGraw-Hill Kogakusha. 680 p.
- JANDORA, J. 2003. Zvláštní povodeň pod VD Opatovice na Malé Hané a Hané, Ústav vodních staveb, VUT FAST, Brno.
- JOHNSTON, K., MCCOY, J. 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst, ESRI.
- KENNEDY, H. 2001. Dictionary of GIS terminology. ESRI Press, Redlands. 116 p.
- KLIJN, F., SAMUELS, P. and Van OS, A. 2008. Towards Flood Risk Management in the EU: State of affairs with examples from various European countries. International Journal of River Basin Management, 6 (4). pp. 307-321.
- KONVIČKA, M., aj. 2002. Město a povodeň. Strategie měst po povodni. ERA Group. Brno. 219 s.
- KRATOCHVÍL, J. 1978. Řešení dvojrozměrného proudění vazké kapaliny popsané Navier – Stokesovými rovnicemi metodou konečných prvků. Vodohospodářský časopis, ročník 26, č.1. s. 92-112.
- KRATOCHVÍL, J., LEITNER, F. 1977. Použití intervalové aritmetiky, splajnů a metody konečných prvků při řešení stability zemních hrází. Staveb. časopis, ročník 25, č.9. VEDA, Bratislava. s. 652-666.
- KUBAL, C., HAASE, D., MEYER, V. and SCHEUER, S. 2009. Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1881-1895.
- MAIDMENT, D. 2002. ArcHydro – GIS for Water Resources. Esri Press, Redlands, California.

- MEYER, V. et al. 2007. GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management. Report T10-07-06. FLOODsite Consortium. <http://www.floodsite.net/>.
- MEYER, V., SCHEUER, S. and HAASE, D. 2009. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Nat. Hazards* 48, 17–39, DOI: 10.1007/s11069-008-9244-4.
- MZe ČR 2004. Posílení rizikové analýzy a stanovení aktivních zón v českém národním hospodářství, Nizozemský program „Partners for Water“, MZe, 5/2004, Arcadis, 1103021/OF4/1O2/000852/LE
- MZe ČR 2006. Dokumentace programu 129 120 „Podpora prevence před povodněmi II“.
- MŽP ČR 2000. Strategie ochrany před povodněmi pro území České republiky schválená vládním usnesením ze dne 19. dubna č. 382.
- MŽP ČR. 2008. Operační program životní prostředí pro vodu, vzduch a přírodu. Implementační dokument – verze k 23.6. 2008. Ministerstvo životního prostředí, Státní fond životního prostředí.
- NEUMANN, J. 1996. Geografická informace. Český výkladový a anglicko-český a česko-anglický překladový slovník. Ministerstvo hospodářství České republiky. Praha.
- POWNUK, A. 2004. Efficient Method of Solution of Large Scale Engineering Problems with Interval Parameters Based on Sensitivity Analysis, Proceeding of NSF workshop on Reliable Engineering Computing, Savannah, Georgia, USA, p. 305-316.
- RAPANT, P. 2001. Pracovní návrh první části výkladového slovníku pro oblast geoinformatiky, časopis Geoinfo 2/2001.
- RODI, W. 1993. Turbulence models and their application in hydraulics. A.A.Balkema. Rotterdam.
- ŘÍHA, J. aj. 1997. Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. VUT v Brně. Brno. 185 s.
- ŘÍHA, J. aj. 2005. Riziková analýza záplavových území, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno, Sešit 7, CERM, 2005, 286 s., ISBN 80-7204-404-4.
- ŘÍHA, J., DRÁB, A. 2002. Floodplain Risk Assessment Concept and Its Practical Application in Urban Planning. In *Hydroinformatics 2002 - proceedings of the fifth international conference*. Cardiff, UK, Cardiff. 2003. p. 1075 - 1079. ISBN 1843390213.
- ŘÍHA, J., DRÁB, A. 2002. GIS - Groundwater and Floodplain Flow Modelling – the Tool for the Flood Protection Management. In *Hydroinformatics 2002 - proceedings of the fifth international conference*. Hydroinformatics 2002 - proceedings of the fifth international conference. Cardiff, UK, Cardiff. 2002. p. 1066 - 1070. ISBN 1843390213.
- ŘÍHA, J., JANDORA, J., DRÁB, A., JULÍNEK, T. 2000. Aplikace numerických modelů při návrhu protipovodňové ochrany urbanizovaných území. In *Vývoj metod modelování a řízení vodohospodářských a dopravních systémů*. Brno, VUT v Brně. p. 151 - 160. ISBN 80-214-1752-8.
- SALTELLI, A., TARANTOLA, S., CAMPOLOGNO, F., RATTO, F. 2005. Sensitivity analysis in practise. John Wiley & Sons, England. 217 p.
- SAMUELS, P., KLIJN, F. and DIJKMAN, J. 2006. An analysis of the current practice of policies on river flood risk management in different countries. *Irrigation and Drainage*, 55, S141–S150.
- SATRAPA, L. 2006. Povodně v územních plánech obcí – praktické zkušenosti. *Urbanismus a územní rozvoj* 5/2006. s. 31-36.
- SATRAPA, L., FOŠUMPAUR, P., HORSKÝ, M. 2006. Možnosti a ekonomická efektivnost protipovodňových opatření. *Urbanismus a územní rozvoj* 5/2006. s. 25-30.

SCHANZE, J. et al. 2008. CRUE Research Report No I-1: Systematisation, evaluation and context conditions of structural and non-structural measures for flood risk reduction. FLOOD-ERA Joint Report. ERA-NET CRUE. <http://www.crue-eranet.net>.

SCHMULLER, J. 2001. Myslíme v jazyku UML, Grada, Praha.

SLIJKHUIS, K.A.H., VAN GELDER, P.H.A.J.M., AND VRIJLING, J.K., 1997 Optimal dike height under statistical-, damage-, and construction uncertainty,. Structural Safety and Reliability, Vol. 7, pp. 1137-1140.

ŠKRÁŠEK, J., TICHÝ, Z. 1990. Základy aplikované matematiky III. SNTL Praha.

STARÝ, M. 2005. Hydrologie, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. VUT v Brně, FAST. Brno.

SOMMER, M. 1985. Hydrologie. Učební text VUT v Brně, FAST. SNTL Praha.

TICHÝ, M. 1994 - 1996. Rizikové inženýrství. 1 - Riziko a jeho odhad. Stavební obzor 9/94, 2 – Identifikace nebezpečí. Stavební obzor 9/95, 3 – Pravděpodobnost vzniku nepříznivé události. Stavební obzor 1/96.

U.S. Army. 1996. Risk-based Analysis for Flood Damage Reduction Studies, U.S. Army Corps of Engineers., Washington, D.C.

USACE. 2008. <http://www.hec.usace.army.mil/>.

ÚVIS. 2001. Terminologický výkladový slovník pojmů z oblasti geoinformací. Věstník Úřadu pro veřejné informační systémy, ročník II, částka 3. Praha.

VALENTA, P. 2004. Dvourozměrné numerické modelování proudění vody v otevřených korytech a inundačních územích. Habilitační práce. ČVUT, Fakulta stavební, Praha.

VITÁSEK, E. 1987. Numerické metody. SNTL Praha.

Votruba, L., Heřman, J. 1993. Spolehlivost vodohospodářských děl. Česká matice technická, Praha 1993.

VREUGDENHIL, CB. 1988. Numerical methods for shallow water flow. Kluwer Academic Publishers.

ZEILER, M. 1999. Modeling our World, ESRI Press.

ZIMMERMAN, M., POZZI, A. and STOESSEL, F. 2005. Vademecum – Hazard Maps and Related Instruments, The Swiss System and its Application Abroad, PLANAT, Bern, Switzerland.

8.2 SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA A NORMY

ČSN 751400 Hydrologické údaje povrchových vod.

ES 2007. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.

Vyhláška 236/2002 Sb. o způsobu a rozsahu zpracovávání návrhu a stanovování záplavových území.

Vyhláška 306/1998 Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví postup hodnocení rizika nebezpečných chemických látek pro životní prostředí.

Vyhláška 391/2004 Sb. o rozsahu údajů v evidencích stavu povrchových a podzemních vod a o způsobu zpracování, ukládání a předávání těchto údajů do informačních systémů veřejné správy.

Vyhláška MŽP 236/2002 Sb. o způsobu a rozsahu zpracování návrhu a stanovování záplavových území.

Zákon č.183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).

Zákon č.254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů.

Zákon č.89/1995 Sb. o státní statistické službě.

9 SEZNAM AUTOREM ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ SOUVISEJÍCÍCH S TÉMATEM PRÁCE

Následující seznam obsahuje vybrané projekty související s tématem habilitační práce (RA a *GIS*), na kterých se autor podílel jako řešitel, spoluřešitel, popř. spoluautor publikací.

9.1 VĚDECKO VÝZKUMNÉ PROJEKTY

- [1] Vědeckovýzkumný záměr MSM 261100006 - Vývoj metod matematického modelování a řízení vodohospodářských a dopravních systémů.
- [2] Projekt GAČR 103/97/0175 - Rizika porušení vzdouvacích staveb na tocích při extrémních hydrologických situacích.
- [3] Projekt GAČR 103/97/0780 - Strategie rozvoje měst po povodni.
- [4] Projekt GAČR 103/99/1470 - Extrémní hydrologické jevy v povodích.
- [5] Projekt GAČR 103/02/018 - Využití metod teorie pravděpodobnosti, matematického modelování, hodnocení škod a rizikové analýzy při návrhu protipovodňových opatření.
- [6] Projekt GAČR 103/02/D100 - Využití matematického modelování a *GIS* jako nástrojů rizikové analýzy záplavových území.
- [7] VaV/650/5/02 - Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavových územích a její ověření v povodí Labe.
- [8] SP/1c2/121/07 - Mapy rizik vyplývající z povodňového nebezpečí v ČR.
- [9] Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR, část riziková analýza, toky Svitava, Svratka, Dyje.

9.2 PROJEKTY S PRAKTICKOU APLIKACÍ METOD RA

- [10] Záplavové území pro tok Kyjovka. Doc. Ing. Jaromír Říha, CSc. Brno. 2003.
- [11] Protipovodňová opatření na ochranu hl.m. Prahy. Etapa 0006 – Zbraslav, Radotín, Chuchle. Studie průsakových poměrů v prostoru linie protipovodňových opatření. VUT FAST Brno. 2005.
- [12] 129 120 - Podpora prevence před povodněmi II. Projekt Ministerstva zemědělství ČR. 2006.
- [13] Protipovodňová opatření Jimramov, studie proveditelnosti. Beta-projekt, s.r.o. Svitavy, 2007.
- [14] Kunovice - protipovodňové opatření podél vodního toku Olšava, studie proveditelnosti. Hydroprojekt CZ a.s., Brno, 2007
- [15] Protipovodňová opatření na toku Loučka - posouzení efektivity navrhovaných protipovodňových opatření. Město Valašské Meziříčí, 2007.
- [16] Protipovodňová ochrana města Velké Meziříčí, studie proveditelnosti. Město Velké Meziříčí, Brno, 2007.
- [17] Protipovodňová opatření ve městě Pohořelice, studie proveditelnosti. Město Pohořelice, Brno, 2007.
- [18] Protipovodňová opatření Přibyslavice, studie proveditelnosti. Pöyry Environment, Brno, 2007.

- [19] Protipovodňová ochrana obce Měřín, studie proveditelnosti. Pöyry Environment, Brno, 2008.
- [20] Protipovodňová ochrana města Moravské Budějovice, studie proveditelnosti. Město Moravské Budějovice, 2008.
- [21] Generel odvodnění, Šlapanice - projektová příprava řešení odvodu extravilánových a dešťových vod s protipovodňovými opatřeními. Pöyry Environment, Brno, 2008.
- [22] Generel odvodnění města Brna, část vodní toky – riziková analýza, Magistrát města Brna, Brno 2008.
- [23] Rozšířená multikriteriální analýza s cílem navrhnout pořadí priorit realizace PPO města Brna, Magistrát města Brna, Brno 2009.
- [24] Protipovodňová ochrana obcí na řece Desné v úseku Šumperk – Maršíkov. Povodí Moravy, s.p., Brno 2009.

9.3 PROJEKTY ZAMĚŘENÉ NA PODPORU VÝUKY GIS A RA

- [25] Projekt FRVŠ 227/2005 - Modernizace počítačových učeben pro obor vodní hospodářství a vodní stavby (V).
- [26] Projekt FRVŠ 2783/2006 - Rozšíření výuky geografických informačních systémů na Fakultě stavební VUT v Brně.
- [27] Projekt FRVŠ 2993/2006 - Řešení úloh 2D horizontálního proudění podzemní vody v prostředí ArcGIS.
- [28] Projekt FRVŠ 2005/2007 - Využití geografického informačního systému při modelování 2D horizontálního proudění vody.
- [29] MŠMT RP 679 - Integrovaný multidisciplinární výukový informační systém pro GIS řešení ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství, architektury a podnikatelskou.
- [30] Interní projekt FAST VUT v Brně v roce 2008 - Inovace infrastruktury pro výuku geografických informačních systémů (GIS) provozované ústavy GED, VST a AIÚ na FAST VUT v Brně.
- [31] Interní projekt FAST VUT v Brně v roce 2009 - Rozšíření kapacity počítačových učeben pro obor (V).
- [32] Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost - CZ.1.07/2.2.00/07.0410 Modernizace předmětů navazujícího magisterského studijního programu Stavební inženýrství na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně – dílčí část zahrnující inovaci předmětů CR04 Hydroinformatika, CR54 GIS ve vodním hospodářství, CR56 Protipovodňová ochrana.

ABSTRACT

Experience from extreme flood events in the Czech Republic during recent years has shown the necessity for a systematic approach to flood protection. Procedures based on the theory of risk management appear to be very effective for this purpose. These methods enable above all the identification of endangered areas and the consecutive effective design of flood protection measures (FPM). FPM conception should be based on effectiveness and efficiency assessment. The principles mentioned above have been included in the Flood Risk Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council on the assessment and management of flood risks, which is calling for the development of effective tools for appointing priorities for the taking of technical, financial and political decisions in flood risk management. It can be stated that procedures of flood risk analysis have been developed in the Czech Republic since the catastrophic floods of 1997. For the coming period the Czech Republic has prepared flood risk analysis tools which have been verified in hundreds of case studies. Currently, the Directive 2007/60/EC guideline based on past experience with flood risk analysis applications is being processed.

The objective of this thesis is to demonstrate the scientific and professional author's contribution to the flood risk analysis methods. Thesis presents flood risk analysis steps and procedures for the development of flood hazard, danger and flood risk maps supported by GIS. In more details the following particular problems are discussed: flood hazard evaluation using 1D and 2D hydrodynamic modelling of flow in complex river-floodplain systems, floodplain vulnerability assessment and application of selected flood risk estimation methods. The following risk based methods are mentioned:

- The matrix for the determination of the danger level is being used for the assessment of floodplains from the viewpoint of flood hazard, vulnerability and risk. The method enables the general identification of areas and structures where the acceptable risk has been exceeded and following on from this, the design of flood protection measures. The method has been adapted and implemented for conditions in the CR using tailor made software tools for GIS applications.
- The method based on flood loss estimates serves for an assessment of the economic efficiency of the flood protection measures proposed.

The final part of the thesis deals with further research into flood risk analysis which needs to be carried out to improve and refine individual techniques and outputs. It should be focused on the following topics:

- more detailed multi-criteria flood risk assessment;
- non-structural flood protection measures and the evaluation of their effectiveness and efficiency;
- inclusion of risks from the exposure of inhabitants to flood hazards;
- the assessment of individual and societal risk;
- assessment of environmental risks, e.g. extensive water contamination due to the flooding of pollution sources;
- assessment of risks due to the flooding of sensitive facilities (social care institutions, hospitals, rescue services, police, etc.) and historical monuments;
- estimation of indirect losses;
- more comprehensive uncertainty analysis in risk management, including the effect of the influence of global changes on hydrological parameters.